



Escuela de Ingeniería
Ingeniería Civil Eléctrica

Mejoras de comunicación en controladores climáticos para invernaderos, con integración de canales inalámbricos entre sensores, controlador y ordenador.

Javier Andrés Cantillana Castillo
Profesor guía: Diego Muñoz
Supervisor en Azimut: Cristián Cerón / Ingeniero Industrial

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico

Rancagua, Chile
7 de Diciembre del 2023

Agradecimientos

Primero que todo, quiero dar las gracias a mi madre Maria Ines Castillo Garrido, por su constante apoyo y compañía durante estos años de constante estudio. Cuando entre a estudiar esta carrera hace 6 años, no esperaba poder llegar tan lejos, ya sea por lo difícil de la carrera, como por el hecho de la exigencia que tiene el estudio universitario. Debo admitir que desde el momento en que se me informó que fui aceptado en la universidad de O'Higgins, el conseguir mi título profesional fue una meta impuesta muy lejana y no sabía si podría conseguirlo.

Uno de mis mayores temores era él cómo podría pagarme la universidad ya que en la familia solo contamos uno con el otro, pero en vez de decirme que solicitaremos al CAE, ella era capaz de trabajar lo suficiente como para pagar la carrera y que no me preocupara en trabajar, solo me dedicara a estudiar y poder conseguir mi título, que era lo más importante.

Me gustaría agradecer a todos los profesores que fueron parte de mi formación académica como profesional, especialmente a mi profesor guía quien fue el primero del cual aprendí el trabajo con circuitos y sistemas de control, lo cual despertó mi gusto por esta materia y me ayudó a elegir en qué área quiero dedicarme como profesional. Por lo que me decidí a optar por este tema de memoria de título.

Y por último me gustaría agradecer tanto a mi prima Almendra Castillo como a Cristian Cerón quienes me dieron el apoyo tanto emocional como mental para no rendirme en terminar la carrera cuando llegué al punto de solo querer botar todo y no saber cómo decírselo a mi madre, ya sea por la falta de motivación y/o interés que le daba al curso en mi segundo y tercer año de carrera, además de que me ofrecieron ayuda para estudiar los temas principales de las materias en las que ellos tenían dominio previo.

Índice

RESUMEN	4
INTRODUCCIÓN.....	5
HIPÓTESIS	7
PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	7
OBJETIVO GENERAL.....	8
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
ALCANCES	9
MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE LITERATURA.....	10
ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN AUTOMATIZADA.....	10
MODOS DE OPERACIÓN DE RED, MAESTRO – ESCLAVO.....	10
PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN	11
<i>Bluetooth</i>	12
<i>Wi-Fi</i>	12
<i>Tecnología-5G</i>	13
<i>LoRaWAN</i>	13
<i>EnOcean</i>	13
<i>NRF24L01</i>	14
<i>ESP-NOW</i>	14
ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN AUTOMATIZADA DE AZIMUT.....	15
EMPRESAS EN EL MERCADO ESPECIALIZADAS EN INSTALACIONES AUTOMATIZADAS	19
MARCO METODOLÓGICO	20
ACTIVIDADES POR DESARROLLAR	20
ESTADO DEL MERCADO ACTUAL SOBRE EMPRESAS INNOVADORAS EN LA AGRICULTURA	21
ESTUDIO DE PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN:	22
SELECCIÓN PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN:.....	24
MODIFICACIÓN DEL MODELO ACTUAL DE AZIMUT	24
CONEXIONES ELÉCTRICAS	28
ALGORITMO PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LA RED DE COMUNICACIÓN	29
PRUEBAS DE CAMPO REALIZADAS	33
RESULTADOS.....	37
CONCLUSIONES	39
ANEXOS	44

Resumen

El Trabajo de Título (TT), se realizó en modalidad de Pasantía Profesional por medio de una oferta realizada por la empresa Azimut, la cual se dedica a la automatización y modernización de invernaderos. El TT tiene por fin estudiar e implementar un protocolo de comunicación inalámbrico, el cual permita la comunicación de sensores de temperatura y humedad relativa con diferentes dispositivos de control (en este caso son llamados CPU). Además de implementar una red de comunicaciones dentro de la estructura de un invernadero agrícola.

Para esto se estudió el estado del arte acerca de los protocolos de comunicaciones existentes en el mercado, como por ejemplo los más comúnmente utilizados, Bluetooth, Wifi, Ethernet, etc. Además de explorar cuales son las ofertas innovadoras tecnológicas, utilizadas en la agricultura, como el uso de sensores de conductividad del agua, detección de cambios en la temperatura, estaciones meteorológicas, etc.

Se determino cuál es el protocolo de comunicación más conveniente para trabajar. Azimut impuso parámetros específicos que se deben cumplir para implementar el protocolo, los cuales son la distancia de alcance, velocidad de transferencia, consumo energético y compatibilidad con lenguaje de programación Arduino.

Una vez seleccionado el protocolo, se diseñó la configuración en la cual debe funcionar la red de comunicaciones y se realizaron numerosas pruebas de rendimiento en diversos entornos controlados, con el fin de detectar posibles contratiempos imprevistos o posibles mejoras para mejorar la eficiencia.

Palabras clave: protocolo de comunicación; CPU; placas de control; red de comunicación; sensor de humedad y temperatura relativa.

Introducción

Normalmente los invernaderos son controlados por los agricultores basándose en sus experiencias y en sus conocimientos. Sin embargo, dichos conocimientos no siempre son precisos o inequívocos, ya sea por factores inesperados o que la misma estructura del invernadero va empeorando a lo largo del tiempo. El instalar sistemas automatizados evita la aparición o minimiza los daños al mantener un entorno ideal para la agricultura. Por ejemplo, se crean microclimas para proteger los cultivos del clima exterior, permitiendo a los agricultores monitorear constantemente el estado actual del invernadero además de poder modificar los parámetros de control ya sea por cambios climáticos espontáneos o por la cultivación de diferentes hortalizas (Huamán Evelia, 2015).

De esta iniciativa nace Azimut, la cual es una empresa dedicada al diseño, implementación y monitoreo de invernaderos con ambientes controlados, utilizando climatización pasiva para reducir el consumo energético. El principal foco de trabajo es el implementar la automatización en invernaderos mediante sistemas de climatización automáticos, el cual está conformado por una CPU o placa de control encargada de controlar todo el sistema de automatización, sensores que miden la humedad y temperatura relativa y dispositivos mecánicos que controlan las cortinas de ventilación, aspersores y la iluminación en horas nocturnas.

Las instalaciones realizadas por Azimut se caracterizan por ser mediante cableado, tanto para el módulo de control de climatización automatizada (CPU), como del sensor de humedad y temperatura relativa (SHT-10) en la entrada del invernadero, dando así un acceso rápido y fácil para interactuar con el CPU, ya sea el cliente, o Azimut.

Ubicar el sistema de climatización automatizada en la entrada del invernadero facilita el acceso a intervenir el CPU o el SHT-10, en caso de presencias de fallas o para la actualización de parámetros, no es la ubicación más recomendable para detectar cambios tanto en las temperaturas como en la humedad, dentro del invernadero. Diversos estudios y documentos de investigación recalcan que las mayores concentraciones de temperatura y humedad se detectan en la parte superior del invernadero, esto debido a la tendencia del calor a subir, por lo que la

temperatura y humedad detecta en la entrada del invernadero no es necesariamente la misma a la temperatura y humedad promedio de toda la estructura.

Para resolver esta problemática Azimut ha cambiado su método de instalación, ubicando el SHT al centro y en la parte superior del invernadero conectado por medio de un cableado más extenso y robusto al CPU instalado en la entrada de la estructura. Sin embargo, esto creo otro problema, ya que el cableado extra representa un gasto adicional, además de que estas instalaciones deben ser estrictamente hechas por un especialista externo, lo cual genera otro gasto adicional para Azimut. Sin mencionar que dichas instalaciones no pueden realizarse en invernaderos con estructuras muy antiguas o que destaquen fallas estructurales importantes, debido a motivos de seguridad y de ética laboral.

La necesidad de implementar una red de comunicación inalámbrica tiene como objetivo ahorrar en materia prima, personal extra y la pérdida de clientes con invernaderos más antiguos. Este sistema es menos robusto, al perder una conexión física (cable) en comparación al sistema cableado, pero representa un ahorro tanto monetario, como de requerir un menor tiempo de instalación, sin dejar de lado la eficiencia en la transmisión de datos.

En cuanto a los protocolos de comunicación, Azimut impuso, que el protocolo de comunicación necesario para la implementación en la red de comunicaciones debe contar con un sistema de seguridad para impedir interferencias, contar con un bajo consumo de energía y que sea compatible con el hardware actual que ya es utilizado por Azimut, como el CPU, sensores, transmisores, receptores y lenguaje de programación actual.

Utilizando como base la arquitectura de trabajo que utiliza internet, es decir, la transmisión de paquetes y el utilizar diversos protocolos para permitir la comunicación Se diseño una red de comunicación inalámbrica en la cual se envía la información recopilada por los diversos sensores ubicados dentro del invernadero hacia el CPU que se encuentra en la entrada de este (Tom Parker, 2024).

Hipótesis

Para la construcción de la presente memoria han sido consideradas las siguientes hipótesis:

- Existe un protocolo capaz de transmitir información de manera confiable y rápida, el que no dependa de una conexión a internet y robusto frente a las interferencias que pudieren existir en el entorno
- Es posible diseñar e implementar una pequeña red de comunicaciones en modo isla para el control de parámetros dentro de un invernadero.

Preguntas de investigación

¿Cuál es el protocolo de comunicación más adecuado, según las necesidades de Azimut, para la implementación de comunicaciones inalámbricas?

¿Cuál es la configuración óptima para implementar una red de sensores dentro de un invernadero?

Objetivo general

Implementar una red de comunicaciones robusta, para la transmisión de datos dentro de un invernadero de forma inalámbrica.

Objetivos específicos

- Estudiar el estado del arte, acerca de climatizaciones automatizadas, disponibles en el mercado o proyectos actuales sobre invernaderos inteligentes.
- Realizar un análisis de factibilidad técnico-económica de protocolos de comunicación.
- Seleccionar un protocolo que cumpla con todos los requisitos y necesidades de Azimut de entre todos los disponibles en el mercado.
- Implementar y validar el protocolo en un espacio de trabajo real.

Alcances

Se han tenido en cuenta las siguientes variables para llevar a cabo esta investigación:

- Aunque el estudio termina el 07/12, por parte de Azimut se seguirá trabajando en el hasta poder utilizarlo de manera comercial.
- Las pruebas han sido realizadas en un espacio real, con la presencia de dispositivos que causen posibles interferencias, además de que las estructuras son de metal, plástico y madera.
- Se necesita un suministro energético por cable mientras se realizan las pruebas de conexión entre los transceptores utilizando el protocolo de comunicación.

Marco teórico y revisión de literatura

En este apartado se realiza una revisión bibliográfica acerca de los principales puntos que aportan para el desarrollo del TT. Se dividió la información en 5 puntos diferentes dependiendo de que aporta cada investigación. Se presentan la arquitectura del sistema de climatización automatizada, empresas en el mercado especializadas en las instalaciones automatizadas, configuración maestro – esclavo en redes de comunicación, protocolos de comunicación en el mercado y componentes utilizados por Azimut.

Arquitectura del sistema de climatización automatizada

Un sistema automatizado es un conjunto de dispositivos físicos y virtuales (Hardware y Software), capaces de realizar tareas específicas sin la necesidad de ser directamente intervenidos de forma humana. Tiene una amplia gama de utilidades, desde telecomunicaciones, sistemas de pago automatizados por finanzas hasta sistemas de riego en la agricultura. Existen múltiples modelos de arquitecturas dependiendo de la finalidad de cada sistema automatizado, pero en general la base es la misma:

- Hardware (sensores, actuadores, controladores lógicos programables).
- Software (programas informáticos para control y procesamiento de datos).
- Comunicación (protocolos de transferencia de datos).

Actualmente existe una gran variedad de distribuidores para estos productos, los cuales se diferencian entre si al ofrecer mejores especificaciones o mejores precios (Esteban Pérez López, 2014).

Modos de operación de red, Maestro – Esclavo

El Termino Maestro – Esclavo [1], es utilizado en la informática para la regulación y coordinación de los sistemas para el intercambio de información, la organización de recursos dentro de una red de ordenadores, para la creación de una red de área personal entre terminales vía bluetooth y para el control de acceso a un sistema que trabaje como anfitrión. Una ventaja destacada es que el Maestro controla todas las vías de acceso, además de evitar el intercambio de información no autorizada, el maestro siempre tiene el control y la comunicación siempre se

[1] El término “maestro/esclavo” es muy polémico por la referencia a la esclavitud, por lo que cada vez se utilizan más términos alternativos. Las alternativas a “maestro/esclavo” suelen ser “primario/secundario” o incluso “primario/réplica”.

dirige desde el maestro al esclavo. El esclavo no tiene poder alguno y siempre está a la espera de órdenes del maestro (Rafael Aracil; Jordi Barrio; Manuel Ferre; Juan Manuel Bogado, 2004).

Dentro de la configuración Maestro/Esclavo, existen 3 variaciones en la configuración la cual si bien siguen el mismo funcionamiento estándar se implementan en diferentes aplicaciones, a continuación, se describen:

Configuración Maestro – Esclavo: Es la configuración más común, la cual permite conectar un dispositivo que funciona como maestro (el transmisor), con otro que hará de esclavo (el receptor), fácil de implementar y configurar. Normalmente utilizado para recibir las lecturas de un sensor (Rafael Aracil; Jordi Barrio; Manuel Ferre; Juan Manuel Bogado, 2004).

Configuración Maestro y múltiples Esclavos: Similar a la configuración anterior, pero con la diferencia de que, en lugar de tener un solo esclavo, el dispositivo que ejerce como maestro envía sus datos a múltiples receptores al mismo tiempo. Un uso común para esta configuración son las casas inteligentes, donde todo se controla por medio de un solo dispositivo central (Rafael Aracil; Jordi Barrio; Manuel Ferre; Juan Manuel Bogado, 2004).

Configuración múltiples Maestros y un Esclavo: Se define a un dispositivo como esclavo, la cual se configura para recibir datos de múltiples dispositivos maestros al mismo tiempo, comúnmente se utiliza para la comunicación de múltiples sensores con un solo receptor, esto permite una interacción múltiple desde un mismo dispositivo central (Rafael Aracil; Jordi Barrio; Manuel Ferre; Juan Manuel Bogado, 2004).

Protocolos de comunicación

Para este proyecto se estudiaron más de 30 protocolos diferentes (contando distintas versiones), los cuales contaban tanto con capacidad de conexión inalámbrica, como de proveedores en Chile, por lo que los hacen factibles para selección. A continuación, se muestra una tabla con los más relevantes y mayor potencial para implementación:

Tabla 1: Protocolos de comunicación estudiados

Bluetooth 1.0	Wi-Fi 3 (802.11g)	Z-Wave Plus	LoRaWAN
Bluetooth 2.0	Wi-Fi 4 (802.11n)	Z-Wave Long Range	Sigfox
Bluetooth 3.0	Wi-Fi 5 (802.11ac)	NFC Forum Type 1	NB-IoT
Bluetooth 4.0	Wi-Fi 6 (802.11ax)	NFC Forum Type 2	IrDA

Bluetooth 5.0	Zigbee 2004	NFC Forum Type 3	WirelessHART
Bluetooth 5.1	Zigbee 2006	NFC Forum Type 4	Thread
Bluetooth 5.2	Zigbee 2007	RFID LF (Low Frequency)	EnOcean
Bluetooth 5.3	Zigbee 2012	RFID HF (High Frequency)	ANT
Wi-Fi 1 (802.11a)	Zigbee 3.0	RFID UHF (U.H Frequency)	NRF24L01
Wi-Fi 2 (802.11b)	Z-Wave 1.0	5G NR	ESP-NOW

A continuación, se destacan los protocolos más comunes e importantes mencionados en la Tabla 1, donde se señala una breve descripción y características más relevantes:

Bluetooth

Todas las versiones de Bluetooth hacen posible transmitir datos ya sean caracteres como sonidos como audios o notas de voz, entre numerosos equipos, gracias a un enlace de radiofrecuencia en distancias cortas. La finalidad principal del protocolo es la eliminación de la mayoría de los cables, conectores, adaptadores, etc. Por otro lado, se facilita tanto la interacción y sincronización de equipos tanto fijos como equipos móviles como celulares o relojes inteligentes, sin la necesidad de que los equipos estén en contacto. En condiciones ideales, este protocolo tiene un alcance de 100 mt, una velocidad de transferencia de entre 1 Mbps a 50 Mbps, con frecuencias de 2.4 GHz (Franco Castillo, 2009).

Wi-Fi

Es un protocolo inalámbrico, que permite la transmisión y recepción de datos entre dispositivos tecnológicos por medio de ondas de radio, su funcionamiento radica en la conexión de dispositivos a través de un enrutador sin la necesidad de cables físicos y tampoco de la necesidad de internet. Este método cuenta con la característica de ser llamado un “revolucionario”, es decir gracias a él se revoluciono la conectividad de múltiples dispositivos, al existir la posibilidad de conectarse a la vez, sin la limitación de conexiones cableadas. En condiciones ideales, este protocolo tiene un alcance de 40 mt, tiene una velocidad de transferencia entre: 54 Mbps; 600 Mbps; 1 Gbps, con frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz (Cristopher Stalin Caiza Páez; Román Alcides Lara Cueva, 2019).

Tecnología-5G

Comúnmente llamado 4G LTE, es la quinta generación de tecnología de telecomunicaciones móvil, representa una enorme evolución en las redes de comunicación que actualmente se utilizan. Promete una enorme mejora en cuanto a la velocidad, capacidad y latencia si se compara con sus predecesores, capaz de manejar una mayor cantidad de dispositivos conectados de manera simultánea, incentivar el desarrollo de nuevas aplicaciones y servicios que no puedan ser desarrollados con la versión actual del 4G, ya que se necesita de conectividad ultrarrápida y baja latencia . En condiciones ideales, este protocolo tiene un alcance de mínimo 1 km, con velocidades de transferencia (variando entre): 54 Mbps; 600 Mbps; 1 Gbps, cuenta con frecuencias de 6 GHz. (Jackson Oscar, 2016).

LoRaWAN

Red de Área Amplia de Largo Alcance (por sus siglas en inglés). Es un protocolo de comunicación, diseñado específicamente para la conexión de dispositivos IoT de forma inalámbrica a distancias considerables, utiliza un sistema de modulación de espectro ensanchado para la transmisión de datos. Entre sus aplicaciones más conocidas se encuentra el monitoreo y seguimiento remoto, gestión de activos, agricultura inteligente, ciudades inteligentes, gestión de residuos, entre otros. Como se puede apreciar, este protocolo es más utilizado, donde la conectividad a larga distancia y el bajo consumo de energía son fundamentales . En condiciones ideales, este protocolo tiene un alcance de mínimo 3 km, una velocidad de transferencia (varia de entre): 54 Mbps; 600 Mbps; 1 Gbps y frecuencia de 6 GHz. (Ignacio Ordóñez, 2017).

EnOcean

Esta es una tecnología de conexión inalámbrica, la cual actualmente no cuenta con estándar internacional. Trabaja por medio de la configuración "Learning", cada dispositivo que utilice EnOcean, puede recibir información de múltiples dispositivos que sean productores de información, ya que el protocolo se va adaptando, dependiendo de la información recibida, dicho dispositivo también es capaz de solo procesar datos de un subconjunto del conjunto o red original. Desgraciadamente cuenta con la desventaja de que la información no va dirigida a ningún dispositivo en específico, si no que cada dispositivo debe decidir entre ignorar o no la

información entrante constantemente. Además de esto, si bien el protocolo está abierto públicamente para la interacción, es necesario de la aprobación y ser parte de la alianza que conforma EnOcean . En condiciones ideales, este protocolo tiene un alcance de 300 mt a 800 mt, una velocidad de transferencia de 25 kbps y frecuencia de 868 MHz (Luis Gustavo Nima Castillo, 2019).

NRF24L01

Este protocolo para ser exactos es un pequeño transceptor que funciona de manera inalámbrica a muy poco consumo de energía, idealmente se recomienda tener dos transceptores para facilitar el envío y recibimiento de datos, además de esto gracias a su bajo consumo de energía este trabaja a 5V, por lo que conectarlo a una placa Arduino es extremadamente sencillo. Sin embargo, cuenta con 2 desventajas principales, una es que es necesario el transceptor de manera adicional a la placa que se utilice como controlador u como CPU del sensor, lo cual implica un gasto adicional, la segunda es que no puede trabajar como emisor y receptor. El alcance se ve afectado con la presencia de paredes . En condiciones ideales, este protocolo tiene un alcance de 10 mt a 20 mt, una velocidad de transferencia de 250 kbps y frecuencia ISM de 2.4 GHz (Tamara Gagliardi, 2019).

ESP-NOW

Protocolo creado por Espressif, la misma empresa que desarrolla la placa ESP-32. Este protocolo se utiliza para la configuración de dispositivos que requieran baja energía. Otra ventaja es que, una vez realizado el emparejamiento, los dispositivos se reconectan de manera automática sin la necesidad de intervención externa. El procedimiento de comunicación permite el intercambio de paquetes pequeños (hasta 250 bytes), además de que es muy versátil. Es popular en aplicaciones de IoT y domótica donde se requiere la comunicación directa y eficiente entre dispositivos ESP8266 y ESP32, como por ejemplo en sistemas de control de iluminación, sensores distribuidos y sistemas de monitoreo remoto.

Cabe mencionar que tanto el emisor como el receptor deben ser dispositivos ESP8266 o ESP32 para que ESP-NOW funcione correctamente. Sin embargo, tiene sus defectos, por un lado, el número de conexiones se limita a 10 si está en modo de estación, pero si se utiliza como punto

de acceso o modo mixto (transmisor y receptor a la vez), el número de clientes baja a 6. El alcance se reduce considerablemente si la placa es de modelo básico (transceptor más pequeño e interno), en vez de la placa avanzada (el chip es más grande ya que una sección es el transceptor). En condiciones ideales, este protocolo tiene un alcance de 10 mt a 30 mt, una velocidad de transferencia de 100kbps a 250 kbps y frecuencia ISM de 2.4 GHZ (Daniel Carrasco, 2021).

Arquitectura del sistema de climatización automatizada de Azimut

El sistema de climatización automático fabricado por Azimut se adapta dependiendo de los requerimientos ambientales de cada cultivo, por esto los mecanismos de climatización varían dependiendo de lo que se necesita para la correcta cultivación con la mejor relación beneficio/costo. Estos equipos acompañados del sistema de climatización automático fabricado por Azimut brindan el mejor rendimiento necesario para el desarrollo del cultivo (Azimut, 2020).

Al no ser un sistema complejo, la arquitectura de Azimut se compone de 3 partes:

- Un microcontrolador climático (compuesto de la Placa de control, un regulador de voltaje, placa PCB (Placa de Circuito Impreso) para el montaje).
- Múltiples Relés (aparato eléctrico que funciona como un interruptor, abriendo y cerrando el paso de la corriente eléctrica, pero accionado eléctricamente).
- Protocolo de comunicación (se utiliza el protocolo I2C).

Para expresar de manera más clara, se confecciono un esquema, donde se calca la arquitectura interna, con la cual operan los sistemas automatizados de climatización, diseñado por Azimut.

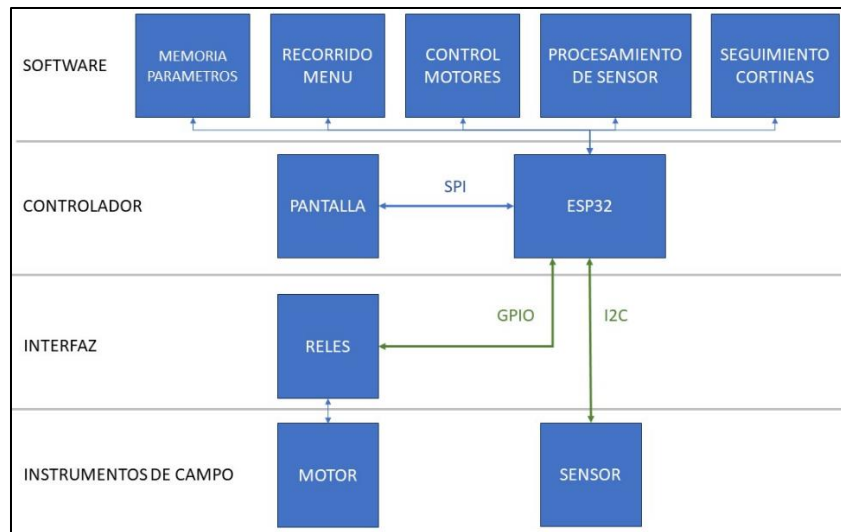


Ilustración 1: Arquitectura de trabajo de Azimut

A continuación, se definen y caracterizan los componentes utilizados en la arquitectura de Azimut, los cuales serán mencionados a lo largo de todo el documento.

CPU o Placa de control (Ilustración 2, Imagen [1]): Es el cerebro del sistema de climatización automático, encargado de recibir, procesar, almacenar y efectuar los comandos para activar los sistemas de ventilación y riego dentro del invernadero. En este caso se utiliza la placa ESP-32. Este es un microcontrolador de bajo costo y bajo consumo de energía desarrollado por Espressif Systems.

Es ampliamente utilizado en proyectos de IoT y aplicaciones embebidas debido a sus capacidades de conectividad Wi-Fi y Bluetooth, así como su potencia de procesamiento. Además de ser compatible con sistema Arduino, cuenta con un módulo interno de Wi-Fi y Bluetooth, lo que facilita la conexión a redes inalámbricas y la comunicación con otros dispositivos, viene con más memoria Flash y RAM, lo que proporciona más espacio para almacenar programas y datos. Y, por último, aun con sus ventajas ante la competencia su costo es relativamente menor, lo que lo hace ideal para estas aplicaciones (Jacob Beningo, 2020).

Sensor de humedad y temperatura (Ilustración 2, Imagen [2]): Son los dispositivos que miden las concentraciones de temperatura y humedad relativa dentro del invernadero y a los cuales se les desea comunicar de forma inalámbrica con el CPU. En específico se hace uso del sensor (SHT-10).

Este es un sensor de temperatura y humedad de alta precisión y bajo consumo de energía. Está diseñado para medir tanto la temperatura como la humedad en aplicaciones como sistemas de control ambiental, dispositivos IoT, monitoreo del clima y más (Pablo Mariño Boga, 2022).

Estudios expresan sus principales características; este sensor tiene una precisión de temperatura a partir de 0.01°C y humedad desde 0.024%RH, con un rango de medición en la temperatura de (-40°C a 85°C) y un rango para la humedad que va desde (0% a 100% RH). Por otra parte, su consumo de energía es muy eficiente, además de que estructuralmente es bastante compacto y fácil de incorporar a cualquier circuito (Pilatasig Chicaiza, Henry Fabricio Yugsi Caiza, Luis Rene, 2022).

Actuadores del sistema: Son todos los sistemas ya sea eléctricos o mecánicos como motores monofásicos, aspersores, luces y en algunos casos ventiladores para la circulación del aire. Azimut ofrece equipos específicos para instalar junto al sistema de climatización.

- **Ventilaciones motorizadas (Ilustración 2, Imagen [3]):** Los motorreductores permiten la apertura y cierre automatizado de ventilaciones enrollables en invernaderos, siendo una de las principales herramientas pasivas de control climático. Su accionamiento puede ser manual o automatizado según las condiciones de temperatura y humedad ideales que se requiera mantener, por esto en funcionamiento conjunto con nuestro controlador climático Azimut, presentan una alternativa perfecta para un control climático eficiente en invernaderos (Azimut, 2020).
- **Nebulizadores (Ilustración 2, Imagen [4]):** Los nebulizadores de bajo caudal permiten humidificar y bajar la temperatura en invernaderos, ofreciendo una solución perfectamente uniforme y sin goteo, incluso a presiones relativamente bajas. Es un sistema eficaz y económico para controlar los excesos de temperatura en invernaderos, permitiendo reducir hasta 10°C en reducidos lapsos de tiempo. Se complementa perfectamente con nuestro controlador climático avanzado Azimut, ya que se automatiza su uso con alta frecuencia en pulsos cortos (Azimut, 2020).
- **Recirculador de aire (Ilustración 2, Imagen [5]):** Los recirculadores de aire pueden hacer circular el aire de manera efectiva a largas distancias, formando rápidamente un ambiente

interior uniforme y equilibrado en el invernadero. Cuenta con una estructura inoxidable y de peso ligero, y su funcionamiento en conjunto con nuestro controlador climático Azimut permite reducir la temperatura y homogeneizar el aire al interior del invernadero (Azimut, 2020).

- **Pantallas climáticas (Ilustración 2, Imagen [6]):** La pantalla climática es una excelente opción para el control de radiación y temperatura en invernaderos. Cumple una doble función, por un lado, reflejar el exceso de radiación en períodos y altas temperaturas durante el día, y por la noche refleja la radiación de las plantas hacia el interior mejorando la acumulación de calor. Su uso puede ser interno o externo en invernaderos, y en conjunto con nuestro controlador climático Azimut permite regular eficazmente la radiación y temperatura en invernaderos (Azimut, 2020).
- **Extractor de aire lateral (Ilustración 2, Imagen [7]):** El extractor de aire lateral está específicamente diseñado para una alta capacidad de flujo de aire, y se instala generalmente en las paredes frontales y/o laterales de los invernaderos. Su uso está orientado a aumentar la circulación de aire en invernaderos de mayor envergadura, permitiendo una alta tasa de ventilación (Azimut, 2020).
- **Extractor de aire cenital (Ilustración 2, Imagen [8]):** Los extractores de aire cenitales se instalan en la parte superior de los invernaderos, y son una solución eficaz para deshumidificar, ventilar y reducir la temperatura en invernaderos, ya que extraen el aire caliente y húmedo que se concentra en el espacio superior. Su alta capacidad de extracción de aire, bajo consumo energético y reducido nivel de ruido, lo hacen una perfecta alternativa para invernaderos de cualquier tamaño (Azimut, 2020).
- **Protocolo de comunicación por cable I2C (Ilustración 2, Imagen [9]):** Este protocolo es ideal según lo explicado por Azimut. Dicho protocolo permite una conexión múltiple entre dispositivos, utilizando un único bus (sistema digital que facilita la transferencia de datos), por lo que es ideal para el trabajo entre sensor y actuador (Azimut, 2020).

Durante el TT no se interactúa en ningún nivel con este protocolo de comunicación, pero sirve como idea base para poder seleccionar e implementar un protocolo de comunicación inalámbrico.

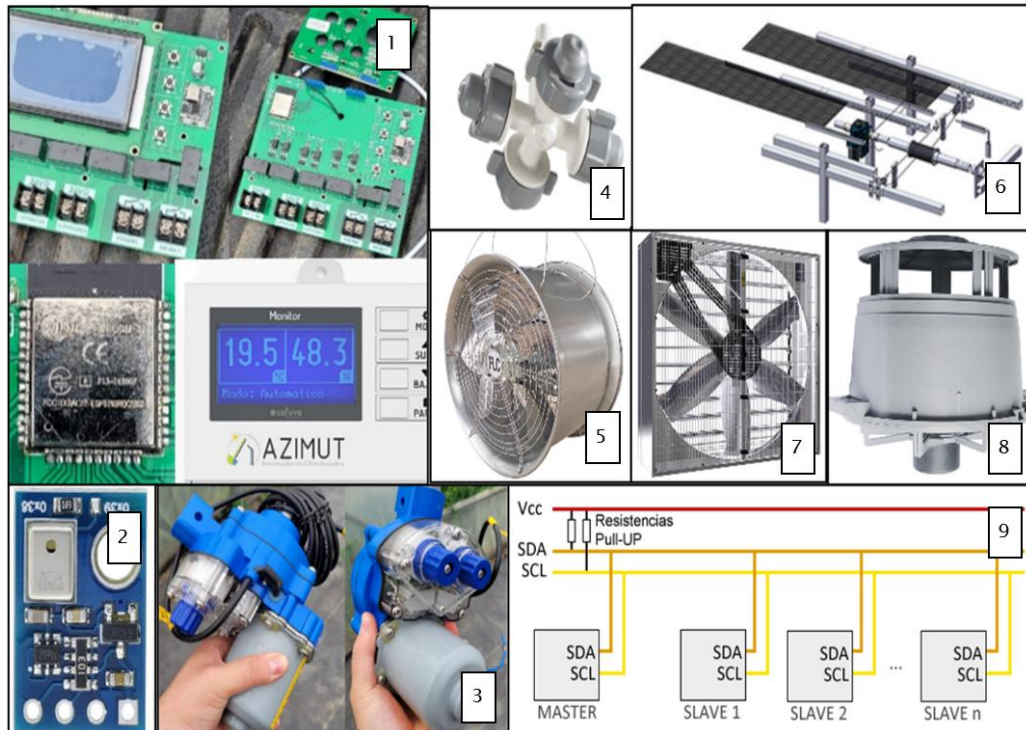


Ilustración 2: Componentes de la arquitectura del sistema de climatización automatizada de Azimut

Empresas en el mercado especializadas en instalaciones automatizadas

Se realizó una investigación acerca de empresas a nivel mundial que se enfocan en implementaciones de sistemas automatizados, comunicaciones inalámbricas y manejo de datos enfocados en la agricultura, algunos ejemplos de estas son:

- **RUFEP:** destaca su papel como testigo de la transformación hacia modelos de alta tecnología en la industria.
- **Davis Instruments:** empresa líder en la fabricación y venta de equipos electrónicos para el monitoreo meteorológico y ambiental.
- **TACLLA:** especializados en tecnologías de comunicación inalámbrica tanto actuales como en mejorarlas y hacerlas más eficientes.

Marco metodológico

Para el TT, se definieron diversas actividades que deben realizarse para poder implementar tanto un protocolo de comunicación inalámbrica, como para desarrollar una red de sensores inalámbricos independientes dentro de un espacio definido.

Actividades por desarrollar

- Investigar opciones de invernaderos o instalaciones inteligentes en el mercado.
- Investigar protocolos de comunicación disponibles en el mercado disponibles en el país.
- Diseñar y proponer un modo de comunicación inalámbrica incorporada al modelo actual de Azimut, mostrada en la “Ilustración 1”.
- Diseñar uno o varios esquemas de posibles instalaciones dependiendo de las dimensiones proporcionadas por Azimut (este dato es muy importante para la selección final del protocolo).
- Definición de parámetros: distancia de transmisión, consumo de energía, tasa de transferencia y compatibilidad con hardware actual.
- Crear una tabla comparativa.
- Descartar protocolos que no cumplan los requisitos.
- Comparar los protocolos restantes después del filtrado.
- Realizar pruebas de campo y analizar la efectividad del protocolo seleccionado.
- Investigar proyectos o investigaciones de redes de sensores.
- Comparar esta información con las opciones que ofrece el protocolo actual y decidir una configuración.
- Definir un espacio para montar y probar la microrred de sensores.
- Realizar pruebas de campo y registrar, la efectividad de la red.

Basados en esto se propone la siguiente carta Gantt, donde se definen que semanas serán definidas a partir de las tareas antes mencionadas:

Tabla 2: Carta Gantt del proyecto

Proyecto		Semanas de trabajo														
Etapas del proyecto	Tarea a Realizar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Investigacion del mercado actual	Investigar opciones de invernaderos o instalaciones inteligentes en el mercado.															
	Investigar protocolos de comunicación disponibles en el mercado disponibles en el país.															
	Realizar un estudio de optimización para el modo de trabajo anterior de Azimut.															
Requisitos que se deben cumplir definidos por Azimut	Diseñar uno o varios esquemas de posibles instalaciones dependiendo de las dimensiones proporcionadas por Azimut (este dato es muy importante para la selección final del protocolo)															
	Definición de parámetros: distancia de transmisión, consumo de energía, tasa de transferencia y compatibilidad con hardware actual															
	Crear una tabla comparativa															
	Compatibilidad	Descartar protocolos que no cumplan los requisitos														
Selección final	Comparar los protocolos restantes después del filtrado															
	Realizar pruebas de campo y analizar la efectividad del protocolo seleccionado.															
Creación de una red de sensores	Investigar proyectos o investigaciones de redes de sensores.															
	Comparar esta información con las opciones que ofrece el protocolo actual y decidir una configuración															
Montar y realizar pruebas con la red de sensores	Definir un espacio para montar y probar la microrred de sensores.															
	Realizar pruebas de campo y probar durante un periodo de tiempo la efectividad de la red.															

Estado del mercado actual sobre empresas innovadoras en la agricultura

Para este proyecto se investigaron, todas las opciones comerciales de invernaderos inteligentes. En el mercado existen muchas empresas que ofrecen o la instalación de un invernadero completo, la integración de un sistema automatizado que se regule dependiendo de los factores del invernadero del cliente o bien ofrecen un sistema que sea capaz de reunir datos y enviarlos a un dispositivo externo y que no necesariamente se encuentre en el terreno, entre estas se pueden destacar, entre las más destacadas se encuentran:

- TACLLA
- Davis Instruments
- RUFEP

Revisando las páginas y registros de estas empresas (antes definidas en el marco teórico; pág. 20 y descritas de manera más específica en el Anexo 2), se llegó a la conclusión, que no se ha desarrollado la implementación de sensores inalámbricos, que controlen la totalidad de parámetros dentro de un invernadero.

Lo que se ha desarrollado a gran escala, es la comunicación inalámbrica en la forma de instalaciones meteorológicas que envían sus registros constantemente o con la implementación de drones que monitorean campos de agricultura y envían sus registros a una terminal remota, por lo cual un sistema de automatización climático es realmente viable y tendrá un gran impacto en la forma de gestionar un invernadero.

Una vez teniendo claro cómo funcionan los sistemas de monitoreo inalámbrico ya implementados en la agricultura, se realizó un estudio acerca de los protocolos usados tanto por las empresas antes mencionadas, productos comerciales y demás desarrollados a lo largo del tiempo.

Estudio de protocolos de comunicación:

En el mercado existen una extensa, por no decir infinita gama de protocolos de comunicación (más importantes mencionados en el marco teórico; pág. 13), por parte de Azimut se estipuló, que, para seleccionar el protocolo ideal, se debía cumplir que:

- Debe tener distribución rápida en Chile.
- Compatibilidad con el Hardware actual que utiliza Azimut.
- Un alcance de mínimo 10 metros y máximo 1 km.
- Velocidad de transmisión de máximo 300 kbps.
- Consumo mínimo de energía (para adaptar una batería recargable a futuro).

Tabla 3: Parámetros de selección con los que se definió al mejor candidato para seleccionar

ALCANCE	CONSUMO	VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA	COMPATIBLE CON ARDUINO
10 mt - 1km	BAJO	< 300 kbps	SI

Siguiendo estos parámetros se creó una tabla destacando cada característica solicitada por Azimut. La tabla resultante se expresa a continuación en la “Tabla 4” adjunta.

Tabla 4: Lista de protocolos estudiados destacando sus parámetros

PROTOCOLO (separado en versiones)	ALCANCE	CONSUMO	VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA	COMPATIBLE CON ARDUINO
Bluetooth 1.0	100 metros.	BAJO	1000 kbps	SI
Bluetooth 2.0	100 metros.	BAJO	3000 kbps	SI
Bluetooth 3.0	100 metros.	BAJO	24000 kbps	SI
Bluetooth 4.0	100 metros.	BAJO	24000 kbps	SI
Bluetooth 5.0	240 metros.	BAJO	50000 kbps	SI
Bluetooth 5.1	240 metros.	BAJO	50000 kbps	SI
Bluetooth 5.2	240 metros.	BAJO	50000 kbps	SI
Bluetooth 5.3	240 metros.	BAJO	50000 kbps	SI
Wi-Fi 1 (802.11a)	35 metros	MODERADO	54000 kbps	SI
Wi-Fi 2 (802.11b)	35 metros	BAJO	11000 kbps	SI
Wi-Fi 3 (802.11g)	38 metros	MODERADO	54000 kbps	SI
Wi-Fi 4 (802.11n)	70 metros	MODERADO	600000 kbps	SI
Wi-Fi 5 (802.11ac)	35 metros	MODERADO	7000000 kbps	SI
Wi-Fi 6 (802.11ax)	38 metros	MODERADO	10000000 kbps	SI
Zigbee 2004	100 metros.	BAJO	250 kbps	NO
Zigbee 2006	100 metros.	BAJO	250 kbps	NO
Zigbee 2007	100 metros.	BAJO	250 kbps	NO
Zigbee 2012	100 metros.	BAJO	250 kbps	NO
Zigbee 3.0	100 metros.	BAJO	250 kbps	NO
Z-Wave 1.0	30 metros.	BAJO	9.6 kbps	NO
Z-Wave Plus	40 metros.	BAJO	100 kbps	NO
Z-Wave Long Range	200 metros.	BAJO	100 kbps	NO
NFC Forum Type 1	0.1 metros	BAJO	106 kbps	SI
NFC Forum Type 2	0.1 metros	BAJO	106 kbps	SI
NFC Forum Type 3	0.1 metros	MODERADO	424 kbps	SI
NFC Forum Type 4	0.1 metros	MODERADO	424 kbps	SI
RFID LF (Low Frequency)	10 metros	MODERADO	125 kbps	SI
RFID HF (High Frequency)	1 metro	MODERADO	424 kbps	SI
RFID UHF (Ultra High Frequency)	10 metros	BAJO	10000 kbps	SI
5G NR	kilometros	MODERADO	10000 kbps	NO
LoRaWAN	kilometros	MODERADO	50 kbps	NO
Sigfox	kilometros	BAJO	1 kbps	NO
NB-IoT	kilometros	BAJO	250 kbps	NO
IrDA	1 kilometro	BAJO	4000 kbps	SI
WirelessHART	kilometros	ALTO	250 kbps	NO
Thread	1 kilometro	MODERADO	250 kbps	NO
EnOcean	800 metros	BAJO	25 kbps	SI
ANT	30 metros.	BAJO	8 kbps	SI
NRF24L01	20 metros	BAJO	250 kbps	SI
ESP-NOW	20 metros.	BAJO	100 kbps	SI

Siguiendo los parámetros definidos anteriormente por Azimut se confecciono la “Tabla 3” adjunta, la que se utilizó para realizar la selección en la “Tabla 4”. Para poder determinar cuál es el protocolo que más se adapta a las necesidades de Azimut. A continuación, se muestra la “Tabla 5”, la cual expresa el resultado al hacer la selección antes mencionada, lo cual tuvo por consecuencia el descarte de la mayoría de los protocolos considerados para el proyecto.

Tabla 3: Resultado de la comparación

EnOcean	800 metros	BAJO	25 kbps	SI	SI
ANT	30 metros.	BAJO	8 kbps	SI	NO
NRF24L01	20 metros	BAJO	250 kbps	SI	SI
ESP-NOW	20 metros.	BAJO	100 kbps	SI	SI

De la selección anterior, 3 de los protocolos de comunicación, resultaron ser los más convenientes para poder implementar un sistema automatizado de climatización inalámbrico. Estos son: EnOcean, NRF24L01 y ESP-NOW (mencionados y definidos en el marco teórico; págs. 14–15).

Selección protocolo de comunicación:

De los 3 protocolos que resultaron atractivos para la implementación, ESP-NOW se destacó como el más atractivo, tanto para realizar la conexión inalámbrica, como para implementar una red de sensores, por 3 razones:

- 1– Fue diseñado por **Espressif**, los mismos **desarrolladores del ESP-32**.
- 2– Los CPU utilizados por Azimut, al contener el procesador de una placa ESP-32, este ya cuenta con el transmisor compatible con ESP-NOW de manera nativa.
- 3– Los procesadores ESP-32, cuenta con la particularidad de que es un **transceptor**, es decir, pueden trabajar en modo Maestro – Esclavo (explicado en el marco teórico; pág.12) de forma bidireccional, de manera que cada dispositivo cambia entre modo Maestro a Esclavo dependiendo de en qué dirección se transmite la información.

Ya teniendo el protocolo seleccionado, se propuso una actualización a la arquitectura de trabajo de Azimut. Para esto se decidió intervenir el punto de conexión entre el SHT y el CPU, de manera de poder actualizar el sistema, a un modo de comunicación inalámbrico.

Modificación del modelo actual de Azimut

Como se mencionó en el punto anterior, se realizó un estudio de optimización, para convertir la estructura del sistema de automatización utilizando un **protocolo de comunicación cableado**, “Ilustración 1”, a una nueva estructura utilizando un **protocolo de comunicación inalámbrico**. Se definió la siguiente estructura para la automatización de manera inalámbrica.

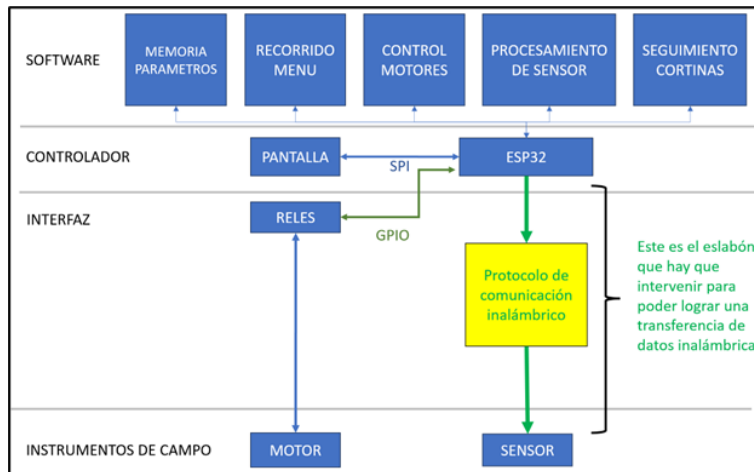


Ilustración 3: Estructura para una comunicación inalámbrica

Para una comparación más clara, el eslabón de la arquitectura que se desea intervenir es el de la comunicación entre la placa ESP-32 al sensor, cambiando de un cableado usando el protocolo de comunicación I2C a un nuevo protocolo de comunicación inalámbrico.

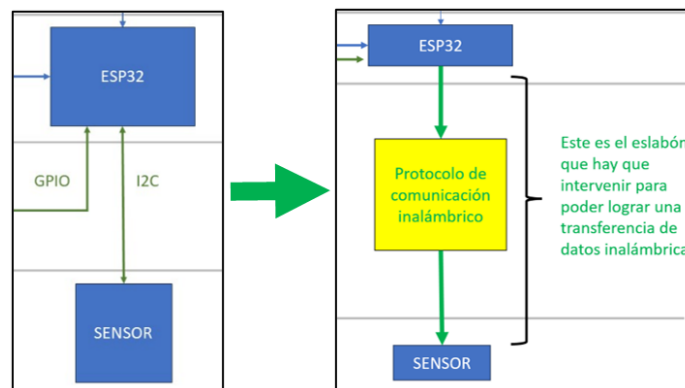


Ilustración 4: Comparación de la estructura en la "Ilustración 1" con la "Ilustración 3"

Con este último punto se facilitó e incentivo la implementación de una red de comunicaciones utilizando el protocolo ESP-NOW junto con el procesador ESP-32, incorporado en la placa del CPU. A continuación, se diseñó un esquema para la instalación de la futura red de comunicaciones dentro de un invernadero. Este esquema es adaptable a cualquier dimensión de invernadero en el que trabaje Azimut.

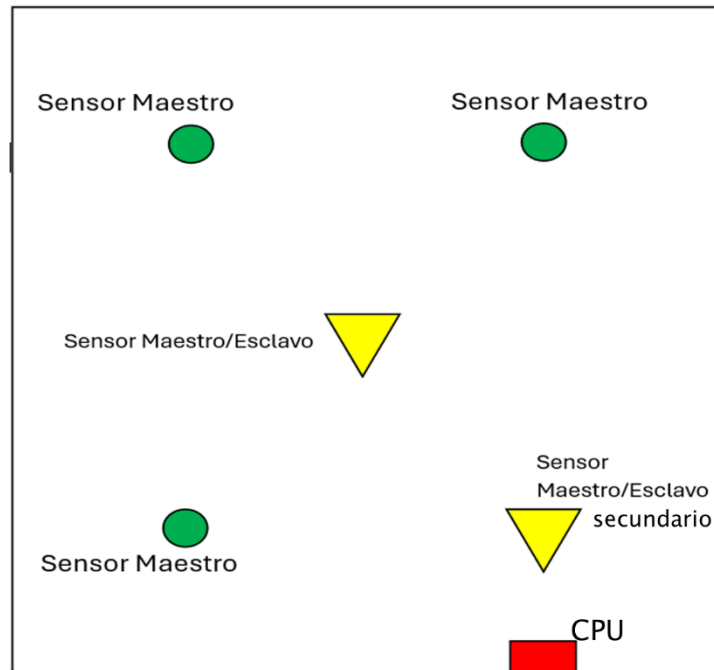


Ilustración 5: instalación de la red de sensores.

Como se puede apreciar hay un total de 3 sensores Maestro (SM), 2 sensores Maestro/Esclavo (SME) y la CPU configurada como Esclavo (CE).

La razón para tener SME es para evitar la interferencia y mejorar el flujo de comunicación, entre los SM, con el CE. Por ende, se decidió usar al SME central para almacenar tanto los datos recopilados por los SM, como por el mismo SME, para poder enviarlos en un único paquete de datos hacia el CE.

Por petición de Azimut se pidió realizar los cálculos para la distancia entre los sensores instalados para conformar la red de comunicaciones, en una superficie de 2400 metros cuadrados. Debido a que esta es la dimensión más común, con la que trabaja Azimut.

Cabe recalcar, que todos los SM y el SME secundario dentro del esquema, se encuentran a la misma distancia del SME central, se calculó la distancia entre solo 2 puntos, como se muestra a continuación en la “Ilustración 6”.

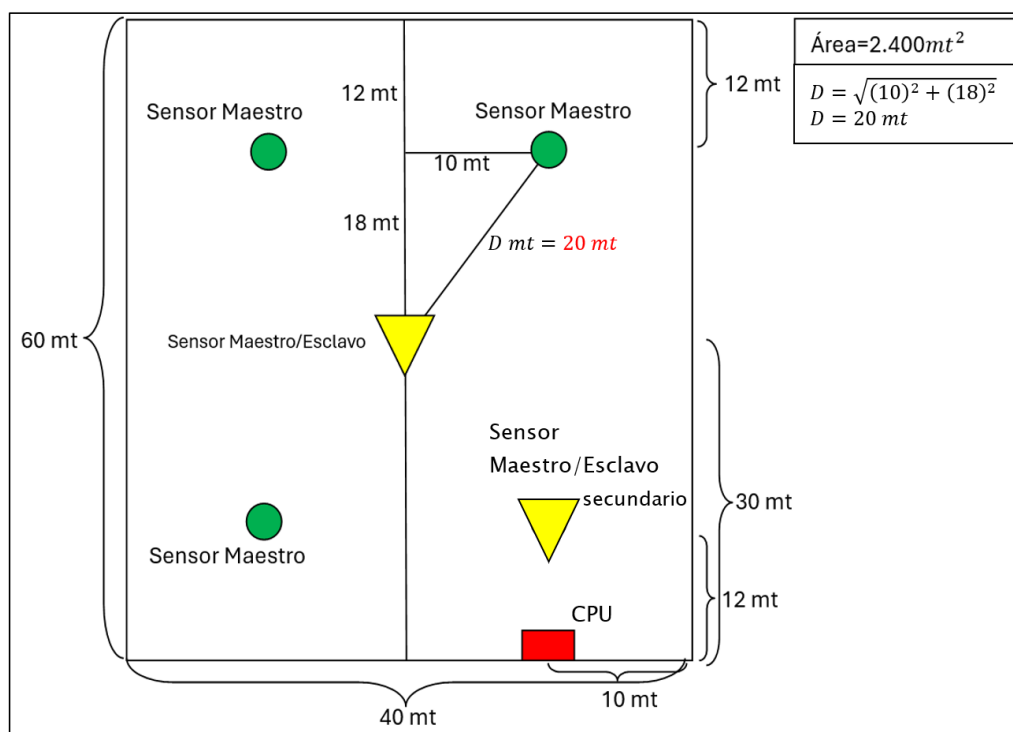


Ilustración 6: Cálculo de distancia entre sensores.

Como se puede apreciar, la distancia entre los SM y el SME secundario, con del SME central es de 20 mt. Por lo cual es viable el uso de un punto de almacenamiento entre los SM con el CE. A continuación, se expresa el flujo de datos dentro del invernadero, además de las distancias que existen entre los dispositivos.

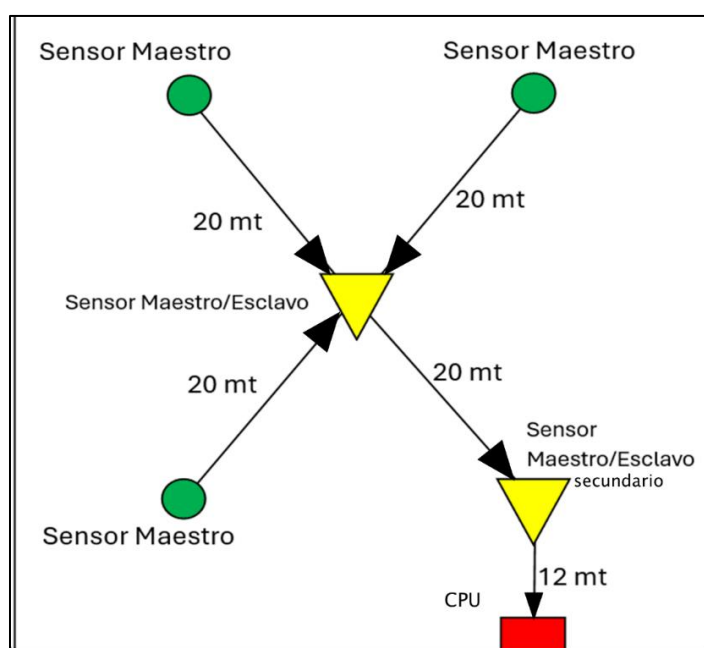


Ilustración 7: distancias definidas para la configuración de la red de comunicaciones

Con la configuración para implementar la red de comunicaciones, se conectaron y configuraron las placas ESP-32 restantes, junto con los sensores AHT-10. A continuación se explica el método de conexión, además de destacar la dirección del flujo de datos.

Conexiones eléctricas

Ya definida la pare virtual del proyecto, cabe recalcar como se realizaron las conexiones eléctricas de los equipos utilizados, para esto a continuación se muestra un esquema de la forma de conexión de cada sensor junto a su fuente de poder y placa ESP-32, se utilizó una power bank como fuente de alimentación, ya que esta permitía una conexión a corriente de manera portátil y además de permitir movilidad en el terreno de pruebas.

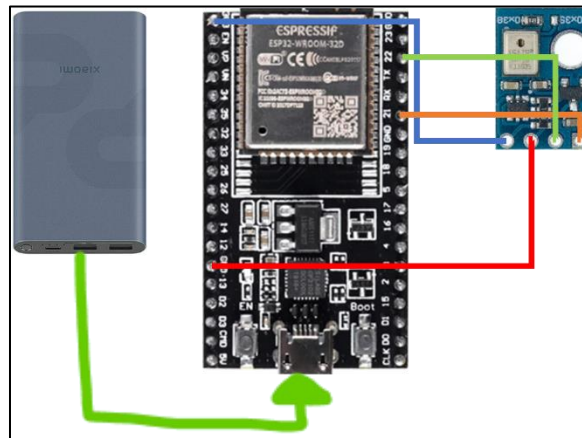


Ilustración 8: Conexión o circuito de cada sensor.

En cambio, para el CPU se utiliza el modelo de conexión original de Azimut, el cual a diferencia de los sensores está conectado directamente a la red eléctrica por medio de una placa diseñada especialmente para incorporar el procesador de una placa ESP-32.



Ilustración 9: Configuración original de Azimut para el CPU

Con los circuitos ya definidos, se confecciono un esquema final, destacando la dirección del flujo de datos a través de la red de comunicaciones.

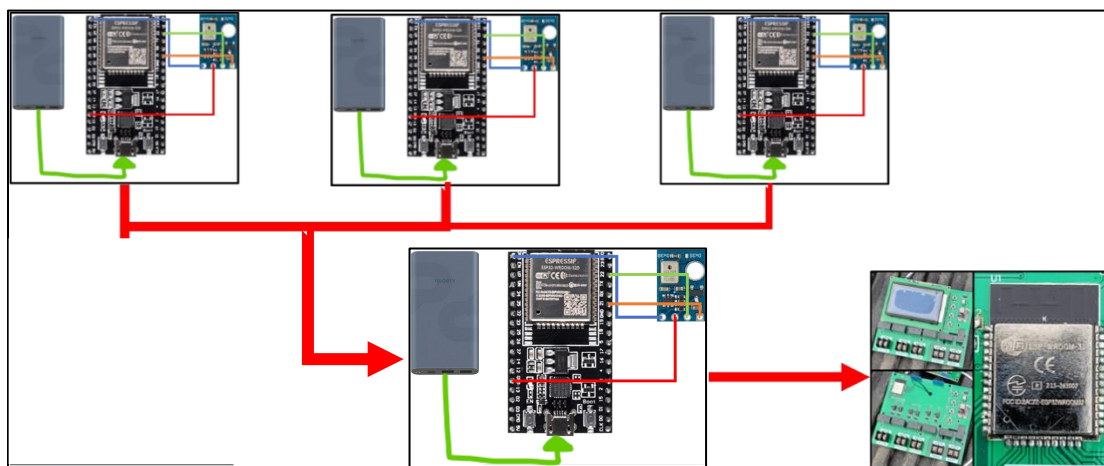


Ilustración 10: Esquema final de la ruta de datos, a través de la red de comunicación

Con todos los circuitos y conexiones listas se diseñó un algoritmo (código), el cual, sea capaz de administrar los datos recolectados por los sensores AHT-10, para finalmente ser enviados al CPU.

Algoritmo para el funcionamiento de la red de comunicación

Se definió a manera de pasos a paso el proceso completo del funcionamiento dentro de la red de comunicación, con el fin de tener una base, con tareas que se deben realizar a medida que avanza el código:

- 1- Los SM reciben los datos detectados por el sensor AHT-10.
- 2- Se envían las mediciones hacia el SME más cercano, o en su defecto al CE.
- 3- En caso de que los datos lleguen al SME, se deben transmitir los datos hacia el SME más cercano, o en su defecto al CE.
- 4- El CE ordena los datos entrantes destacando el sensor de origen.
- 5- Se calcula el promedio de todos los datos entrantes de temperatura y humedad relativa.
- 6- El CE muestra los datos entrantes por medio de la pantalla LCD incorporada.

Software de trabajo: Para la configuración a nivel de Software de la red de comunicaciones, el código general se dividió en 3 partes diferentes. Al hacer la separación del código, facilita realizar ajustes de programación, sin la necesidad de interferir con los demás códigos.

- **Configuración transmisor:** Los equipos configurados en este modo se ubican en los puntos más alejados, su trabajo consta en almacenar y enviar los datos de humedad y temperatura relativa cada 2 segundos. Para que funcione, se incorpora la dirección MAC del equipo receptor (ya sea el CPU o un transceptor), al que se envían los datos y se define una función la cual almacena los datos que se recopilan mediante el sensor SHT-10:

```
// Reemplace esta dirección MAC con la dirección MAC del receptor
uint8_t receiverMAC[] = {0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF};

unsigned long time_stamp = 0;

// Define una estructura para guardar los datos recibidos del sensor
typedef struct struct_message {
    int id;
    float x;
    float y;
} struct_message;
```

Ilustración 11: Extracto de código para almacenar datos recopilados y dirección MAC.

Se configura la placa para utilizar el protocolo de comunicación ESP-NOW, por medio de la antena incorporada dentro de la placa ESP-32. Se definió una función para la transmisión de datos, donde se configuran las direcciones MAC de la placa receptora, como de la placa que esta transmitiendo, se configura el canal por el que se transmitirán los datos para prevenir interferencias de señales externas además de establecer el modo de cifrado.

```
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    WiFi.mode(WIFI_STA);

    // Obtiene la dirección MAC de esta placa
    Serial.print("Dirección MAC de esta placa: ");
    Serial.println(WiFi.macAddress());

    // Inicializa la función ESPNOW.
    if (esp_now_init() != ESP_OK) {
        Serial.println("Error al inicializar ESP-NOW");
        return;
    }

    // Registra la función de devolución de llamada para enviar datos por ESPNOW.
    esp_now_register_send_cb(OnDataSent);

    // Configura la dirección MAC del receptor
    memcpy(peerInfo.peer_addr, receiverMAC, 6);
    // Configura el canal
    peerInfo.channel = 0;
    // Configura el modo de cifrado
    peerInfo.encrypt = false;

    // Agrega el dispositivo a la lista de dispositivos emparejados
    if (esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK) {
        Serial.println("Error al agregar peer");
        return;
    }
}
```

Ilustración 12: Extracto de código para la configuración del canal de comunicación.

Por último, se estableció la transmisión de datos **cada 2 segundos**, además de detallar por medio de un mensaje textual a que corresponde cada valor numérico (id, temperatura, humedad), se estableció una variable extra, que indicara si el canal de comunicación es viable o no. **“Código completo en el Anexo 4”**.

```
// Envía datos cada 2 segundos
if (millis() - time_stamp > 2000){
    time_stamp = millis();

    // Verifica el envío
    if (result == ESP_OK) {
        Serial.println("Envío OK");
    } else {
        Serial.println("Envío FAIL");
    }
}
```

Ilustración 13: Extracto de código para establecer el intervalo de envío de datos y verificación de conexión.

- **Configuración receptor:** Contrario que el transmisor, el receptor no necesita de una dirección MAC, esto se debe a que es el ultimo punto de la red de comunicaciones, donde se pueden apreciar todos los datos almacenados de todos los elementos que forman la red de comunicaciones. Primero se define una estructura la cual almacena todos los datos recibidos anteriormente.

```
// Define una estructura para guardar los datos recibidos del sensor
typedef struct struct_message {
    int id;
    float x;
    float y;
} struct_message;
```

Ilustración 14: Extracto de código para almacenar todos los datos de la red de comunicaciones.

Se configuro una función de almacenamiento de datos, la cual se actualiza, a medida que se registran nuevos datos, durante el funcionamiento de la red de comunicaciones. Se dejo un campo para agregar el **código madre perteneciente a Azimut** (este código esta con derechos de autor con un acuerdo de confidencialidad). **“Código completo en el Anexo 5”**.

```
// Función activada cuando se reciben datos e imprime los datos
void OnDataRecv(const uint8_t * mac, const uint8_t *incomingData, int len) {
    memcpy(&getData, incomingData, sizeof(getData));
}

void loop() {
    // Aquí va el código principal de Azimut, donde se encuentran todas las
    // ejecuciones y/o interacciones que tiene la red de comunicaciones con los elementos mecánicos.
```

Ilustración 15: Extracto de código donde se almacenan los datos y se deja el espacio para el código madre.

- **Configuración transceptor:** La configuración para el transceptor es la mas compleja de las 3. Este dispositivo es un punto de interconexión para los sensores mas alejados con el CPU, además de almacenar y enviar junto a los datos recibidos de los sensores externos, los datos del propio sensor con le que cuenta el transceptor de turno. Para el programa se hizo una mezcla de los creados anteriormente para el transmisor y el receptor. Es necesario la dirección MAC, del dispositivo al que se le enviaran los datos, además se añade la estructura anterior para almacenar los datos que se recopilan en el sensor incorporado en la propia placa, sumados a los datos recibidos de manera externa.

```
// Reemplazar esta MAC con la MAC del receptor
uint8_t receiverMAC[] = {0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF};
unsigned long time_stamp = 0;
// Define una estructura para guardar los datos recibidos del sensor
typedef struct struct_message {
    int id;
    int x;
    int y;
} struct_message;
// Inicializa una estructura llamada sendData para enviar datos
struct_message sendData;
// Inicializa una estructura llamada getData para recibir datos
struct_message getData;
// Agrega información de un peer a la lista de peers.
esp_now_peer_info_t peerInfo;
// Función activada cuando se envían datos
void OnDataSent(const uint8_t *mac_addr, esp_now_send_status_t status) {
    Serial.print("\r\nEstado de envío de la estructura de datos: ");
    Serial.println(status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "OK" : "FAIL");
}
```

Ilustración 16: Extracto de código para almacenar y enviar los datos recopilados.

Con la función para almacenar los datos captados por el sensor SHT-10 del transceptor, se diseñó otra función, encargada de recibir los datos recopilados, adjuntarlos y enviarlos, hacia la placa receptora ***"Código completo en el Anexo 6"***.

```
// Función activada cuando se reciben datos e imprime los datos
void OnDataRecv(const uint8_t * mac, const uint8_t *incomingData, int len) {
    memcpy(&getData, incomingData, sizeof(getData));
    Serial.println("<---");
    Serial.println("Datos recibidos:");
    Serial.print("id: ");
    Serial.println(getData.id);
    Serial.print("x: ");
    Serial.println(getData.x);
    Serial.print("y: ");
    Serial.println(getData.y);
    Serial.println();
}
```

Ilustración 17: Extracto de código para el reenvío de datos almacenados y recibidos.

Con la configuración ya determinada, se realizarán pruebas de conectividad entre placas ESP-32, con el fin de que los cálculos realizados anteriormente concuerden con los valores reales en la transmisión de datos, dentro del Invernadero. A continuación, se detallan las diversas pruebas realizadas.

Pruebas de campo realizadas

- **Lugar de estudio e implementación:** Todas las pruebas han sido realizadas en un invernadero fabricado por Azimut, en el cual su dueño Don Fabian, nos proporciona la facilidad de probar la transmisión de datos en tiempo real, mientras el invernadero se encuentra en funcionamiento total. Se tiene como objetivo el poder identificar como afecta la estructura del invernadero (madera, acero y plástico, son los materiales más importantes) en la transmisión de datos. A continuación, se adjuntan imágenes de las instalaciones, junto a una imagen satelital del invernadero, donde se señalan sus dimensiones.



Ilustración 18: Instalaciones donde se realizarán las pruebas de transmisión de datos y efectividad de la red de comunicaciones

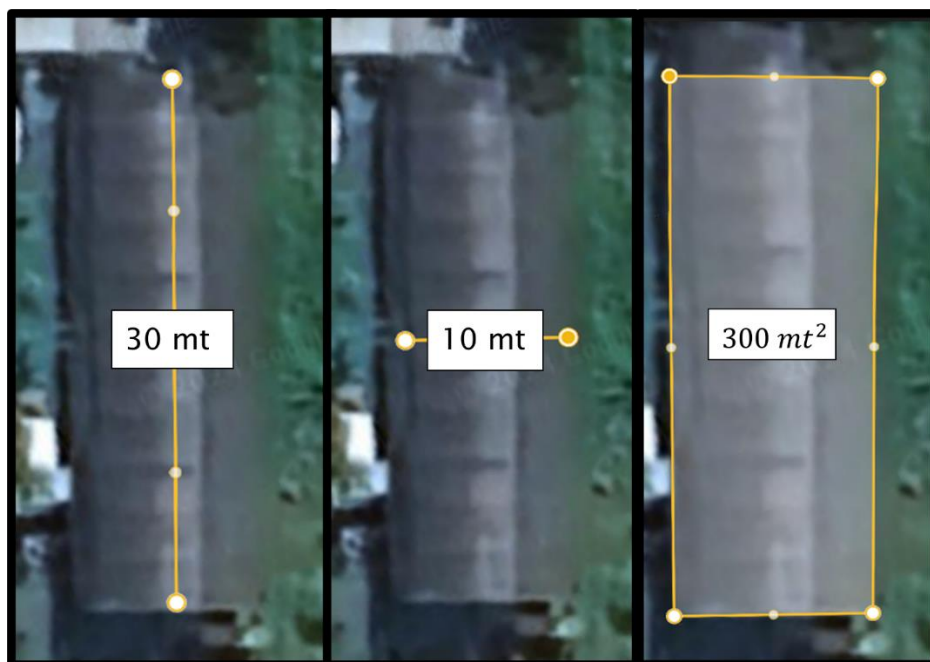


Ilustración 19: medidas oficiales del invernadero

Aunque estas dimensiones son inferiores a las señaladas en el diseño para la implementación de la red de comunicaciones, no significa que los datos y resultados que se obtendrán sean insignificantes o no sean de utilidad. Esto se debe a que la instalación y funcionamiento de la red de comunicaciones es adaptable a cualquier dimensión de invernaderos con la que trabaje Azimut.

Alcance real de los ESP-32 e influencia de diversas estructuras: Se montaron 2 placas ESP-32, uno como transmisor y otro como receptor, con el fin de poder determinar cuál es el alcance real de las antenas de transmisión, incorporadas en cada placa, este dato es muy relevante debido a que existe más de un modelo de placa ESP-32, las cuales van en aumento de costo monetario, mientras más grande sea la antena, encargada de la transmisión de datos. A continuación, se muestra dónde están incorporadas las antenas transmisoras, y las 2 placas con la que se realizó la prueba.



Ilustración 20: Se señala la salida de conexión para la antena de transmisión.



Ilustración 21: Placa adjunta al computador es receptor y placa libre definida como transmisor

Al ejecutar el programa (mencionado en la págs. 30–32), se estuvo en alejando, verificando en el terminal si el flujo de datos se mantiene constante, sin pérdida de datos o una señal de error de conexión. A medida que la placa transmisora se aleja del receptor, se transita por diversos entornos con presencias de materiales externos como el metal, madera, ladrillo, cemento, vegetación ,etc.

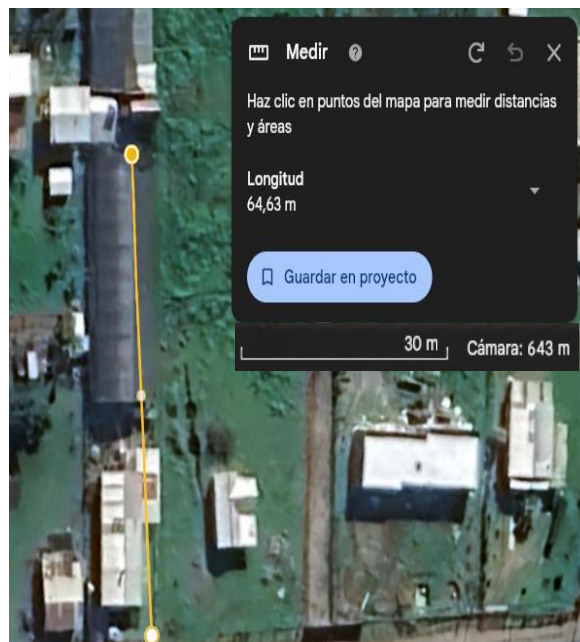


Ilustración 22: Imagen satelital, muestra la distancia de alcance, para las placas ESP-32.

Como se puede apreciar en la “**Ilustración 22**”, la distancia de alcance es mucho mayor al largo total del invernadero, esto gracias a la medida utilizada anteriormente en el código para la transmisión, donde la señal se conecta por medio de una dirección MAC específica (señalada en pág. 30), la conexión alcanza una distancia **de 64.63 metros**, en comparación a los **20 metros**

señalados en la “**tabla 5**”. sin embargo, la transmisión de datos sufre de ligeras interferencias o perdidas de datos, esto se arreglo al reducir la distancia hasta los **50 metros**.

Como la distancia de alcance es mucho mayor a lo esperado, se decidió que los materiales circundantes, no afectan de manera grave a la transferencia de datos, sin embargo, se hipotetizo que, añadiendo un transceptor, la señal de conexión puede abarcar los 100 metros de manera estable.

- **Flujo de datos con un SME:** Se conecto un transceptor a una distancia de 50 metros, respecto al receptor, y se alejó al transmisor 50 metros más del transceptor.

La conexión se mantiene estable y a su vez permite al los dispositivos estar mas lejos de lo ubicado con anterioridad. Finalmente, la conexión empieza a **fluctuar a los 60 metros** de distancia, por lo cual, se definió que la distancia máxima para ubicar el transmisor del transceptor y el transceptor con el receptor **es de máximo 55 metros**.

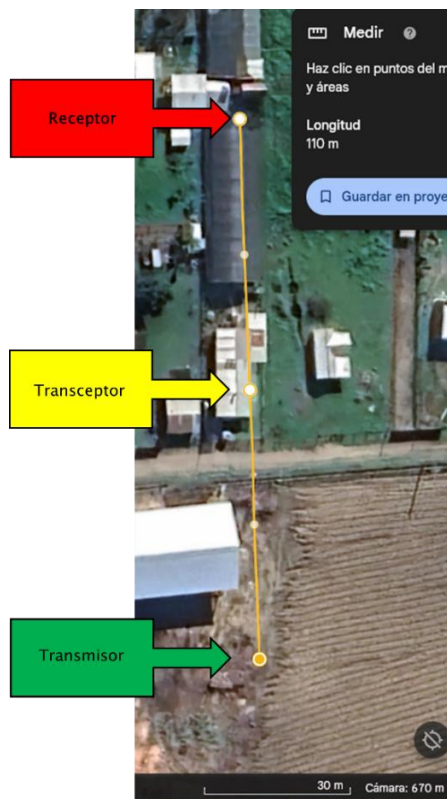


Ilustración 23: imagen satelital de las ubicaciones de cada elemento dentro de la red de sensores.

Como se puede apreciar, el área en que funciona la transmisión de datos es mucho mayor al área total del invernadero donde se realizaron las pruebas, esto es muy atractivo para el

proyecto, debido a que da un margen de espacio de trabajo mucho mas amplio que el determinado por los cálculos anteriores.

Red de comunicaciones de sensores montada: Con la efectividad de la red de comunicaciones estudiada anteriormente, se instalaron todos los transmisores y receptores fabricados, para probar el almacenamiento y envío de datos con mas de 2 elementos y la efectividad de trabajo con los mecanismos de climatización activados del invernadero.



Ilustración 24: Fotografía en 180° del invernadero, señalando las ubicaciones de los sensores.

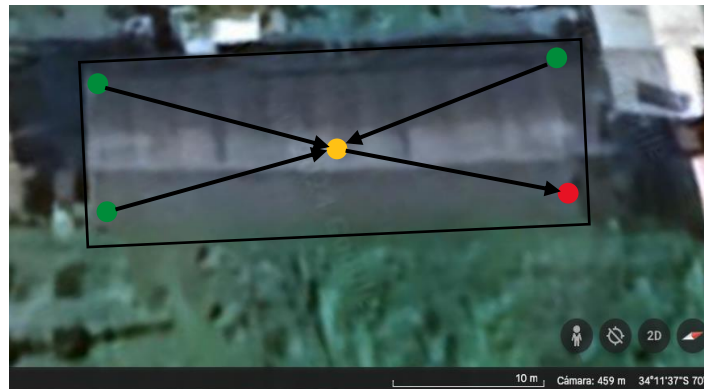


Ilustración 25: Imagen satelital, muestra más claramente, la red de sensores montada.

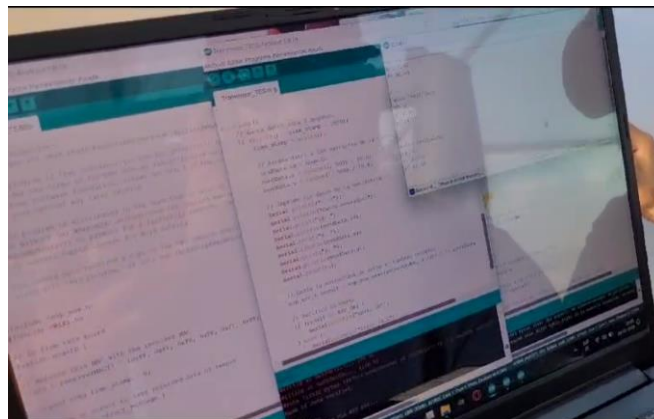


Ilustración 26: Captura de la terminal, donde se almacenan todos los datos recopilados por medio de la red de comunicaciones.

Resultados

Datos numéricos: A lo largo del TT, se registraron múltiples valores numéricos, los cuales serán recopilados a continuación:

- Alcance máximo de los ESP-32 es de 60 mt.
- Alcance seguro de trabajo igual a 55 mt.
- Tiempo óptimo para transferencia de datos, de mínimo 2 segundos.
- Altura mínima para instalar los sensores, de 2mt desde el nivel del suelo.
- Las placas ESP-32, tienen un consumo de: 240 mA, 0.1 amperios a 3.3 voltios.

Pronostico futuro para la red de comunicaciones: Como se pudo apreciar, el alcance y efectividad de la red de comunicaciones es muy eficiente, esto abre la puerta a numerosas mejoras o adaptaciones, para un próximo proyecto, ya sea de Titulo o por parte propia de Azimut. Ya sea el de alimentar todos los sensores de manera estable usando paneles solares y baterías recargables, además de adaptar una forma de instalación magnética, para instalar de manera rápida y sin complicaciones para estructuras metálicas.

Discusión: Los protocolos de comunicaciones, han avanzado bastante en la modificación de sus características, como por ejemplo la distancia de alcance, latencia, velocidad de transferencia, etc. Sin embargo, la presencia de estructuras o la mala ubicación de los transmisores siguen afectando el rendimiento en terreno que se señalan en los documentos oficiales de cada protocolo de comunicación.

Por otra parte, la eficiencia energética es bastante conveniente como se pudo apreciar durante el tiempo de pruebas, ya que con una sola batería portátil se pudo alimentar a los 5 sensores de temperatura y humedad de manera constante por aproximadamente 24 horas sin una recarga de energía ni pausas en el proceso de detección climática.

La red de comunicación implementada, utilizando el protocolo ESP-NOW cuenta con la ventaja que se pueden añadir mas transmisores y transceptores de manera infinita, ya sea extendiendo la red en un área continua, o creando ramificaciones distintas entre si con 1 receptor general o con múltiples receptores jefes.

Conclusiones

De este proyecto se pudo concluir que no es necesario de una conexión a internet, ni de equipos extremadamente caros o de difícil acceso, para desarrollar e implementar una red de comunicaciones en cualquier espacio, sin importar en que lugar se encuentre. Solo es necesario el equipo correcto, y los conocimientos necesarios.

El hecho de que Azimut ya trabaja con las placas y/o procesadores ESP-32, fue de mucha ayuda para poder implementar de manera más rápida, tanto un algoritmo como una red de comunicación inalámbrica. Principalmente por el hecho de ya contar de manera nativa con un transceptor compatible y modular, en métodos de comunicación.

Cabe destacar que según las investigaciones realizadas por Espressif Systems, **siempre se destacó** que el enfoque principal, de las **placas ESP-32**, como del **protocolo ESP-NOW**, es para el **desarrollo de redes** de sensores y sistemas de control inalámbrico de **corto alcance**.

Por lo cual finalmente se llegó a la conclusión de que el desarrollo de la red de comunicaciones bien no implica un ahorro monetario, ya sea por el gasto extra que se debe hacer para adquirir un mayor número de procesadores ESP-32, como del gasto adicional en la fabricación de carcasas más grandes, donde se integran los sensores inalámbricos.

Se decidió que si bien **las placas ESP-32, tienen un alcance de mas de 60 mt**, como se comprobó en las pruebas realizadas, se decidió imponer que el alcance máximo con el que se trabajara e instalara la red de comunicaciones a nivel comercial, es de alrededor del 90% de la distancia total (55 mt), como precaución, para evitar pérdidas de datos o posibles interferencias de señales externas.

Bibliografía

- Páez, C. S. C., & Cueva, R. A. L. (2019). Evaluación del desempeño de la tecnología wifi en concordancia con los estándares IEEE 802.11 b/g/n en el interior de una cámara anecoica para la banda de 2.4 GHz. Performance evaluation of Technology wifi in conformance with IEEE, 802, 22–44.
- Nima Castillo, L. G. (2019). Diseño de un sistema de gestión de edificios BMS, que integra sistemas de seguridad electrónica, electromecánicos y comunicación ethernet para el laboratorio de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional de Piura.
- Pilatasig Chicaiza, H. F., & Yugsi Caiza, L. R. (2022). Implementación de un sistema de control de temperatura y humedad en la florícola Pilatasig Analuisa Martha Cecilia ubicado en la provincia de Cotopaxi (Bachelor's thesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)).
- Automatización Industrial: Qué es y cómo funciona. (2019, noviembre 7). aula21 | Formación para la Industria. <https://www.cursosaula21.com/que-es-la-automatizacion-industrial/>
- Azimut Invernaderos |. (s/f). Azimutinvernaderos.cl. Recuperado el 30 de enero de 2024, de <https://azimutinvernaderos.cl/>
- De insectos, L. R. de S. I. P. M. C. E. P. I. y. R. Q. P. T. y. C. lo H. U. R., & de forma coordinada para monitorizar los parámetros elegidos., L. N. S. se D. en el T. y. T. (s/f). Redes de Sensores Inalámbricos, la tecnología invisible. Coit.es. Recuperado el 30 de enero de 2024, de <https://www.coit.es/sites/default/files/archivobit/pdf/bit-180-181-tecnologiaysociedad-redes-de-sensores-inalambricos.pdf>
- Franco, D., & Castillo, F. (2009). Comunicaciones Inalámbricas: Bluetooth. Prisma Tecnológico, 1(1), 19–21. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/prisma/article/view/412>
- I2C – Puerto, Introducción, trama y protocolo. (2017, octubre 28). HeTPro–Tutoriales. <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/i2c/>
- Jackson, G., & Oscar, S. (s/f). EL CAMINO HACIA LA TECNOLOGÍA 5G. Redalyc.org. Recuperado el 30 de enero de 2024, de <https://www.redalyc.org/pdf/784/78445977002.pdf>

Monfort, I. O. (s/f). Estudio de la arquitectura y el nivel de desarrollo de la red LoRaWAN y de los dispositivos LoRa. Uoc.edu. Recuperado el 30 de enero de 2024, de <https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/64365/6/iordonezTFM0617mem%c3%b2ria.pdf>

¿Qué es el principio master/slave? (2023, junio 22). IONOS Digital Guide; IONOS. <https://www.ionos.es/digitalguide/servidores/know-how/principio-master/slave/>

SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD AHT10. (s/f). Electrónica ElectroPro – Piura. Recuperado el 30 de enero de 2024, de https://electropro.pe/index.php?route=product/product&product_id=1038

(S/f-a). Researchgate.net. Recuperado el 30 de enero de 2024, de https://www.researchgate.net/publication/28135303_Redes_de_sensores_inalambricos

(S/f-b). Digikey.com. Recuperado el 30 de enero de 2024, de [https://www.digikey.com/es/articles/how-to-select-and-use-the-right-esp32-wi-fi-bluetooth-](https://www.digikey.com/es/articles/how-to-select-and-use-the-right-esp32-wi-fi-bluetooth-module#:~:text=El%20m%C3%B3dulo%20ESP32%20es%20una,para%20conectarse%20con%20varios%20perif%C3%A9ricos)
[module#:~:text=El%20m%C3%B3dulo%20ESP32%20es%20una,para%20conectarse%20con%20varios%20perif%C3%A9ricos](https://www.digikey.com/es/articles/how-to-select-and-use-the-right-esp32-wi-fi-bluetooth-module#:~:text=El%20m%C3%B3dulo%20ESP32%20es%20una,para%20conectarse%20con%20varios%20perif%C3%A9ricos)

(S/f-c). Electrosoftcloud.com. Recuperado el 30 de enero de 2024, de <https://www.electrosoftcloud.com/esp-now-conecta-dos-o-mas-esp32-esp8266/>

(S/f-d). Edu.co. Recuperado el 30 de enero de 2024, de https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/23108/11/ManriqueCristian_2021_MedicionVariablesAmbientales.pdf

(

Alba, J. (s. f.). Aplicaciones de WiFi. Coit.es. Recuperado 30 de enero de 2024, de <https://www.coit.es/sites/default/files/archivobit/pdf/sociedad1.pdf>

Automatización Industrial: Qué es y cómo funciona. (2019, noviembre 7). aula21 | Formación para la Industria. <https://www.cursosaula21.com/que-es-la-automatizacion-industrial/>

Azimut Invernaderos |. (s. f.). Azimutinvernaderos.cl. Recuperado 30 de enero de 2024, de <https://azimutinvernaderos.cl/>

)

Compañía. (2021, junio 8). Taclla. <https://www.taclla.com/compania/>

EnOcean: comunicación inalámbrica a un bajo consumo. (2014, agosto 27). ricveal. <https://ricveal.com/blog/enOcean>

Fabricante de Invernaderos, Rufepa. (s. f.-a). Rufepa Tecnoagro. Recuperado 30 de enero de 2024, de <https://www.rufepa.com/invernadero.html>

Fabricante de Invernaderos, Rufepa. (s. f.-b). Rufepa Tecnoagro. Recuperado 30 de enero de 2024, https://www.rufepa.com/?gclid=CjwKCAiA75itBhA6EiwAkho9ezybZ_1h1pR7_mDlKnzAqyzngCvIq0HfVc5YzG28Fjiv3R0XzBtAFxoCQ-gQAvD_BwE

Franco, D., & Castillo, F. (2009). Comunicaciones Inalámbricas: Bluetooth. Prisma Tecnológico, 1(1), 19–21. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/prisma/article/view/412>

Gagliardi, T. (2019). Análisis de la comunicación de radio frecuencia con módulos nRF24L01. Universidad Nacional de La Plata.

Huamán, R., & Evelia, C. (2015). Sistema automatizado para el monitoreo y control de humedad en un invernadero. Pontificia Universidad Católica del Perú.

(«I2C – Puerto, Introducción, trama y protocolo», 2017)

I2C – Puerto, Introducción, trama y protocolo. (2017, octubre 28). HeTPro-Tutoriales. <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/i2c/>

Jackson, G., & Oscar, S. (s. f.). EL CAMINO HACIA LA TECNOLOGÍA 5G. Redalyc.org. Recuperado 30 de enero de 2024, de <https://www.redalyc.org/pdf/784/78445977002.pdf>

Kingzo Gmd60-S Single Shaft Output Greenhouse Reeler Direct Current 60W DC24V Electrical Roll up Motor. (s. f.). Made-in-china.com. Recuperado 30 de enero de 2024, de <https://skyplant.en.made-in-china.com/product/BFMGfzhAHIVp/China-Kingzo-Gmd60-S-Single-Shaft-Output-Greenhouse-Reeler-Direct-Current-60W-DC24V-Electrical-Roll-up-Motor.html>

Monfort, I. O. (s. f.). Estudio de la arquitectura y el nivel de desarrollo de la red LoRaWAN y de los dispositivos LoRa. Uoc.edu. Recuperado 30 de enero de 2024, de <https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/64365/6/iordonezTFM0617mem%c3%b2ria.pdf>

¿Qué es el principio master/slave? (2023, junio 22). IONOS Digital Guide; IONOS.
<https://www.ionos.es/digitalguide/servidores/know-how/principio-master/slave/>
 (SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD AHT10, s. f.)

SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD AHT10. (s. f.). Electrónica ElectroPro – Piura. Recuperado
 30 de enero de 2024, de
https://electropro.pe/index.php?route=product/product&product_id=1038
 (S. f.-a). Udc.es. Recuperado 30 de enero de 2024, de
https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/31953/MarinoBoga_Pablo_TFG_2022.pdf?sequence=3&isAllowed=y
 (S. f.-b). Cloudflare.com. Recuperado 30 de enero de 2024, de <https://www.cloudflare.com/es-es/learning/network-layer/how-does-the-internet-work/>
 (S. f.-c). Ucsd.edu. Recuperado 30 de enero de 2024, de
<https://agroecology.ucsd.edu/about/publications/guías-de-agricultor/pdf-en-espanol/plantulas.pdf>
 (S. f.-d). Edu.co. Recuperado 30 de enero de 2024, de
https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/23108/11/ManriqueCristian_2021_MedicionVariablesAmbientales.pdf
 (S. f.-e). Ucsd.edu. Recuperado 30 de enero de 2024, de
<https://agroecology.ucsd.edu/about/publications/guías-de-agricultor/>
 (s. f.-f)
 (S. f.-f). Electrosoftcloud.com. Recuperado 30 de enero de 2024, de
<https://www.electrosoftcloud.com/esp-now-conecta-dos-o-mas-esp32-esp8266/>
 (S. f.-g). Digikey.com. Recuperado 30 de enero de 2024, de
<https://www.digikey.com/es/articles/how-to-select-and-use-the-right-esp32-wi-fi-bluetooth-module#:~:text=El%20módulo%20ESP32%20es%20una,para%20conectarse%20con%20varios%20periféricos>

Anexos

- **Anexo 1: Empresa a cargo del (TT).**



Ilustración 27: Logo de Azimut Invernaderos, empresa con la cual se realizó esta pasantía Profesional

- **Anexo2: Empresas en el mercado.**

RUFEPA: Con 25 años de experiencia en la fabricación y montaje de invernaderos, RUFEPA destaca su papel como testigo de la transformación hacia modelos de alta tecnología en esta industria. Han introducido innovaciones en diseño, materiales y métodos de producción intensiva, reconociendo la importancia crucial del diseño y los materiales en proyectos hortícolas. La compañía se destaca en proyectos llave en mano, ofreciendo asesoramiento y desarrollo adaptado a los requisitos específicos de cada tipo de cultivo. RUFEPA ofrece invernaderos de cristal "Venlo" de alta tecnología, adaptados a diversos climas, así como estructuras de malla sombra instaladas en más de 20 países. Su compromiso con la calidad se refleja en la estricta adherencia a normativas europeas y certificaciones ISO 9001, además de la homologación de sus invernaderos para el territorio ruso con el certificado GOST (RUFEPA, 2000).

Davis Instruments: Davis Instruments, con sede en Hayward, California, es una empresa líder en la fabricación y venta de equipos electrónicos para el monitoreo meteorológico y ambiental. Fundada por Warren Davis en 1963, se destaca por sus estaciones meteorológicas de alta precisión y calidad, así como por una gama de productos que incluyen anemómetros, pluviómetros y sensores de temperatura y humedad. Sus productos son ampliamente utilizados por aficionados, profesionales y diversas industrias como la agricultura, aviación, investigación científica y marítima. La empresa ha ganado reconocimiento por su fiabilidad, precisión, innovación y servicio al cliente (Davis Instruments, 2021).

TACLLA: Taclla es una empresa colombiana, la cual está conformada principalmente por profesionales que están especializados en tecnologías de comunicación inalámbrica tanto actuales como en mejorarlas y hacerlas más eficientes. Propone soluciones innovadoras tanto para áreas agrícolas, sector industrial e infraestructuras. Desde su fundación en el año 2016, se dedican al diseño de metodologías y tecnologías capaces de almacenar, categorizar y evaluar datos relevantes en campos laborales de gran tamaño. A través del tiempo se acumularon grandes niveles de experiencia en el funcionamiento de la vida rutinaria en la industria, lo cual ha permitido crecer tanto en la actualización de las metodologías de trabajo como en las ofertas de implementación que se ofrecen al mercado (manejo de drones, estaciones climáticas, etc.) (Taclla.S.A.S, 2016).

- Anexo 4: Código para la configuración del Transmisor.

```

Transmisor_TESIS $
#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>
// ID de esta placa
#define nodeID 2
// Reemplaza esta dirección MAC con la dirección MAC del receptor
uint8_t receiverMAC[] = {0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF};
unsigned long time_stamp = 0;
// Define una estructura para guardar los datos recibidos del sensor
typedef struct struct_message {
    int id;
    float x;
    float y;
} struct_message;
// Inicializa una estructura llamada sendData
struct_message sendData;
// Agrega un peerInfo a la lista de peers.
esp_now_peer_info_t peerInfo;
// Función activada cuando se envían datos
void OnDataSent(const uint8_t *mac_addr, esp_now_send_status_t status) {
    Serial.print("\r\nEstado de envío de la estructura de datos: ");
    Serial.println(status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "OK" : "FAIL");
}
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    WiFi.mode(WIFI_STA);
    // Obtiene la dirección MAC de esta placa
    Serial.print("Dirección MAC de esta placa: ");
    Serial.println(WiFi.macAddress());
    // Inicializa la función ESPNOW.
    if (esp_now_init() != ESP_OK) {
        Serial.println("Error al inicializar ESP-NOW");
        return;
    }
    // Registra la función de devolución de llamada para enviar datos por ESPNOW.
    esp_now_register_send_cb(OnDataSent);
    // Configura la dirección MAC del receptor
    memcpy(peerInfo.peer_addr, receiverMAC, 6);
    // Configura el canal
    peerInfo.channel = 0;
    // Configura el modo de cifrado
    peerInfo.encrypt = false;
    // Agrega el dispositivo a la lista de dispositivos emparejados
    if (esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK) {
        Serial.println("Error al agregar peer");
        return;
    }
}
void loop() {
    // Envía datos cada 2 segundos
    if (millis() - time_stamp > 2000) {
        time_stamp = millis();
        // Asigna datos a las variables de la estructura
        sendData.id = nodeID;
        sendData.x = random(1, 500) / 10.0;
        sendData.y = random(1, 500) / 10.0;
        // Imprime los datos de la estructura
        Serial.println("---->");
        Serial.println("Datos enviados:");
        Serial.print("id: ");
        Serial.println(sendData.id);
        Serial.print("x: ");
        Serial.println(sendData.x);
        Serial.print("y: ");
        Serial.println(sendData.y);
        Serial.println();
        // Envía la estructura de datos al tablero receptor
        esp_err_t result = esp_now_send(receiverMAC, (uint8_t *) &sendData, sizeof(sendData));
        // Verifica el envío
        if (result == ESP_OK) {
            Serial.println("Envío OK");
        } else {
            Serial.println("Envío FAIL");
        }
    }
}

```

Ilustración 28: Código completo para la configuración del Transmisor.

- Anexo 5: Código para la configuración del Receptor.

```

Receptor_TESIS $
#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>

// Define una estructura para guardar los datos recibidos del sensor
typedef struct struct_message {
    int id;
    float x;
    float y;
} struct_message;

// Inicializa una estructura llamada getData
struct_message getData;

// Agrega un peerInfo a la lista de peers.
esp_now_peer_info_t peerInfo;

// Función activada cuando se reciben datos e imprime los datos
void OnDataRecv(const uint8_t * mac, const uint8_t *incomingData, int len) {
    memcpy(&getData, incomingData, sizeof(getData));
    Serial.println("<---");
    Serial.println("Datos recibidos:");
    Serial.print("id: ");
    Serial.println(getData.id);
    Serial.print("x: ");
    Serial.println(getData.x);
    Serial.print("y: ");
    Serial.println(getData.y);
    Serial.println();
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    WiFi.mode(WIFI_STA);

    // Obtiene la dirección MAC de esta placa
    Serial.print("Dirección MAC de esta placa: ");
    Serial.println(WiFi.macAddress());

    // Inicializa la función ESPNOW.
    if (esp_now_init() != ESP_OK) {
        Serial.println("Error al inicializar ESP-NOW");
        return;
    }

    // Registra la función de devolución de llamada para recibir datos por ESPNOW.
    esp_now_register_recv_cb(OnDataRecv);
}

void loop() {
    // Aquí va el código principal de Azimut, donde se encuentran todas las
    // ejecuciones y/o interacciones que tiene la red de comunicaciones con los elementos mecánicos.
}

```

Ilustración 29: Código completo para la configuración del Receptor.

- Anexo 6: Código para la configuración del Transceptor.

```

Transceptor_TESIS$
#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>
// ID from this board
#define nodeID 1
// Replace this MAC with the receiver MAC
uint8_t receiverMAC[] = {0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF};
unsigned long time_stamp = 0;
// Define an struct to save received data of sensor
typedef struct struct_message {
    int id;
    int x;
    int y;
} struct_message;
// Initialize an struct called sendData
struct_message sendData;
// Initialize an struct called getData
struct_message getData;
// Add a peerInfo to peer list.
esp_now_peer_info_t peerInfo;
// Function triggered on data sent
void onDataSent(const uint8_t *mac_addr, esp_now_send_status_t status) {
    Serial.print("\r\nData struct send status: ");
    Serial.println(status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "OK" : "FAIL");
}
// Function triggered on data received and print the data
void onDataRecv(const uint8_t * mac, const uint8_t *incomingData, int len) {
    memcpy(&getData, incomingData, sizeof(getData));
    Serial.println("<---");
    Serial.println("Data received:");
    Serial.print("id: ");
    Serial.println(getData.id);
    Serial.print("x: ");
    Serial.println(getData.x);
    Serial.print("y: ");
    Serial.println(getData.y);
    Serial.println();
    // Re-send data struct to the receiver board
    esp_err_t result = esp_now_send(receiverMAC, (uint8_t *) &getData, sizeof(getData));
    if (result == ESP_OK) {
        Serial.println("Re-sent OK");
    } else {
        Serial.println("Re-sent FAIL");
    }
}
void setup() {
    Serial.begin(115200);
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    WiFi.mode(WIFI_STA);
    // Get this board MAC address
    Serial.print("This board MAC Address: ");
    Serial.println(WiFi.macAddress());
    // Initialize ESPNOW function.
    if (esp_now_init() != ESP_OK) {
        Serial.println("Error initializing ESP-NOW");
        return;
    }
    // Register callback function of sending ESPNOW data.
    esp_now_register_send_cb(onDataSent);
    // Register callback function of receiving ESPNOW data.
    esp_now_register_recv_cb(onDataRecv);
    // Configure the receiver MAC
    memcpy(peerInfo.peer_addr, receiverMAC, 6);
    // Configure the channel
    peerInfo.channel = 0;
    // Configure the encrypt mode
    peerInfo.encrypt = false;
    // Add the device to the paired device list
    if (esp_now_add_peer(peerInfo) != ESP_OK){
        Serial.println("Failed to add peer");
        return;
    }
}

void loop() {
    // Send data each 2 seconds
    if (millis() - time_stamp > 2000){
        time_stamp = millis();
        // Assign data to the struct variables
        sendData.id = nodeID;
        sendData.x = random(100);
        sendData.y = random(100);
        // Print struct data
        Serial.println("<---");
        Serial.println("Data send:");
        Serial.print("id: ");
        Serial.println(sendData.id);
        Serial.print("x: ");
        Serial.println(sendData.x);
        Serial.print("y: ");
        Serial.println(sendData.y);
        Serial.println();
        // Send data struct to the receiver board
        esp_err_t result = esp_now_send(receiverMAC, (uint8_t *) &sendData, sizeof(sendData));
        // Verify sending
        if (result == ESP_OK) {
            Serial.println("Sent OK");
        } else {
            Serial.println("Sent FAIL");
        }
    }
}

```

Ilustración 30: Código completo para la configuración del Transceptor.