



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICA (WSN) CON
INTERNET DE LAS COSAS (IoT) IMPLEMENTADO EN UN
CULTIVO DE INVERNADERO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES, SISTEMAS Y
ELECTRÓNICA

PRESENTA:

EDGAR ADAIR MORALES HERNÁNDEZ

ASESOR DE TESIS:

DR. PEDRO GUZMAN TINAJERO

COASESOR

ING. FERNANDO ORTIZ SALGADO



UNAM
CUAUTITLÁN

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

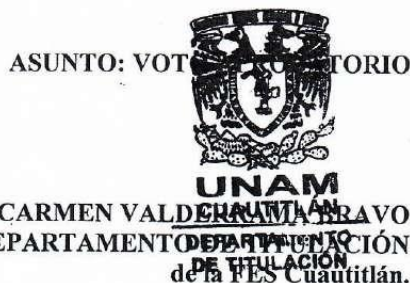
DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN



DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: DRA. MARÍA DEL CARMEN VALDEERRAMA BRAVO
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Diseño de una red de sensores inalámbrica (WSN) con internet de las cosas (IoT) implementado en un cultivo de invernadero.

Que presenta el pasante: **Edgar Adair Morales Hernández**
Con número de cuenta: 416004160 para obtener el Título de: **Ingeniero en Telecomunicaciones, Sistemas y Electrónica**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 11 de Enero de 2023.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Mtro. Jorge Buendía Gómez	
VOCAL	Dr. Pedro Guzmán Tinajero	
SECRETARIO	Ing. Jorge Ramírez Rodríguez	
1er. SUPLENTE	Mtra. Alma Alejandra Luna Gómez	
2do. SUPLENTE	Ing. Ernesto Aguilar Rodríguez	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

MCVB/ntm*

Agradecimientos

En primer lugar, le doy gracias al Dr. Pedro Guzmán Tinajero y al Ing. Fernando Ortiz Salgado por haber confiado en mí y guiarme durante la elaboración de este proyecto.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y a cada uno de los profesores que participaron en mi desarrollo profesional compartiendo sus experiencias.

A mis padres Erick Morales Méndez y Paulina Hernández Pelcastre por todo su amor, a mis hermanas Yareli Jaqueline Morales Hernández y Estefani Naomi Falcón Hernández por todo su cariño.

A mis amigos Misael Vázquez Cárdenas y Diego Alonso Flores Miranda por acompañarme en estos años de estudio compartiendo grandes instantes y por apoyarme en los momentos difíciles.

Sin ustedes, esto no sería posible.

Morales Hernández Edgar Adair

Índice general.

Introducción.....	1
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
Hipótesis.....	3
Justificación.....	4
Capítulo 1. Marco Teórico.....	5
1.1 Temperatura.....	5
1.2 Humedad.....	6
1.3 Sensores.....	7
1.4 Microcontrolador.....	9
1.4.1 Unidad central de procesos.....	10
1.4.2 Puertos de entrada y salida.....	10
1.4.3 Memoria.....	10
1.5 Comunicación inalámbrica.....	11
1.5.1 Ondas electromagnéticas.....	11
1.5.2 Espectro electromagnético.....	12
1.5.3 Antenas.....	14
1.5.4 Modulación.....	15
1.6 Red de sensores inalámbrica.....	16
1.6.1 Nodo sensor inalámbrico.....	17
1.6.2 Estación base.....	18
1.6.3 Topología.....	19
1.6.4 Estándares de comunicación.....	21
1.6.5 Tecnología de red LoRa.....	22
1.7 Internet de las cosas (IoT).....	24
1.7.1 Sistema IoT agrícola.....	25
Capítulo 2: Marco referencial.....	27
2.1 Aspectos generales de un invernadero.....	27
2.2 Importancia del clima dentro del invernadero.....	27
2.2.1 Radiación.....	27
2.2.2 Temperatura.....	28
2.2.3 Humedad relativa.....	29
2.3 Importancia del cultivo en invernaderos en México.....	30

Capítulo 3: Diseño e implementación.	32
3.1 Dispositivos seleccionados.....	32
3.1.1 ESP32.	32
3.1.2 RFM95W.....	34
3.1.3 DHT11.....	35
3.1.4 ThingSpeak.....	36
3.2 Diseño de la red.....	37
3.2.1 Nodo Sensor Inalámbrico.....	37
3.2.2 Estación Base (<i>Gateway</i>).....	41
3.3 Implementación del sistema.....	44
3.3.1 Ubicación.....	44
3.3.2 Inicialización y pruebas.....	46
3.4 Evaluación económica.....	48
 Capítulo 4: Evaluación de los resultados.	 49
4.1 Mediciones de temperatura.....	49
4.2 Mediciones de humedad.....	50
4.3 Canal de ThingSpeak.....	50
 Conclusiones.....	 53
Glosario.....	55
Anexos.....	58
Anexo A. Programación del Nodo Sensor Inalámbrico.....	58
Anexo B. Programacion de la estación Base.....	59
Anexo C. Hojas de datos técnicos.....	61
Anexo D. Lecturas registradas para la figura 4.1 y 4.2.....	74
Referencias bibliográficas.....	77

Índice de figuras.

Capítulo 1.

Figura 1.1. Relación entre la escala Celsius y Fahrenheit .	5
Figura 1.2. Humedad Absoluta .	6
Figura 1.3. Humedad relativa .	6
Figura 1.4. Representación esquemática de un sistema de detección.	7
Figura 1.5. Partes del microcontrolador.	9
Figura 1.6. Diagrama de bloques simplificado de un sistema de comunicaciones inalámbricas.	11
Figura 1.7. Representación de una onda electromagnética (radio) .	12
Figura 1.8. Espectro electromagnético .	13
Figura 1.9. Ecuación fundamental de las ondas electromagnéticas .	13
Figura 1.10. La antena como una región de transición ente ondas guiadas y propagadas .	15
Figura 1.11. Diagrama de bloques del proceso de modulación. .	16
Figura 1.12. Arquitectura de nodo sensor inalámbrico .	18
Figura 1.13. Topología de estrella. .	19
Figura 1.14. Topología de malla .	20
Figura 1.15. Topología de malla en estrella.	20
Figura 1.16. Barrido de frecuencias en una modulación Chirp de espectro ensanchado .	22

Capítulo 3.

Figura 3.1. ESP32-DevKitC V4 con módulo ESP32-WROOM-32. .	33
Figura 3.2. RFM95W .	35
Figura 3.3. DHT11 .	36
Figura 3.4. Modelo teórico de la red propuesta. .	37

Figura 3.5. Diagrama de conexión del nodo sensor inalámbrico.....	38
Figura 3.6. Diagrama de flujo del programa para el nodo sensor inalámbrico.....	40
Figura 3.7. Diagrama de conexión de la estación base.....	41
Figura 3.8. Diagrama de flujo del programa para la estación base.....	43
Figura 3.9. Nodo sensor inalámbrico instalado en el invernadero.....	44
Figura 3.10. Estación base instalada en la oficina del departamento de ciencias agrícolas.	45
Figura 3.12. Humedad y temperatura medida por el sensor	46
Figura 3.13. Mensaje recibido en la estación base.....	47
Figura 3.14. Visualizaciones del campo 1 y 2 del canal de ThingSpeak.....	48

Capítulo 4

Figura 4.1. Gráfica de la temperatura	49
Figura 4.2. Gráfica de la humedad.....	50
Figura 4.3. Visualización de lecturas en el canal de ThingSpeak.....	51
Figura 4.4. Visualización de gráficas en el canal de ThingSpeak	52

Índice de tablas.

Capítulo 1.

Tabla 1.1. Lista de rangos de frecuencia para ondas de radio y sus características asociadas 14

Tabla 1.2. Propiedades de los estándares de comunicación de una red inalámbrica de sensores .21

Capítulo 2.

Tabla 2.1. Valores óptimos de temperatura para diferentes cultivos 29

Tabla 2.2. Valores óptimos de humedad relativa para diferentes cultivos 30

Capítulo 3.

Tabla 3.1. Estimación del costo del proyecto 48

Introducción.

“Agricultura protegida” es el término utilizado para describir una serie de técnicas de cultivo que controlan total o parcialmente el microclima que rodea al cuerpo de la planta, se refiere a tecnologías y técnicas que pueden utilizarse para proteger los cultivos de ciertos elementos ambientales, biológicos y climatológicos con el objetivo de mejorar la producción [18]. Este proyecto se centra en uno de los aspectos más importantes; el monitoreo climático.

La agricultura protegida ha crecido rápidamente en México. En el año 2000 solo había 790 hectáreas en producción, en el 2015 el gobierno reportó 23 251 hectáreas de agricultura protegida, lo que representa una tasa anual compuesta del 25% durante ese periodo. Aproximadamente 80% de la producción se destina a los mercados de exportación [18]. Por ello es de gran importancia impulsar el desarrollo de tecnologías que permitan mejorar dicha producción.

El principal objetivo de la producción en cultivos de invernadero es incrementar los beneficios económicos del agricultor mediante la búsqueda de un equilibrio entre la mejora de la calidad de los productos y el costo de obtener condiciones climáticas adecuadas. Temperatura, humedad, luminosidad, y concentración de CO₂ son las variables climáticas primordiales para el desarrollo y crecimiento de los cultivos [25].

El aumento de la población y demanda de alimentos ejerce presión sobre los sistemas de producción agrícola. En México la agricultura se ha expandido rápidamente en las últimas dos décadas, la innovación tecnológica en este sector se ha consolidado como el principal instrumento para impulsar el crecimiento de la productividad y obtención de mayores beneficios económicos. Sin embargo, la mayoría de los productores del país carecen de recursos tecnológicos para lograrlo [34].

Existe gran variedad de sistemas de control y monitoreo para invernaderos, tales como SCADA, HOBORX3000, por mencionar algunos. Todos ellos son de gran precisión, sin embargo, su costo es muy elevado para la mayoría de los productores del país. Debido a esta limitación el presente trabajo pretende diseñar una solución implementando una red inalámbrica de sensores con tecnología de bajo costo y materiales que estén disponibles en el mercado nacional.

Las redes de sensores inalámbricos (*WSN: Wireless Sensor Network*) consisten en un conjunto de dispositivos llamados nodos sensores que están distribuidos físicamente en un área geográfica para monitorizar condiciones físicas o ambientales, con capacidad de almacenar y comunicar datos en una red de forma inalámbrica. El internet de las cosas (*IoT: Internet of Things*) es una infraestructura global que permite la interconexión de objetos físicos y virtuales. Aprovecha las capacidades de identificación, adquisición de datos, procesamiento y comunicación [14]. Las redes de sensores inalámbricas y el internet de las cosas comparten a la agricultura como un escenario de aplicación.

El sistema presentado se basa en tecnología ESP32, que ofrece conectividad WIFI y Bluetooth Low Energy. El envío de datos se realiza a través de radiofrecuencia por antenas LoRa, que cuenta con protocolos de seguridad y largo alcance de transmisión. La información obtenida será visualizada a través de un canal de ThingSpeak como plataforma de IoT. Finalmente se muestra un análisis del presupuesto para llevar a cabo la implementación del proyecto.

Este documento tiene como objetivo proponer una nueva agricultura inteligente basada en IoT que ayude a los agricultores a obtener datos (temperatura, humedad) para un monitoreo ambiental exitoso y una agricultura inteligente aumentando la producción general y el valor de sus productos.

Objetivo general.

Diseñar una red inalámbrica de sensores que permita el monitoreo de variables climáticas implementado en un cultivo de invernadero.

Objetivos específicos:

- Diseñar un nodo sensor que tome lectura de las variables climáticas más importantes dentro del invernadero.
- Definir una estación base (Gateway) con acceso a internet a través de una red WIFI.
- Establecer un sistema de comunicación inalámbrico entre ambas estaciones.
- Almacenar los datos recibidos en una base de datos en línea y procesar la información para futuras aplicaciones.
- Determinar los costos que lleva la elaboración.

Hipótesis.

La implementación de un sistema de monitoreo a distancia permitirá conocer las variables climáticas dentro del invernadero desde cualquier dispositivo con acceso a internet, a un bajo costo. Con la información obtenida se podrán generar estrategias para mejorar el control climático y así mejorar el cultivo.

Justificación.

La agricultura protegida ha demostrado ser un método eficiente de producción en México, aunque las condiciones climáticas necesarias para la mayoría de los cultivos se dan de manera natural durante casi todo el año, cultivar dentro de invernaderos permite obtener una mayor producción y de mejor calidad. Controlar las variables climáticas es muy importante ya que hasta las más mínimas variaciones pueden influir en el crecimiento de la planta. La mayoría de productores utilizan estándares muy generales, monitorean manualmente y se basan en la experiencia de una persona que percibe si el clima es favorable o no para el cultivo. Este método no permite una lectura precisa dando como resultado que muchos cultivos no tengan características apropiadas para su venta, lo que se traduce en pérdidas para su economía y la del país.

Debido a que los productores no cuentan con la tecnología para monitorear y controlar el microclima en sus invernaderos el presente trabajo busca diseñar un sistema de monitoreo ambiental a bajo costo con elementos de menor consumo energético, fácil de administrar, de escalar y de monitorear, aprovechando las ventajas de la tecnología de red LoRa como otra alternativa de monitoreo ambiental que existe en el mercado. Este proyecto pretende ser la base para crear un sistema de control automático de humedad y temperatura.

Capítulo 1. Marco Teórico.

En este capítulo se proporcionarán las bases teóricas necesarias para abordar el diseño y el funcionamiento del sistema propuesto. Primeramente, se presentan las definiciones de temperatura, humedad y microcontrolador. También se proporcionan los fundamentos de la comunicación inalámbrica y los tipos de redes. Finalmente se muestra lo que es una red inalámbrica de sensores y su relación con el internet de las cosas en la agricultura.

1.1 Temperatura.

Este proyecto está enfocado al desarrollo de un sistema para medir la temperatura, la cual puede ser considerada como una propiedad termodinámica que mide el movimiento de las moléculas en un objeto. A medida que la temperatura del sistema aumenta, el movimiento de las moléculas también [13]; por el contrario, menos movimiento resulta en temperaturas más bajas. La temperatura es la variable climática que influye directamente en el crecimiento de los cultivos.

Existen diferentes escalas para medir la temperatura de acuerdo con el sistema de medición que se maneje. En el Sistema Internacional se utiliza la escala Celsius y en el Sistema Inglés la escala Fahrenheit. Según la escala internacional de temperatura de 1990 (ITS-90) establece el punto triple del agua y el punto de ebullición como dos puntos de referencia para medir la temperatura. El punto triple del agua es el estado en el cual coexisten en equilibrio las tres fases del agua y se le designó el valor de 0.01°C. El punto de ebullición a 1 atm se estableció en 99.975°C [3].

$$T(^{\circ}F) = [1.8 * T(^{\circ}C)] + 32^{\circ}$$

Figura 1.1. Relación entre la escala Celsius y Fahrenheit [3].

1.2 Humedad.

La humedad es la cantidad de moléculas de agua que contiene el aire, hay varias formas de expresar la humedad, consideraremos la humedad absoluta y la humedad relativa. La humedad absoluta se define como la masa de agua contenida por unidad de volumen de aire, es decir, como la densidad de vapor de agua [38].

$$\rho = \frac{mv}{V}$$

Figura 1.2. Humedad Absoluta [38].

Donde:

ρ : Humedad absoluta (g/m^3).

mv : Masa de agua (g).

V : Volumen de aire (m^3).

La humedad relativa es la relación expresada en tanto por ciento, entre la masa de vapor de agua contenido en un volumen dado de aire y la masa de vapor de agua que contendría ese mismo volumen si estuviera saturado, es decir, a un nivel máximo [38].

$$h = \frac{mv}{mvs} \times 100$$

Figura 1.3. Humedad relativa [38].

Donde:

h : Humedad relativa.

mvs : Volumen en saturación.

La humedad es una variable de importancia para el cuidado de los cultivos en invernadero. La baja humedad relativa conduce a la reducción de la fotosíntesis. La saturación de vapor de agua puede provocar la aparición de enfermedades fúngicas [25].

1.3 Sensores.

Un sensor es un dispositivo que responde a los estímulos, o una cantidad de entrada, generando salidas procesables. Comúnmente lo conforman dos componentes principales: un elemento sensible y un transductor. El elemento sensible tiene la capacidad de interactuar con un objeto a medir y causar un cambio en la operación del transductor, afectado por este cambio, el transductor produce una señal, que se traduce en información legible por un sistema de adquisición de datos [16].

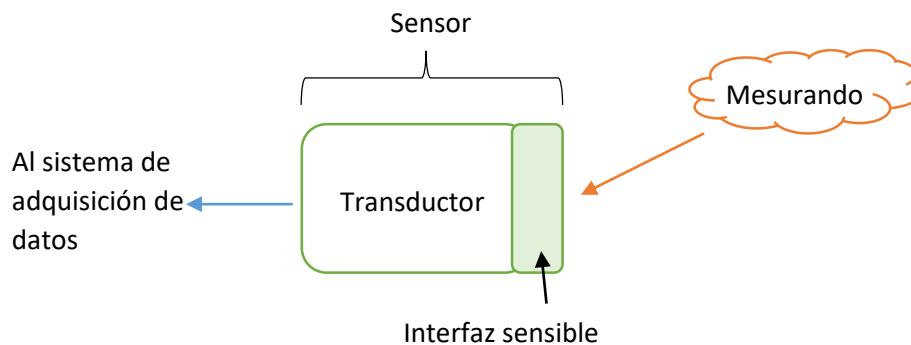


Figura 1.4. Representación esquemática de un sistema de detección.

Los sensores permiten que los sistemas interactúen con sus entornos y reciban la información deseada. Esta información se envía a un sistema donde se procesa en forma significativa y puede descifrarse directamente como la salida buscada o alimentar a otro sistema para un procesamiento adicional [16]. Algunas de las características más importantes de los sensores son las siguientes.

Precisión: Representa la exactitud de la señal de salida en comparación con el valor real medido. Para evaluar la precisión, el sistema se compara con una medida estándar o con un sistema de medición con una precisión superior [16].

Rango de medición: Se denomina rango de medición a los valores máximos y mínimos que se pueden medir con un sistema de detección, este rango da como resultado una salida significativa y precisa para el sistema. Todos los sistemas de detección están diseñados para funcionar en un rango específico, las señales fuera de este rango pueden ser ininteligibles, causar imprecisiones e incluso pueden provocar daños irreversibles en el sensor [16].

Sensibilidad: Es la relación entre el cambio incremental en la salida del sensor con respecto al cambio del mensurado en la entrada. Un sensor ideal tiene una sensibilidad grande y preferiblemente constante en un rango operativo [16].

Error: El error es la diferencia entre el valor real medido y el valor medido por el sistema de detección. Puede ser causado por una variedad de fuentes internas y externas, generalmente se producen por fluctuaciones en la señal de salida [16].

Ruido: Las variaciones no deseadas en la señal de salida del sistema de detección, cuando el mensurado no cambia, se conocen como ruido. Las señales electromagnéticas, como las producidas por los circuitos de transmisión/recepción y las fuentes de alimentación, las vibraciones mecánicas y los cambios de temperatura ambiente, son ejemplos de ruido [16].

1.4 Microcontrolador.

Un microcontrolador es un circuito integrado que contiene la estructura de un ordenador, la arquitectura más simple consta de una unidad central de procesos, memoria y puertos de entrada y salida. Estas tres partes básicas se encuentran integradas en un solo circuito.

Con base en entradas realiza operaciones lógicas y aritméticas que pueden almacenar datos para generar salidas, estas operaciones se implementan mediante instrucciones en orden secuencialmente lógico. Funciona con un conjunto de instrucciones almacenadas en una memoria, estas instrucciones se conocen como programa de usuario. Bajo el control de este programa, los datos que se reciben de dispositivos de entrada, se manipulan y luego se envían a dispositivos de salida [26]

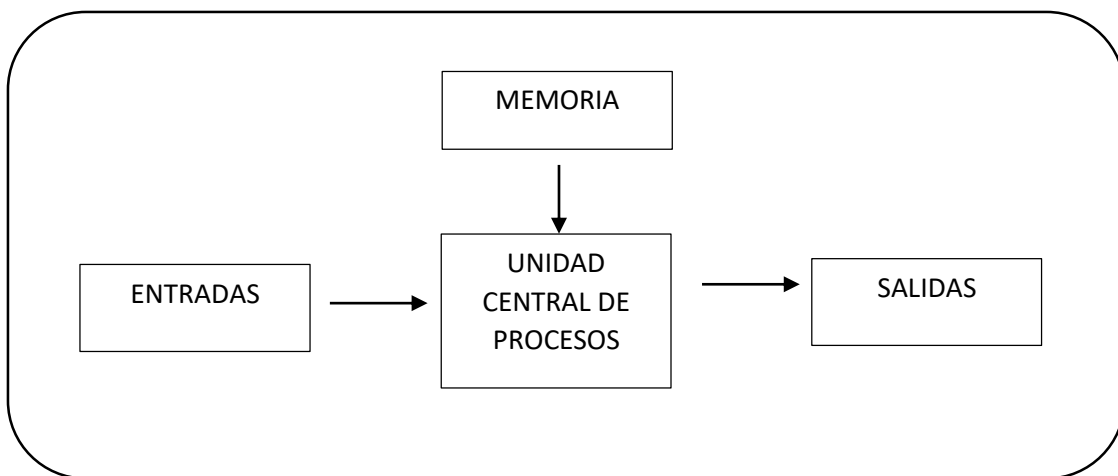


Figura 1.5. Partes del microcontrolador.

1.4.1 Unidad central de procesos.

Es el cerebro del microcontrolador. Realiza todas las operaciones aritméticas y lógicas, decodifica las instrucciones y busca los datos necesarios para procesarlas. Controla las operaciones internas y envía señales de control a otras partes del microcontrolador para llevar a cabo las operaciones requeridas [4].

1.4.2 Puertos de entrada y salida.

Son unidades básicas que tiene el microcontrolador para comunicarse con elementos externos, cada puerto está conformado por un grupo de pines del circuito integrado y se pueden usar como entradas y/o salidas de datos. Además, algunos pines cuentan con características especiales de lectura analógica, salidas PWM, comparadores, temporizadores, de comunicación serial, entre otros [26].

1.4.3 Memoria.

La memoria es aquella unidad que almacena la información del sistema, básicamente podemos clasificar la memoria en dos grupos: memoria de programa (ROM: Read Only Memory) y memoria de datos (*RAM: Random Access Memory*). La memoria del programa almacena los programas del usuario y esta memoria suele ser no volátil, es decir, los datos son permanentes y no se pierden después de desconectar la alimentación. La memoria de datos almacena los datos temporales utilizados en un programa y esta memoria suele ser volátil, es decir, los datos se pierden después de desconectar la alimentación. Tiene poca capacidad pues sólo contiene los cambios de información que se produzcan en el transcurso de la ejecución del programa [4].

1.5 Comunicación inalámbrica.

La comunicación inalámbrica es aquella en la que el emisor y el receptor no se encuentran unidos por algún medio cableado, utilizan ondas electromagnéticas para intercambiar información de un lugar a otro. La transmisión, recepción y procesamiento de esta información se realiza mediante circuitos eléctricos.

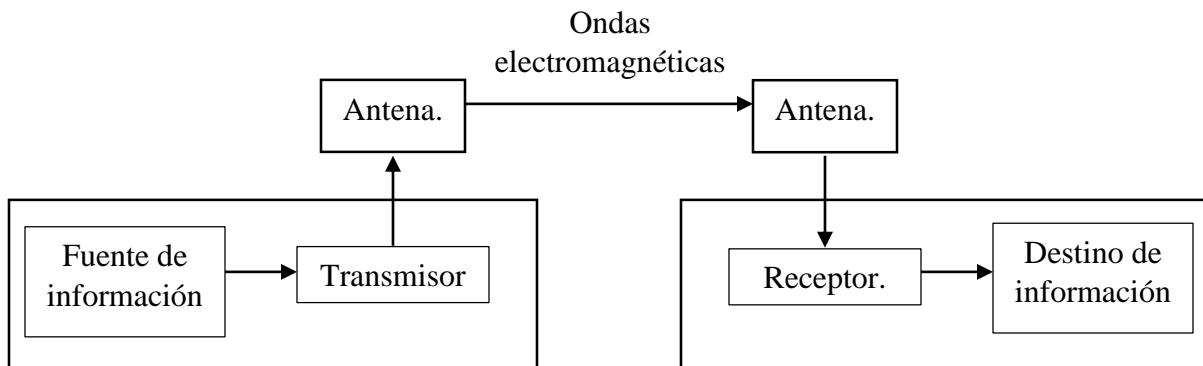


Figura 1.6. Diagrama de bloques simplificado de un sistema de comunicaciones inalámbricas.

Un transmisor es un conjunto de dispositivos que convierten la información de la fuente original en energía electromagnética. Las ondas electromagnéticas transportan las señales desde el transmisor hasta el receptor, este acepta las señales y las reconvierte a su forma original [32].

1.5.1 Ondas electromagnéticas.

Estas ondas son la combinación de campos eléctricos y magnéticos perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación de la onda generados por una corriente que oscila dentro de un alambre conductor. El electromagnetismo estudia el campo eléctrico y magnético unificado como un mismo concepto gracias a las leyes de Maxwell, que proporcionan la base fundamental de todas las ondas electromagnéticas.

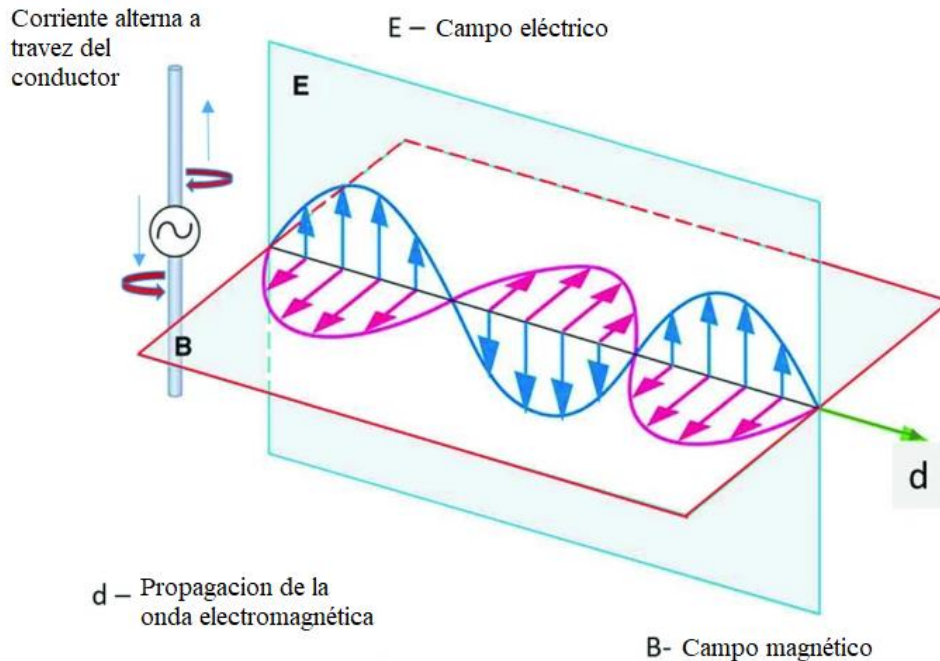


Figura 1.7. Representación de una onda electromagnética (radio) [24].

La oscilación del campo eléctrico genera un campo magnético, que oscila a su vez para crear nuevamente un campo eléctrico. Esto se demuestra gracias a las ecuaciones de rotación de Maxwell. La interacción entre ambos campos almacena energía y por lo tanto transmite la potencia a lo largo del vector de propagación. La variación de las propiedades de la onda (amplitud, frecuencia o fase) permite que la información sea transportada entre la fuente y el destino, que es el propósito de un sistema de comunicación inalámbrica [27].

1.5.2 Espectro electromagnético.

La distancia entre dos picos sucesivos en una onda electromagnética es conocida como longitud de onda. Esta propiedad hace que cada onda tenga un comportamiento distinto con su entorno y permite clasificar a todas las ondas en un conjunto conocido como espectro electromagnético.

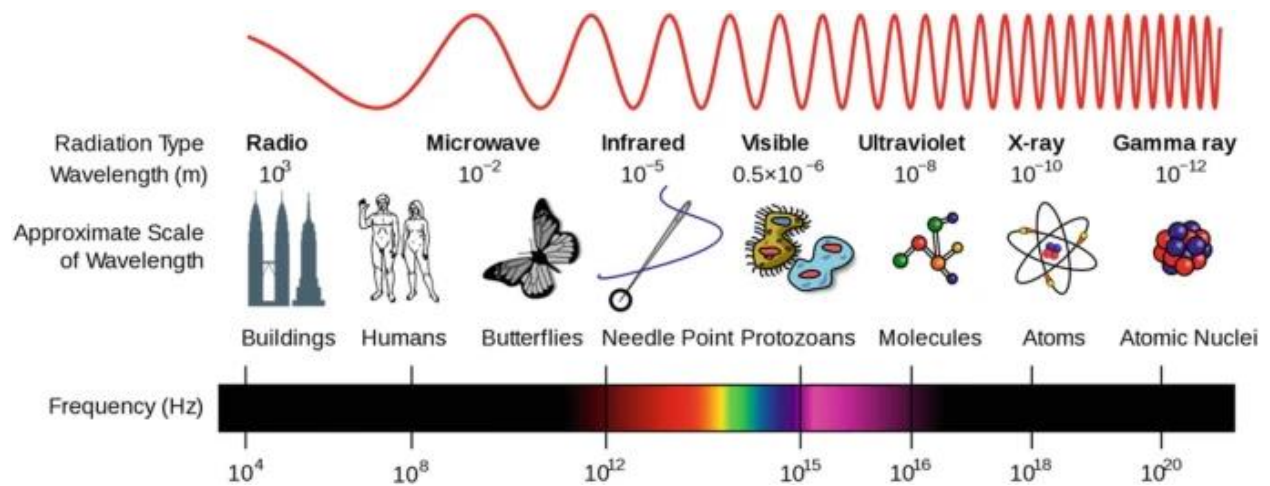


Figura 1.8. Espectro electromagnético [35].

Otra característica de las ondas electromagnéticas es la frecuencia, que es el número de veces que cambia el sentido del campo electromagnético en un segundo. La longitud de onda y la frecuencia son inversamente proporcionales. En el espacio libre las ondas electromagnéticas se propagan a la velocidad de la luz. Por lo tanto, se rigen por la ecuación.

$$C = f * \lambda$$

Figura1.9. Ecuación fundamental de las ondas electromagnéticas [24].

Donde:

C: Velocidad de la luz, aproximadamente $3 \times 10^8 \frac{m}{s}$.

f: Frecuencia (Hz).

λ : Longitud de la onda (m).

Las ondas de radio son el recurso común para la comunicación inalámbrica. La unión internacional de telecomunicaciones designa 12 bandas de radio con las frecuencias y longitudes de onda enumeradas en la siguiente tabla.

Tabla 1.1. Lista de rangos de frecuencia para ondas de radio y sus características asociadas [35].

Nombre	Rango de frecuencia	Rango de onda
ELF (frecuencia extremadamente baja)	3–30 Hz	100 000–10 000 km
SLF (frecuencia súper baja)	30–300 Hz	10.000–1.000 kilómetros
ULF (frecuencia ultrabaja)	300–3000 Hz	1000–100 kilómetros
VLF (muy baja frecuencia)	3–30kHz	100–10 kilómetros
LF (baja frecuencia)	30–300kHz	10–1 km
MF (frecuencia media)	300 kHz–3 MHz	1000–100 m
HF (alta frecuencia)	3–30 MHz	100–10 m
VHF (Muy Alta Frecuencia)	30 MHz–300 MHz	10-1 metro
UHF (frecuencia ultra alta)	300 MHz–3 GHz	1-0,1 m
SHF (frecuencia súper alta)	3 GHz–30 GHz	10-1cm
EHF (frecuencia extremadamente alta)	30–300 GHz	10–1 mm
THF (frecuencia tremendamente alta)	0,3 THz–30 THz	1–0,1 mm

1.5.3 Antenas.

Una antena es un elemento conductor eléctrico que transmite o recibe señales en forma de ondas de radio, son la interfaz entre el mundo de la electrónica y el mundo de la radiación electromagnética. La fuerza detrás de las ondas electromagnéticas emitidas por una antena es una corriente eléctrica. La corriente es el flujo de electrones por unidad de tiempo, se mide en amperes.

Mientras más carga fluya través de un circuito, mayor será la corriente y la radiación emitida por la antena [35].

Para generar una onda electromagnética a partir de un conductor es necesario aplicar una corriente alterna en forma de ondas guiadas. Una corriente alterna es aquella en la que los electrones se mueven hacia adelante y hacia atrás de manera senoidal dentro del conductor a una frecuencia determinada. Las antenas aprovechan esta propiedad para transmitir información en forma de ondas electromagnéticas.

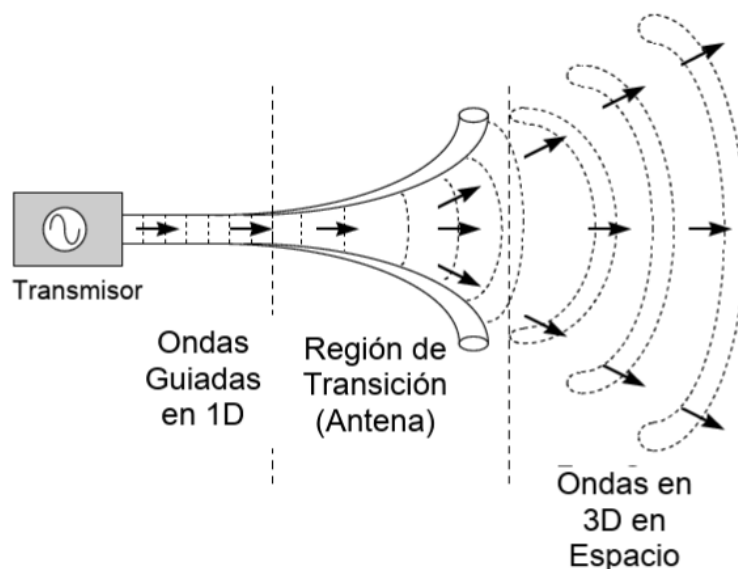


Figura 1.10. La antena como una región de transición ente ondas guiadas y propagadas [27].

1.5.4 Modulación.

Para poder propagar la información en una antena es necesario aplicar un conjunto de técnicas conocidas como modulación, en este proceso la información que se desea transmitir se denomina señal moduladora. Esta señal modula a otra de mayor frecuencia llamada portadora, cambiando su amplitud, su frecuencia o su fase en proporción con la señal de información. La

modulación permite aprovechar mejor la comunicación inalámbrica ya que los sistemas de transmisión son más eficientes a altas frecuencias.

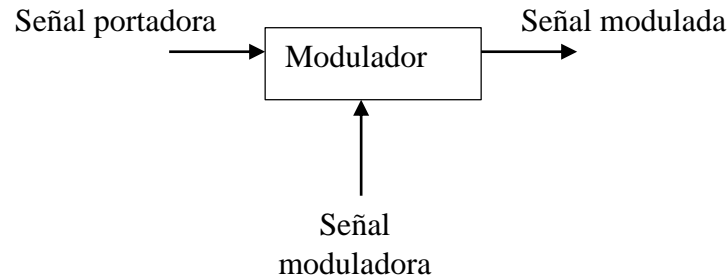


Figura 1.11. Diagrama de bloques del proceso de modulación.

La modulación se hace en un transmisor mediante un circuito llamado modulador. Una portadora sobre la que ha actuado una señal de información se llama señal modulada. La demodulación es el proceso inverso a la modulación y reconvierte a la portadora modulada en la información original. La demodulación se hace en un receptor, con un circuito llamado demodulador [32].

1.6 Red de sensores inalámbrica.

Las redes de comunicaciones son un conjunto de dispositivos conectados entre sí para enviar datos, compartir información y ofrecer servicios, la información se puede transmitir a través de diversos medios como el cable de cobre, fibra óptica, el aire o espacio libre. Las redes inalámbricas permiten a los usuarios comunicarse y transferir datos entre sí sin ningún medio cableado entre ellos.

Una red de sensores inalámbrica (*WSN: Wireless Sensor Network*) consta de dispositivos autónomos llamados nodos, distribuidos en un espacio determinado que utilizan sensores para

monitorear condiciones físicas o ambientales en diferentes ubicaciones. Los nodos comunican la información recolectada a una estación base a través de enlaces de radio. La estación base procesa, almacena y controla los datos de la red. Estas redes no requieren una infraestructura como tal, la comunicación inalámbrica permite una fácil implementación, control y mantenimiento [5].

Cuentan con una cantidad de energía limitada a una batería, por ello utilizan protocolos de bajo consumo energético. Tienen capacidades integradas de detección, actuación y almacenamiento. El entorno en el que opera una red de sensores puede monitorear fenómenos físicos como humedad, temperatura, presión, sonido, etcétera. También puede monitorear manifestaciones observables, como fallas en otros sistemas.

1.6.1 Nodo sensor inalámbrico.

Los nodos de sensores inalámbricos son los componentes básicos de esta red. Su propósito es “detectar, procesar e informar”. Deben ser pequeños, energéticamente eficientes y capaces de reprogramarse en sitio. Son el resultado de la combinación de tecnologías de la información, mecanismos de comunicación y sensores con electrónica digital altamente integrada. Los nodos consisten en una variedad de sensores, un microcontrolador para la comunicación integrada y el procesamiento de señales, memoria, transceptor de radio con antena para la comunicación con los nodos vecinos, fuente de alimentación y circuitos de apoyo [28].

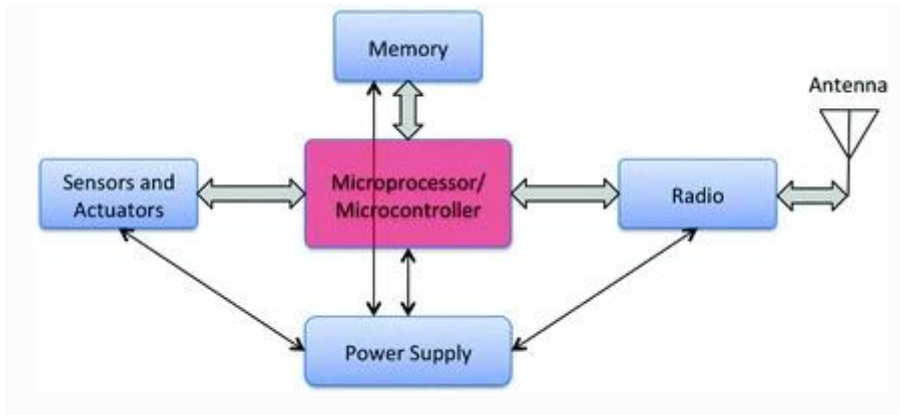


Figura 1.12. Arquitectura de nodo sensor inalámbrico [28].

Las radios que pueden transmitir y recibir información se conocen como transceptores. La cobertura de la red y la capacidad de datos dependen en gran medida de la frecuencia y el tipo de modulación utilizada [29].

La elección de los componentes depende del tipo de aplicación para la que está destinado el nodo. En la mayoría de los casos los requisitos de hardware y software son de formato pequeño, con un uso eficiente de la energía y una alta seguridad en la transmisión de la información.

1.6.2 Estación base.

La estación base (*Gateway*) es el dispositivo encargado de recopilar la información capturada por los nodos sensores en una base de datos. Cuenta con un transceptor de radio para la comunicación y suministro de energía eléctrica. La estación actúa como puerta de enlace entre la red de sensores inalámbrica y una infraestructura fija, por ejemplo, internet [37]. De esta forma se puede monitorear la actividad de la red sin estar cerca de ella.

1.6.3 Topología.

La topología se refiere a como se organizan física y lógicamente los elementos dentro de una red. Los nodos y la estación base se diseñan como un punto, la trayectoria de transmisión como una línea. Los cambios en la estructura producen un impacto en el rendimiento de la red.

Topología de estrella.

En esta topología los nodos se organizan en forma de estrella alrededor de la estación base. Ofrece un bajo consumo de energía en comparación con otras topologías. Si la estación base fallara, todo el sistema colapsaría [28].

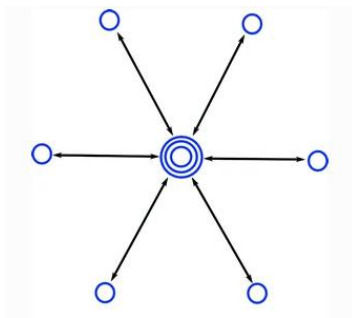


Figura 1.13. Topología de estrella: Todos los nodos se conectan directamente con la base y así con el resto de la red [28].

Topología de malla.

Una topología de malla tiene nodos sensores que comunican datos entre ellos. Si un nodo sensor requiere enviar datos a un nodo fuera de rango, puede utilizar otro nodo como medio de comunicación intermedio. Una ventaja de esta topología es que, si falla un nodo sensor, es posible la comunicación con otros nodos que se encuentran dentro del rango de comunicación. Una desventaja importante es que esta topología usa más energía debido a la transmisión de datos [28].

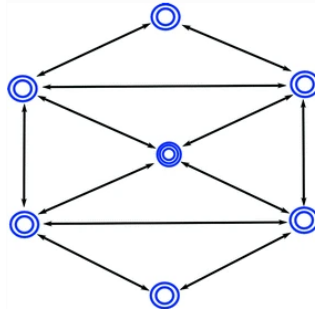


Figura 1.14. Topología de malla: los nodos no tienen que conectarse directamente a la estación base, ya que pueden comunicarse con ella a través de otros nodos [28]

Topología de malla en estrella.

Tiene propiedades de las topologías de malla y estrella. Aprovecha el bajo consumo de energía presente en la topología en estrella, mientras garantiza una ruta para que los datos lleguen a su destino. En la implementación de esta topología, los nodos en el borde de la red suelen ser nodos de baja energía, mientras que los nodos en el corazón de la malla tienen mayor potencia [28].

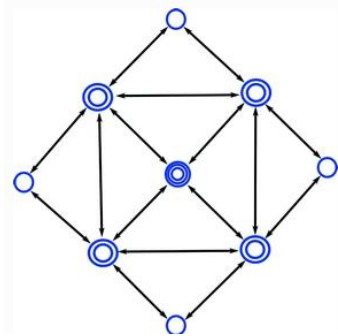


Figura 1.15. Topología de malla en estrella: los sensores con capacidades de enrutamiento están conectados en una malla, de modo que los sensores regulares pueden comunicarse con la estación base [28].

1.6.4 Estándares de comunicación.

Un estándar es un conjunto de acuerdos que contienen especificaciones técnicas y asegura que los productos o procesos cumplirán con su propósito, los estándares de sensores inalámbricos se han desarrollado con un requisito de diseño clave para un bajo consumo de energía. Definen las funciones y los protocolos necesarios para que los nodos sensores interactúen con una variedad de redes [8]. La Unión Internacional de telecomunicaciones y el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos son organismos encargados de establecer las normas y promoverlas en todo el mundo para regular la transmisión en los sistemas de telecomunicaciones.

El objetivo de estos estándares es permitir que los sensores de diferentes fabricantes trabajen juntos sin intervención humana ni personalización [15]. Los estándares de comunicación que están específicamente destinados a las redes de sensores inalámbricos de baja potencia se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1.2. Propiedades de los estándares de comunicación de una red inalámbrica de sensores [15].

Standard	Frequen- cy (MHz)	Data rate (kbps)	Protocol layers					Security	
			PHY	MAC	NWK	TRP	APS	ACL	Encryption
IEEE 802.15.4	868	20	●	●	○	○	○	●	●
	915	40	●	●	○	○	○	●	●
	2400	250	●	●	○	○	○	●	●
ZigBee ¹	-	-	○	○	●	●	●	●	●
6LoWPAN ¹	-	-	○	○	●	○	○	●	●
WirelessHART ²	2400	250	●	●	●	●	●	●	●
ISA100.11a ²	2400	250	●	●	●	●	●	●	●
Z-Wave	865	40	●	●	●	○	●	○	○
	915	40	●	●	●	○	●	○	○
Bluetooth									
Low Energy	2400	1000	●	●	●	●	●	●	●
ANT/ANT+	2400	1000	●	●	●	○	●	●	○
ONE NET	868/	38.4	○	●	●	○	○	●	●
	915	230	○	●	●	○	○	●	●
DASH7	433	27.8	●	●	○	○	○	○	○
IEEE 1902.1 RuBee	0.131	1.2	●	●	○	○	○	○	○

¹ Uses IEEE 802.15.4 as PHY and MAC layers

² Uses IEEE 802.15.4 as PHY layer

1.6.5 Tecnología de red LoRa.

LoRa (*Long Range*) es una tecnología de comunicación inalámbrica que proporciona un largo alcance y un bajo consumo de energía de operación, una tasa de datos baja y una transmisión de datos segura. Puede integrarse fácilmente con otros tipos de redes para crear un mayor alcance, su uso es adecuado para escenarios en los que solo se necesita transmitir una pequeña cantidad de datos [29]. Implementa una modulación derivada de la tecnología Chirp de espectro ensanchado (*CSS: Chirp Spread Spectrum*) que utiliza pulsos modulados en frecuencia de banda ancha para codificar información. Un pulso chirp es un barrido de frecuencia en el ancho de banda, es decir, una rampa creciente o descendiente que se desplaza cíclicamente y este cambio de ciclo es el que transporta la información codificada.

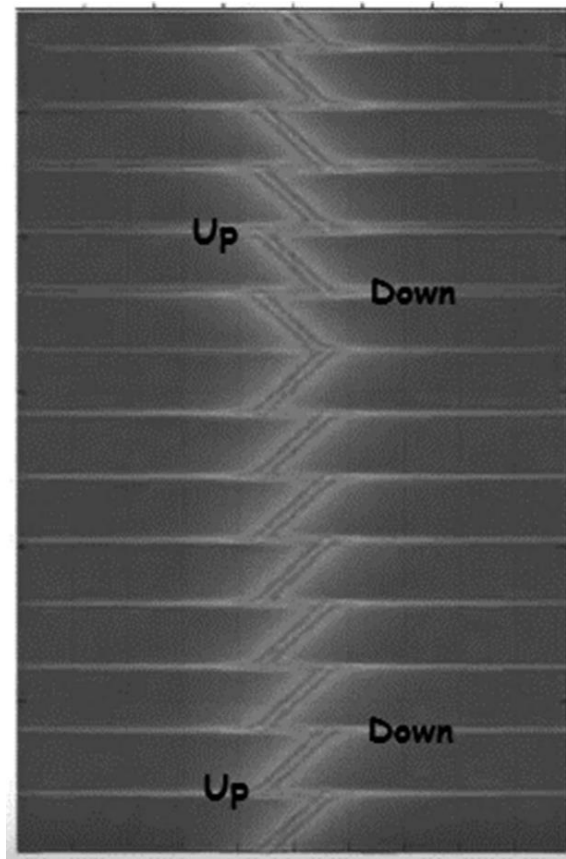


Figura 1.16. Barrido de frecuencias en una modulación Chirp de espectro ensanchado [29].

El número de barridos de frecuencia que se pueden codificar en un bit se denomina factor de dispersión (*SF: Spreading Factor*). Los factores de dispersión pequeños proporcionan velocidades de datos altas y requieren menos tiempo de transmisión a diferencia de factores de dispersión grandes que proporcionan velocidades de datos bajas y requieren más tiempo de transmisión [29].

Otra característica importante de esta tecnología es que incluso si se usara la misma frecuencia en diferentes terminales, estos dispositivos no se verían interferidos entre sí y podrían recibir y procesar datos de múltiples nodos en paralelo. La tecnología LoRa define la capa física de un sistema de red. El protocolo LoRa funciona en las bandas de radiofrecuencia libres, como 868 MHz en Europa, 915 MHz en América y 923 MHz en Asia. LoRa permite una distancia de transmisión ultra larga (más de 10 km) con un consumo de energía muy bajo [36].

Para poder integrar la información de un sistema de comunicación LoRa con otras redes se desarrolló LoRaWAN. Esta es una red de área amplia de largo alcance que define el protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema para la capa de red. Administra la comunicación entre las puertas de enlace y los dispositivos finales [29].

Esta comunicación se logra sobre la base de diferentes frecuencias y tasas de transmisión de datos. La selección de tasas de datos requiere un equilibrio entre la distancia de transmisión y el retraso del mensaje. La velocidad de transmisión de datos de LoRaWAN oscila entre 0,3 Kbps y 37,5 Kbps [36].

1.7 Internet de las cosas (IoT).

Internet de las cosas (IoT) se puede definir como la interconexión de cualquier objeto a internet. Se utiliza para detectar, procesar y reportar información del mundo real con un enfoque personal, profesional o social. Se concibe como miles de millones de sensores conectados a Internet generando una gran cantidad de datos que deben analizarse, interpretarse y utilizarse [12]. Las aplicaciones de esta tecnología son innumerables, tanto para nuestra vida cotidiana como para la industria. El alcance de IoT es enorme ya que interconecta dispositivos inteligentes, máquinas y humanos en todo el mundo.

Internet proporciona una plataforma para el intercambio de información entre usuarios. En comparación, IoT puede conectar "cosas" que no sean humanos, como sensores, controladores e incluso animales, plantas, suelo y equipos a Internet. Por lo tanto, IoT es una extensión de Internet, una extensión que incluye usuarios no humanos. Los sensores, controladores y redes de comunicación de datos alámbricos e inalámbricos son los elementos esenciales [36].

Las redes de sensores inalámbricos también se pueden considerar como una base importante para IoT, ya que principalmente interconectan sensores inteligentes para detectar e informar.

1.7.1 Sistema IoT agrícola.

IoT agrícola (Ag IoT) es una aplicación de la tecnología IoT en la producción y gestión de servicios agrícolas. Conecta varios sensores y redes de transmisión de datos para recibir rápidamente información, permite una gestión de producción más efectiva al optimizar la operación, aumentando así el rendimiento y los ingresos. La integración efectiva de IoT y la agricultura transforman la producción agrícola del modo tradicional a un modo de producción inteligente basado en una mayor productividad y rentabilidad [36].

Ag IoT se compone principalmente de tres capas: la capa de percepción de la información, la capa de transmisión y la capa de aplicación del sistema. La capa de percepción recopila información de los cultivos, el suelo y el medio ambiente a través de varias tecnologías de detección. Dicha información incluye, por ejemplo, nutrientes, humedad, temperatura, intensidad de luz, etcétera. La capa de transmisión envía los datos recopilados en la capa de percepción. Zigbee, LoRa, GPRS, Wi-Fi y Bluetooth son medios de redes inalámbricas comúnmente utilizados para la transmisión de datos, las tecnologías involucradas incluyen un mecanismo de transmisión de baja potencia y alta confiabilidad. La capa de aplicación incluye el sistema de gestión de información inteligente y el sistema de control automático. Se utiliza para alojar elementos de procesamiento de datos, análisis de información, razonamiento inteligente y el control de producción de agricultura [36].

Se requiere una larga distancia de transmisión inalámbrica entre los nodos sensores en el campo y su distancia al centro de recepción, ya que suelen estar instalados a varios kilómetros de distancia. Además, los nodos de sensores ubicados en tierras de cultivo a menudo dependen de baterías o cargadores solares para el suministro de energía. Por lo tanto, es muy deseable tener nodos de sensores que presenten un bajo consumo de energía adecuado para un uso a largo plazo.

Por otra parte, la adquisición de información agrícola no tiene que completarse en tiempo real, y un cierto grado de retraso en el proceso de transmisión de dichos datos no causaría muchos problemas. La producción agrícola se lleva a cabo en un entorno natural donde aparecen con frecuencia condiciones extremas, como temperaturas anormalmente cálidas o frías, fuertes lluvias, nevadas y vientos muy fuertes. Se espera que los dispositivos IoT instalados en el campo funcionen de manera adecuada y confiable en todas esas condiciones. Por lo tanto, un requisito fundamental para los dispositivos implementados en el campo es la capacidad de hacer frente a condiciones ambientales [36].

Capítulo 2: Marco referencial.

2.1 Aspectos generales de un invernadero.

Un invernadero es aquella estructura que protege el cultivo de la lluvia y el viento mediante una cubierta, en forma de membrana plástica o de vidrio, permite el paso de la radiación solar y dificulta la pérdida de calor [23, pág 2]. Su objetivo es crear las condiciones climáticas adecuadas para el crecimiento de las plantas cultivadas en su interior, esto con la finalidad de aumentar la producción y mejorar su calidad.

El diseño de invernaderos depende de las condiciones climáticas del lugar, cada región requiere de un invernadero diferente, que mejore el ambiente interno en función de las condiciones externas. Crear un nuevo clima dentro del invernadero permite establecer mejoras que hagan posible aumentar la producción y aprovechar la radiación térmica del sol manteniendo el calor dentro del invernadero durante la noche.

2.2 Importancia del clima dentro del invernadero.

2.2.1 Radiación.

La radiación solar se transmite a través de la cubierta del invernadero en forma de calor, esta influirá tanto en la actividad fotosintética del cultivo como en el balance energético. La radiación utilizada por las plantas para su crecimiento se conoce como radiación fotosintéticamente activa.

Esta radiación es absorbida en parte por el suelo, la planta y los objetos dentro del invernadero. Influye en el desarrollo de las plantas porque es un factor necesario en el proceso de la fotosíntesis. Las elevadas intensidades luminosas acompañadas de altas temperaturas producen un activo crecimiento vegetativo. Dependiendo de la concentración del dióxido de carbono en el

interior del invernadero, se puede incrementar la actividad fotosintética generando el desarrollo de cultivos más fuertes y de mejor calidad. La cantidad de absorción de dióxido de carbono es proporcional a la cantidad de radiación solar recibida [23].

2.2.2 Temperatura.

La temperatura es un factor determinante en la actividad metabólica, crecimiento y desarrollo de las plantas, en ellas los procesos fisiológicos están íntimamente ligados con la temperatura, cambios bruscos de temperatura también producen cambios similares en los procesos metabólicos lo cual compromete la productividad. Si la distribución de la temperatura dentro del invernadero no es uniforme también se verá afectado el cultivo [1].

Dentro del invernadero es la variable de mayor peso ya que interviene de manera directa en el crecimiento y desarrollo de las plantas cada especie vegetal tiene definido un rango óptimo. El objetivo del invernadero es mantener este rango usando un sistema de control climático, la planta responde de manera negativa a temperaturas fuera de su rango si la temperatura está por debajo del límite los procesos metabólicos se detienen. En cambio, si la temperatura excede el límite máximo se incrementa la transpiración y con ello el riesgo de deshidratación [23].

Tabla 2.1. Valores óptimos de temperatura para diferentes cultivos [19].

Especie	T óptima nocturna (°C)	T óptima diurna (°C)
Tomate	13-16	22-26
Pepino	18-20	24-18
Melón	18-21	24-30
Calabaza	15-18	24-30
Chaucha	16-18	21-28
Pimiento	16-18	22-28
Berenjena	15-18	22-26
Lechuga	10-15	15-20

2.2.3 Humedad relativa.

La humedad relativa es la cantidad de vapor de agua contenida en el aire del invernadero con relación a la cantidad máxima que este podría retener. Es uno de los factores climáticos que es necesario considerar para obtener un adecuado desarrollo en el cultivo bajo invernadero, el impacto de la humedad es menos conocido por la dificultad de su control. Tiene importancia desde el punto de vista eco fisiológico ya que junto a la temperatura de las hojas determina el proceso transpiratorio de la planta. Si la humedad es excesiva dificulta la evaporación y si es escasa aumenta la transpiración hasta llegar a dificultar la fotosíntesis, el aire del invernadero se enriquece del agua proveniente del suelo y de la transpiración de las plantas, esto es favorable en lugares con poca humedad, pero es un problema en zonas donde la naturaleza del clima es bastante húmedo. La manera más común de expresar el vapor de agua en el aire es la humedad relativa en valores porcentuales [19].

Tabla 2.2. Valores óptimos de humedad relativa para diferentes cultivos [19].

Producto	Humedad
Tomate	55-60%
Pimiento	65-70%
Berenjena	65-70%
Melón	60-80%
Acelga	60-70%
Lechuga	60-80%
Sandía	65-75%
Apio	65-80%
Frutilla	60-70%
Pepino	70-90%
Clavel	70-80%
Rosa	70-75%
Gerbera	60-70%

2.3 Importancia del cultivo en invernaderos en México.

En México, la producción bajo invernadero es un sector importante para la agricultura nacional y la economía del país. La diversidad de ecosistemas y las características del clima representan el factor clave que permite cultivar una gran variedad de productos durante todo el año.

La agricultura protegida en los últimos años ha estado en constante crecimiento. En el 2015 se reportaron 23 mil 250 hectáreas, según el SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera), dependiente de la Sagarpa. El 66% corresponde a invernaderos, 11% a macro túneles, 10% a casa sombra, 5% a micro túneles, 5% a techo sombra y 3% a pabellón [30].

Entre las ventajas de este sistema de producción se encuentra la generación de 8 empleos directos por hectárea, además de un incremento en algunos cultivos de hasta 5 veces la producción con relación al campo; por ejemplo, los rendimientos promedio del tomate a campo abierto oscilan entre las 70 toneladas, muy reducido comparado con las 350 toneladas cosechadas en agricultura protegida. Otra ventaja es la producción durante todo el año, la cual permite tener precios competitivos en el mercado [23].

El tomate rojo o jitomate es una de las especies hortícolas más importantes tanto económica como socialmente en México por su valor de producción. Es la mayor aportación vegetal de México para el mundo. En el periodo enero-diciembre de 2015, México exportó mil 667 millones de dólares de tomate rojo o jitomate, según datos del SIAP [30]. México es el principal exportador mundial de esta hortaliza, cuyo principal destino es Estados Unidos. Su aceptación en las diversas culturas se evidencia por ser el segundo producto hortícola en el consumo mundial, y por generar una gran cantidad de empleos para el país. El rápido desarrollo de la industria del tomate en el invernadero ha ocasionado un gran impacto en la dinámica de producción nacional, lo que mantiene una perspectiva de crecimiento importante.

Capítulo 3: Diseño e implementación.

En esta sección se presenta el diseño de la red inalámbrica de sensores y su implementación. Primero se abordan a profundidad los aspectos técnicos de los dispositivos utilizados para la construcción de la red. También se detallan las características de la plataforma de Internet of Things que gestiona los datos. Después se describe la red y la metodología empleada. Por último, se implementa el proyecto para monitorear el clima dentro del IDIAP (Invernadero de Docencia e Investigación en Agricultura Protegida) de la carrera de Ingeniería Agrícola.

Este invernadero se ubica dentro de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, sus coordenadas son: 19°41'39.2" N y 99°11'29.3" O. En él se ha cultivado jitomate, pepino y chile, este tipo de hortalizas requieren de condiciones climáticas ligeramente cálidas ya que no toleran bajas temperaturas por periodos prolongados, la temperatura ideal para su crecimiento se encuentra entre los 20 y 24 °C. Para diseñar el presente trabajo se seleccionaron los siguientes dispositivos, ya que sus características cumplen las necesidades del proyecto.

3.1 Dispositivos seleccionados.

3.1.1 ESP32.

ESP32-DevKitC V4 es una placa de desarrollo basada en ESP32 producida por Espressif Systems. Su diseño está dirigido a una amplia variedad de aplicaciones, que van desde redes de sensores de baja potencia e Internet de las cosas (IoT), hasta las tareas más exigentes, como la codificación de voz, transmisión de música y decodificación de MP3 [6]. El núcleo de esta placa es el módulo ESP32-WROOM-32 que ofrece comunicaciones inalámbricas Bluetooth y WIFI de 2.4 GHz, microprocesador de doble núcleo con frecuencias de hasta 240 MHz, coprocesador de ultra bajo consumo energético. En el anexo "D" se muestra la hoja de datos técnicos.

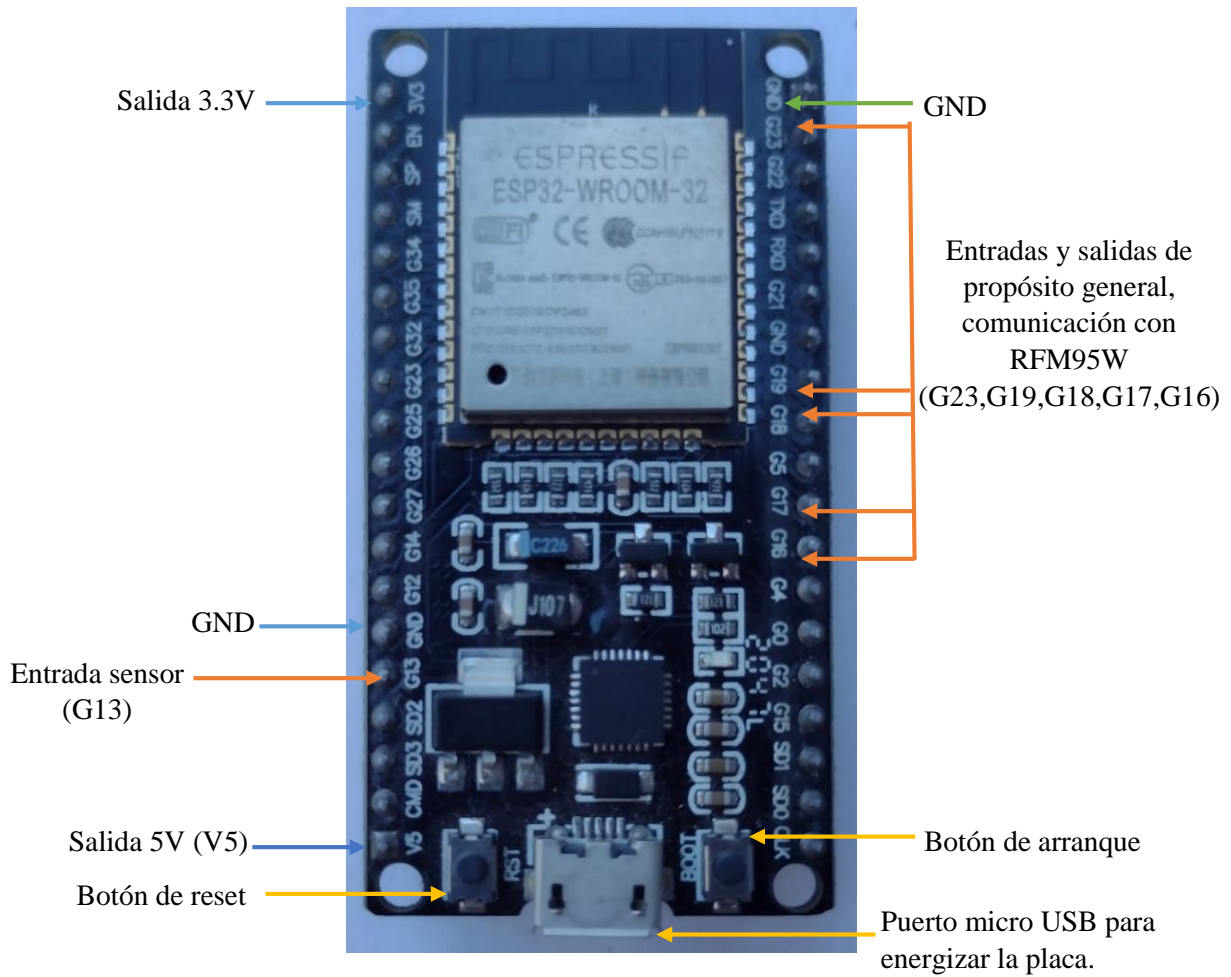


Figura 3.1. ESP32-DevKitC V4 con módulo ESP32-WROOM-32, denominado en el diagrama electrónico como U1 y U4.

La tarjeta de desarrollo cuenta con un conector micro USB como fuente de alimentación para la placa, así como interfaz de comunicación entre el módulo ESP32-WROOM-32 y un ordenador. También tiene un controlador USB-UART, regulador de voltaje de 5V a 3.3V, y botones para cargar el programa principal y reiniciarlo. El software elegido para programar estos módulos es el Arduino IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) ya que está publicado como una herramienta de código abierto y su lenguaje puede ser expandido mediante las librerías que se necesitan para desarrollar este trabajo.

Especificaciones técnicas:

- Wi-Fi: implementa un protocolo TCP/IP y Wi-Fi MAC 802.11 b/g/n. La administración de energía se maneja con interacción mínima con el host para minimizar el período de servicio activo. Hasta 150 Mbps de velocidad de datos.
- Bluetooth: integra un controlador de enlace Bluetooth que llevan a cabo los protocolos de banda base y otras rutinas de enlace de bajo nivel, como modulación/demodulación, procesamiento de paquetes, procesamiento de flujo de bits, etc.
- CPU: Microprocesador Xtensa LX6 de 32 bits de doble núcleo.
- Memorias: 448 Kbytes ROM, 520 Kbytes SRAM.
- Interfaces periféricas: 34 GPIOs programables, ADC de 12 bits, DAC de 8 bits, PWM, interfaces SPI, I2S, I2C, UART, Ethernet, etc.

3.1.2 RFM95W.

RF95W es un transceptor (transmisor y receptor) producido por HOPERF ELECTRONIC, proporciona comunicación de espectro ensanchado de largo alcance y alta inmunidad a interferencias, a la vez que minimiza el consumo de corriente. Usando la técnica de modulación LoRa puede lograr una sensibilidad -148 dBm, la alta sensibilidad combinada con el amplificador de potencia integrado de +20 dBm produce un enlace óptimo para casi cualquier aplicación, sin necesidad de amplificación externa. LoRa también proporciona ventajas significativas tanto en bloqueo como en selectividad sobre las técnicas de modulación convencionales. Además, proporciona modulación estándar GFSK, FSK, OOK y GMSK para permitir la compatibilidad con sistemas o estándares existentes como IEEE 802.15.4g [11]. En el anexo “D” se muestra la hoja de datos técnicos.



Figura 3.2. RFM95W denominado en el diagrama electrónico como U2 y U5 [11].

3.1.3 DHT11.

DHT11 es un sensor digital de humedad relativa y temperatura, está compuesto por un termistor para medir la temperatura y un sensor capacitivo que mide la humedad en el ambiente. Incluye un convertidor analógico digital en su interior que se encarga de transformar las magnitudes analógicas en señales digitales. Integra un microcontrolador de 8 bits que muestra los datos a través de una señal digital en el pin de salida [22]. En el anexo “D” se muestra la hoja de datos técnicos.

Principales características:

- Alimentación de 3.5V a 5V.
- Señal de salida digital.
- Rango de temperatura de 0°C a 50°C.
- Rango de humedad de 20% RH hasta los 70% RH.

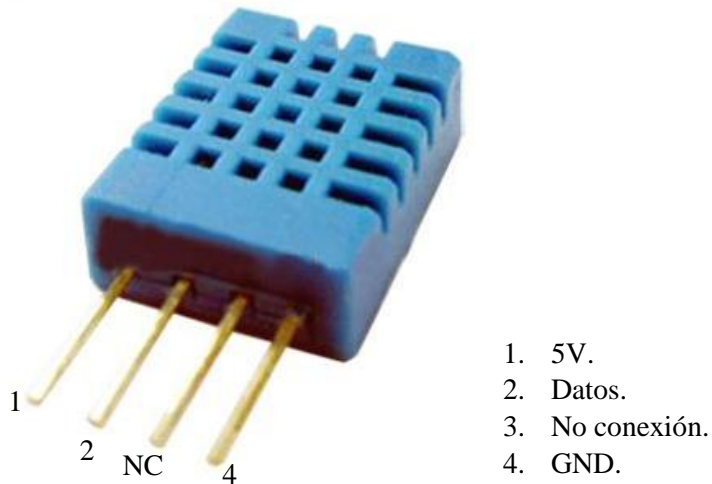


Figura 3.3. DHT11 denominado en el diagrama electrónico como U3 [22].

3.1.4 ThingSpeak.

ThingSpeak es una plataforma de análisis de IoT que permite recopilar, visualizar y analizar datos en vivo almacenados en la nube. Se pueden enviar datos a ThingSpeak desde diferentes dispositivos, crear visualizaciones y enviar alertas mediante servidores web. ThingSpeak ha incorporado el software matemático MATLAB que permite a los usuarios escribir y ejecutar código de MATLAB para realizar procesamiento, visualizaciones y análisis, sin configurar servidores ni desarrollar software web [20]. Cada canal de ThingSpeak puede tener hasta ocho campos de 255 caracteres de datos, ya sea en formato numérico o alfanumérico. Cada entrada de datos al canal se almacena con fecha y una marca de tiempo.

Para almacenar datos en un canal se creó una cuenta utilizando el correo electrónico institucional de la universidad, esta cuenta es gratuita ya que es para uso académico. En este canal se utilizaron dos campos para almacenar humedad y temperatura respectivamente.

3.2 Diseño de la red.

El modelo teórico propuesto para el presente trabajo está constituido principalmente por dos componentes. Un nodo sensor inalámbrico que medirá las variables de interés dentro del invernadero y una estación base que subirá la información a la plataforma de IoT. Las características de este sistema nos permiten crear una topología estrella y transmitir en la banda libre de radiofrecuencia de 915MHz, el alcance depende de la potencia de transmisión del dispositivo, así como el de la antena.

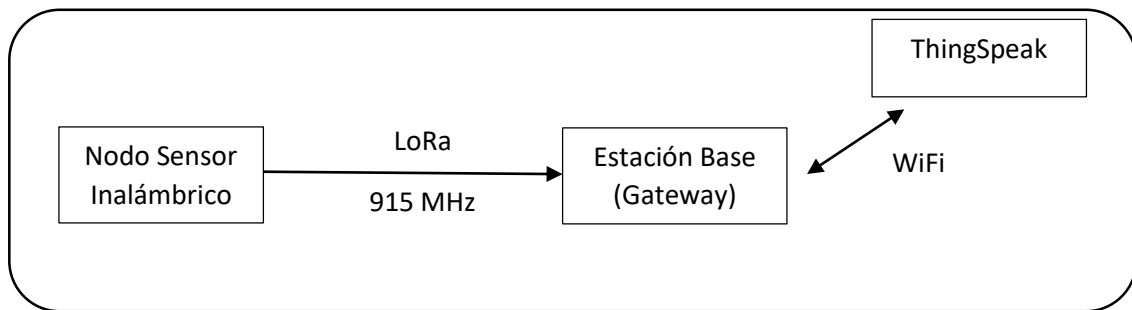


Figura 3.4. Modelo teórico de la red propuesta.

3.2.1 Nodo Sensor Inalámbrico.

Este dispositivo tiene la función de medir las variables climáticas dentro del invernadero y transmitir los datos hacia la estación base. El sensor DHT11 mide simultáneamente humedad y temperatura enviando esta información por un único pin digital en forma serial al módulo ESP32. Se transmiten 40 bits de datos, de los cuales 16 bits son para la temperatura, 16 bits son para la humedad y 8 bits de paridad.

El módulo ESP32 recibe esta información y la procesa con la ayuda de la librería “LoRa” para poder transmitirla a través del transceptor RFM95W. El transceptor se comunica con el

módulo ESP32 a través de una interfaz periférica serial (*SPI: Serial Peripheral Interface*), empaqueta los datos y los envía mediante radiofrecuencia en la banda libre de 915 MHz, con modulación LoRa. A continuación, se muestra el diagrama de conexión de los componentes.

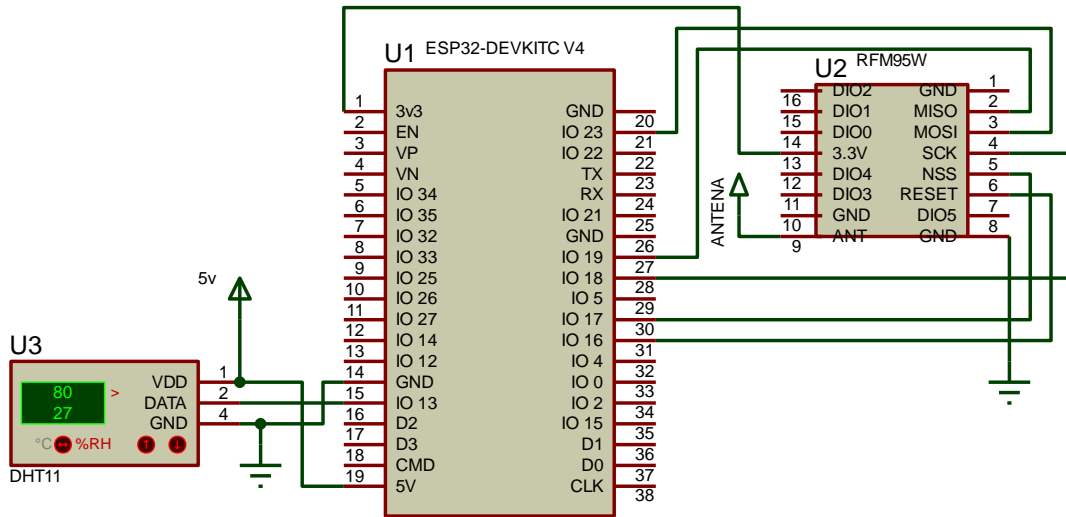


Figura 3.5. Diagrama de conexión del nodo sensor inalámbrico.

El transceptor LoRa se comporta como esclavo y el Módulo ESP32 como maestro en la comunicación SPI, este protocolo utiliza 5 líneas de comunicación.

- **MOSI (Master Out Slave In):** Transfiere los datos del ESP32 hacia el RFM95W.
- **MISO (Master In Slave Out):** Transfiere los datos del RFM95W hacia el ESP32.
- **NSS (Slave Select):** Permite seleccionar el dispositivo esclavo para iniciar la comunicación.
- **SCLK (System Clock):** Corresponde a la señal de reloj, es generada por el ESP32 y sincroniza la transferencia de datos.
- **RESET:** Entrada para reiniciar el transceptor.

Descripción del programa principal para el microcontrolador.

Al inicio el programa incluye las librerías necesarias para configurar los recursos a utilizar y define el pin 13 que recibirá las lecturas del sensor. Después inicia la función que configura los pines del módulo LoRa y la frecuencia con la que se transmitirán los datos, que es de 915 MHz, también inicializa el sensor.

Posteriormente inicia la función principal, esta mide humedad y temperatura almacenando los valores en dos variables de tipo flotante (h=humedad, t= temperatura), si se detecta algún error en la medición el programa repite la lectura hasta que esta sea correcta. Se muestran las mediciones en el puerto serie y se encadenan como una sola variable (R= t , h) para poder transmitirla como paquete LoRa. Se añade el parpadeo de un led para visualizar el envío y esperamos 15 segundos para repetir la función.

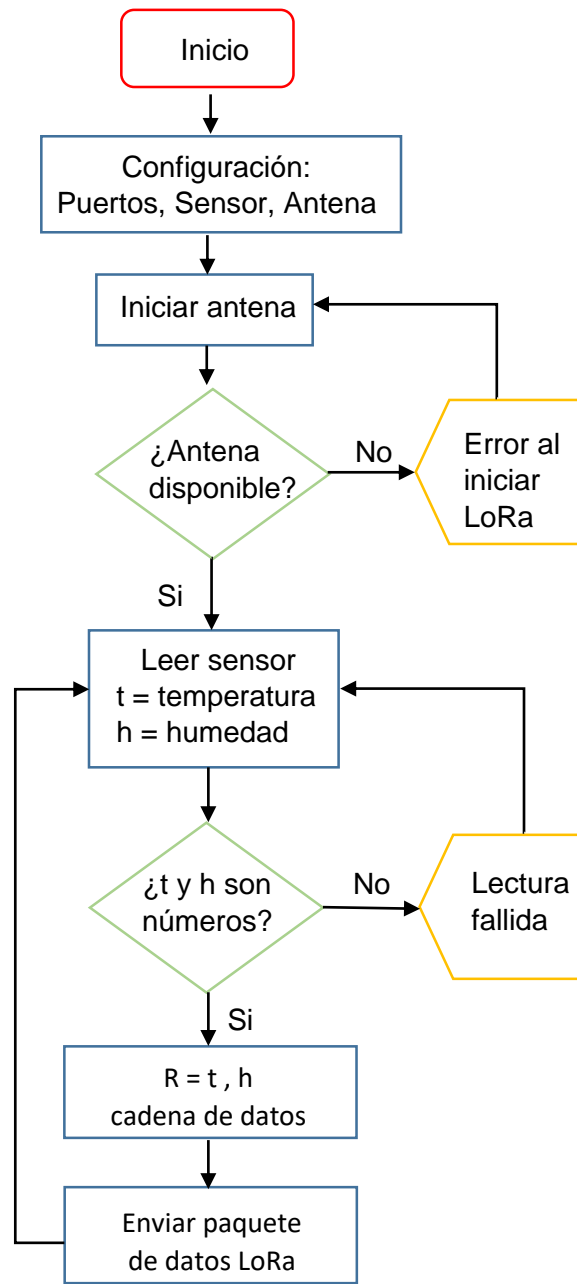


Figura 3.6. Diagrama de flujo del programa para el nodo sensor inalámbrico.

3.2.2 Estación Base (Gateway).

La estación base se encarga de recibir correctamente el paquete de datos y subir la información al canal de ThingSpeak. Está conformada por el módulo RFM95W que opera como receptor y el módulo ESP32 para procesar la información recibida, este módulo se conecta a la red WIFI de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán y así tener acceso a internet. A continuación, se muestra el diagrama de conexión de los componentes.

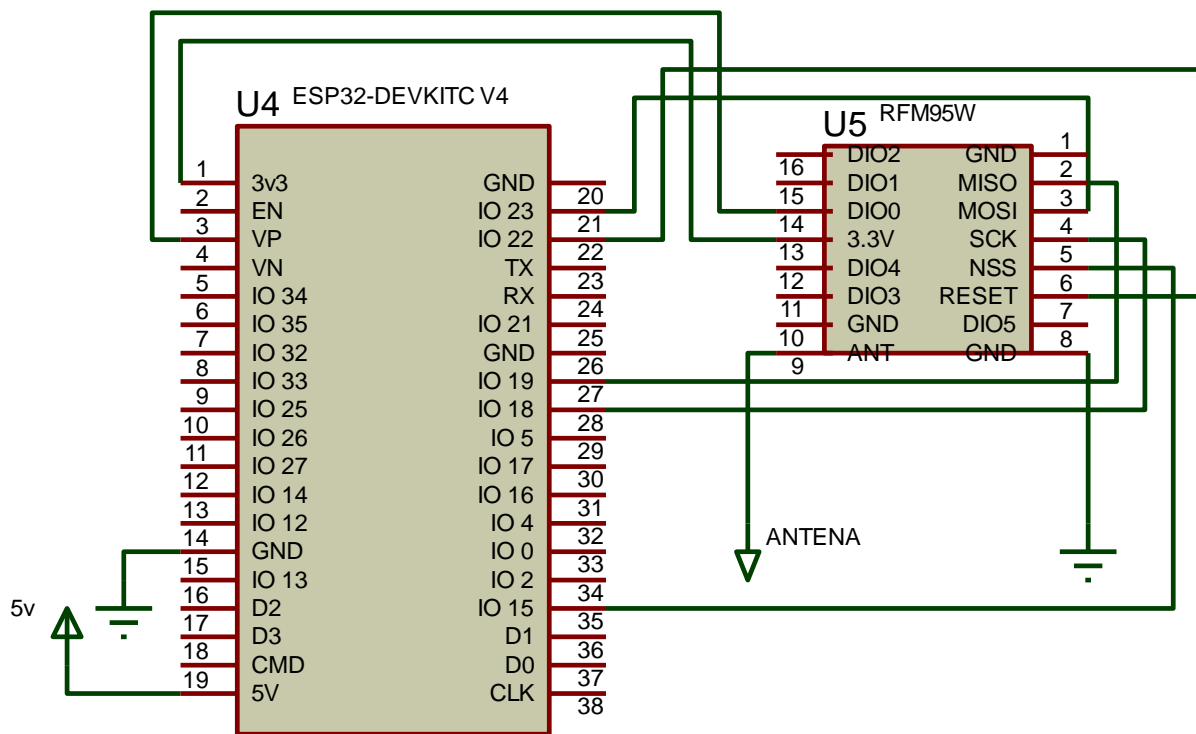


Figura 3.7. Diagrama de conexión de la estación base.

Descripción del programa principal para el microcontrolador.

Este programa inicia incluyendo las librerías necesarias para configurar los recursos y la red de área local a la que se va a conectar. De igual manera se define el identificador del canal de ThingSpeak y su llave de escritura, estos datos permiten enviar la información al canal. Después

se inicia el modulo wifi y se conecta a la red, también inicia el canal de ThingSpeak y el módulo LoRa con las mismas características del transmisor, es decir, 915MHz.

A continuación, el programa principal inicia la función para recibir paquetes LoRa, si el sistema detecta un nuevo paquete este lo recibe separando humedad y temperatura en dos variables. Se designan dos campos en ThingSpeak para almacenar esta información, la librería se encarga de subir estos valores al mismo tiempo.

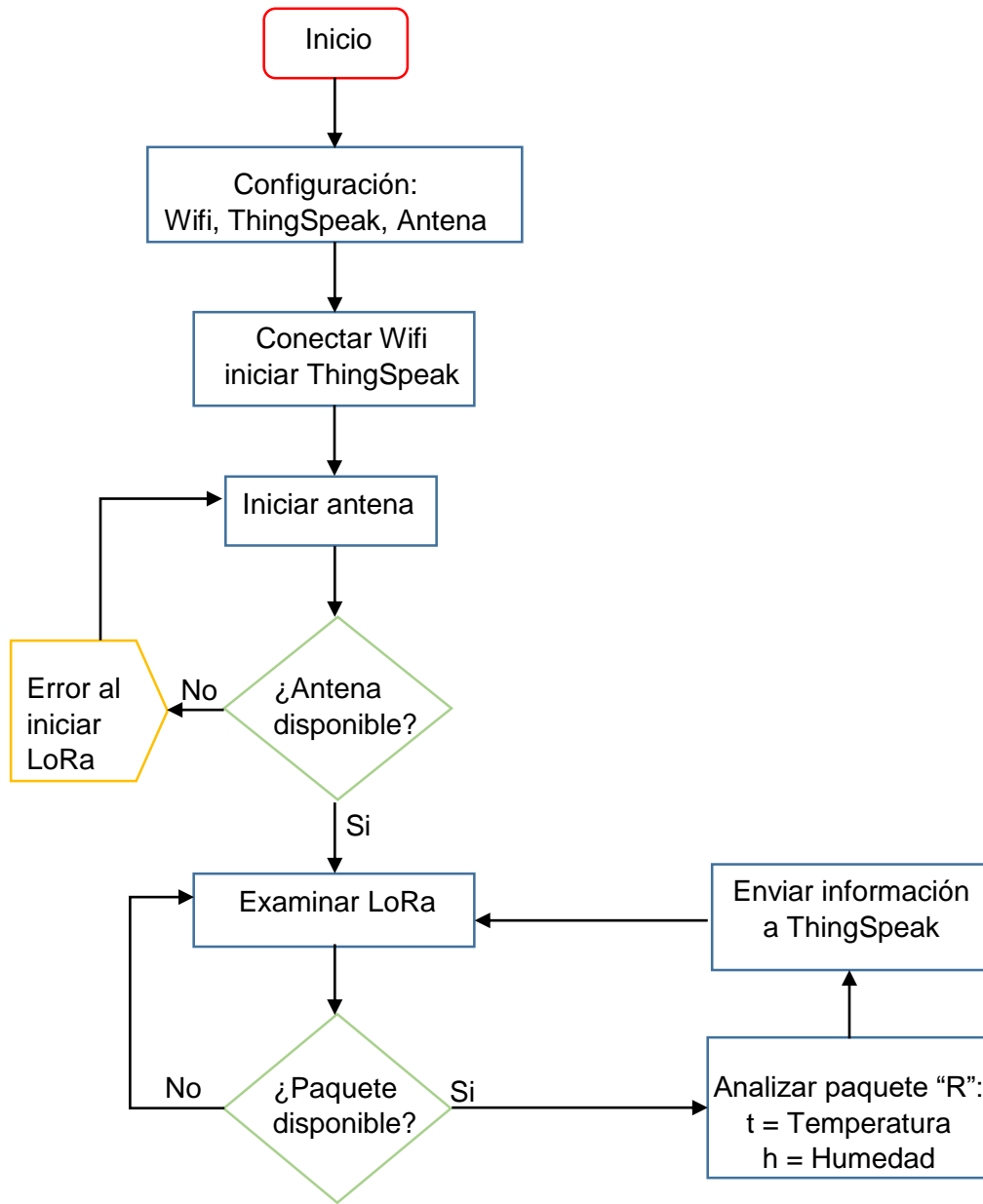


Figura 3.8. Diagrama de flujo del programa para la estación base.

3.3 Implementación del sistema.

3.3.1 Ubicación.

La red inalámbrica de sensores se implementó en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, el nodo sensor inalámbrico se instaló en el invernadero IDIAP de la carrera de ingeniería agrícola. Este invernadero tiene un área de 500m² y cuenta con 127 VCA como suministro de energía lo cual hizo posible utilizar un eliminador de 5V, 500mA con cable USB a micro USB para alimentar el nodo.

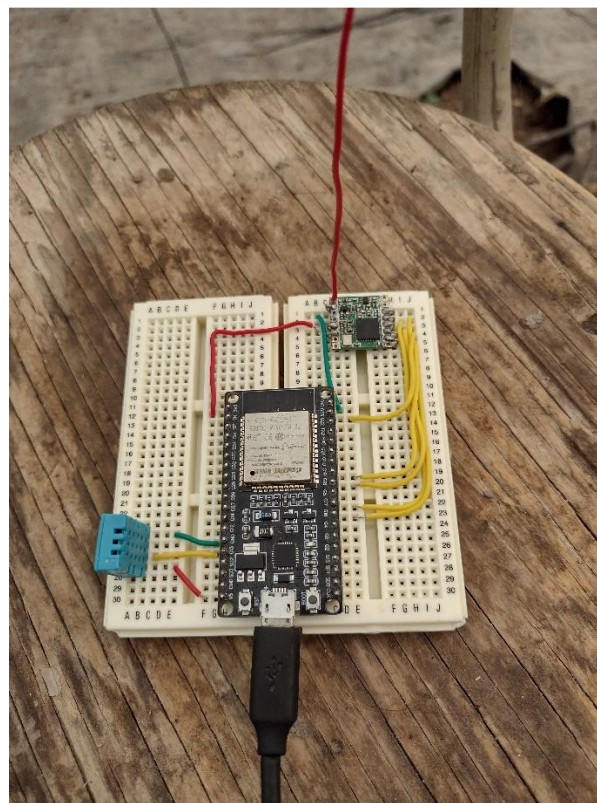


Figura 3.9. Nodo sensor inalámbrico instalado en el invernadero.

La estación base se instaló en la oficina del departamento de ciencias agrícolas, esto con la finalidad de que estuviera cerca de una red WiFi a la cual el módulo ESP32 pudiera conectarse. La distancia entre el nodo sensor inalámbrico y la estación base es de 182.74 m.

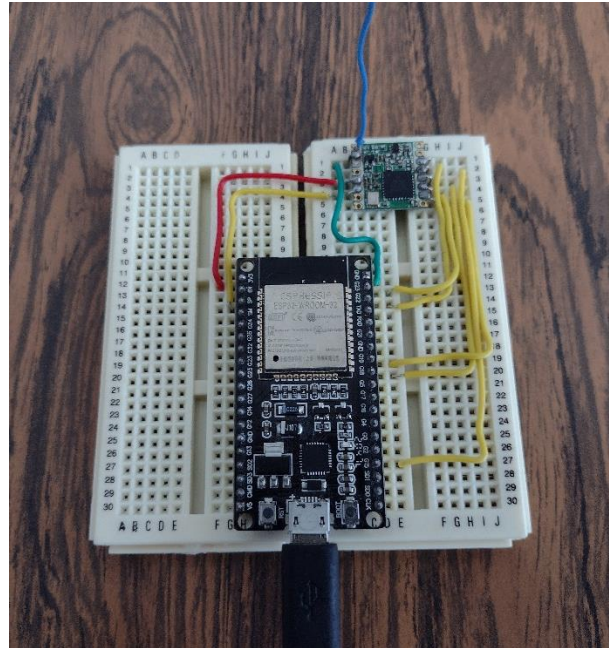


Figura 3.10. Estación base instalada en la oficina del departamento de ciencias agrícolas.



Figura 3.11. Distancia entre el nodo sensor inalámbrico y la estación base.

Fuente: (Google Maps, 2022)

3.3.2 Inicialización y pruebas.

Una vez que los dispositivos se instalaron adecuadamente se realizaron pruebas para verificar que la red funciona de forma correcta. Primero conectamos la interfaz de comunicación del nodo sensor a un ordenador, iniciamos el monitor serie del puerto USB para visualizar que el sensor funciona correctamente. Desconectamos nodo sensor del ordenador y lo energizamos para que continúe con la toma de datos.

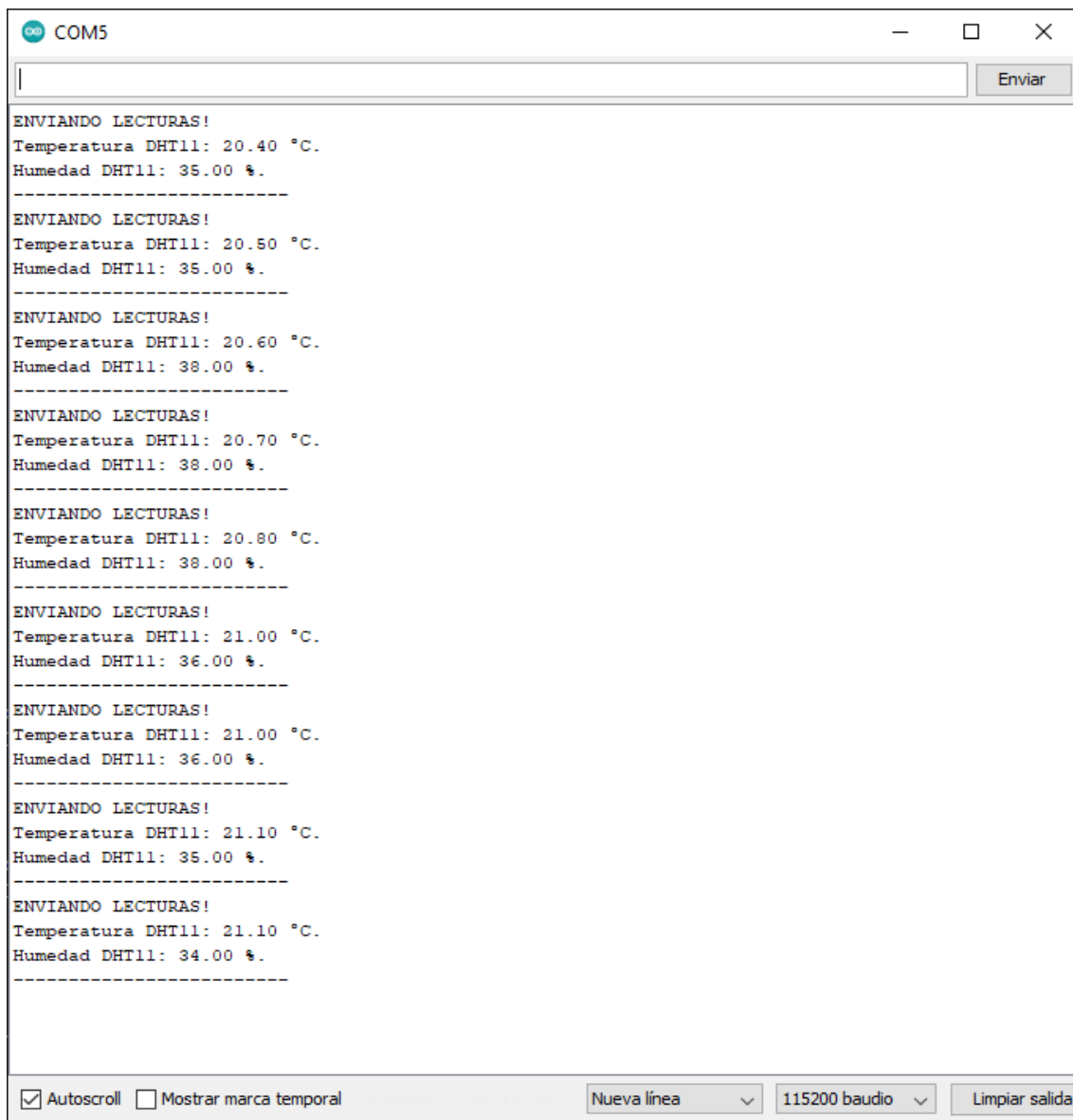


Figura 3.12. Humedad y temperatura medida por el sensor.

Se configuró la estación base dándole acceso a internet a través de la red wifi PC PUMA, actualmente la conexión se encuentra abierta permitiendo el acceso a cualquier dispositivo. Visualizamos en el monitor serie de un ordenador que recibiera correctamente el mensaje.

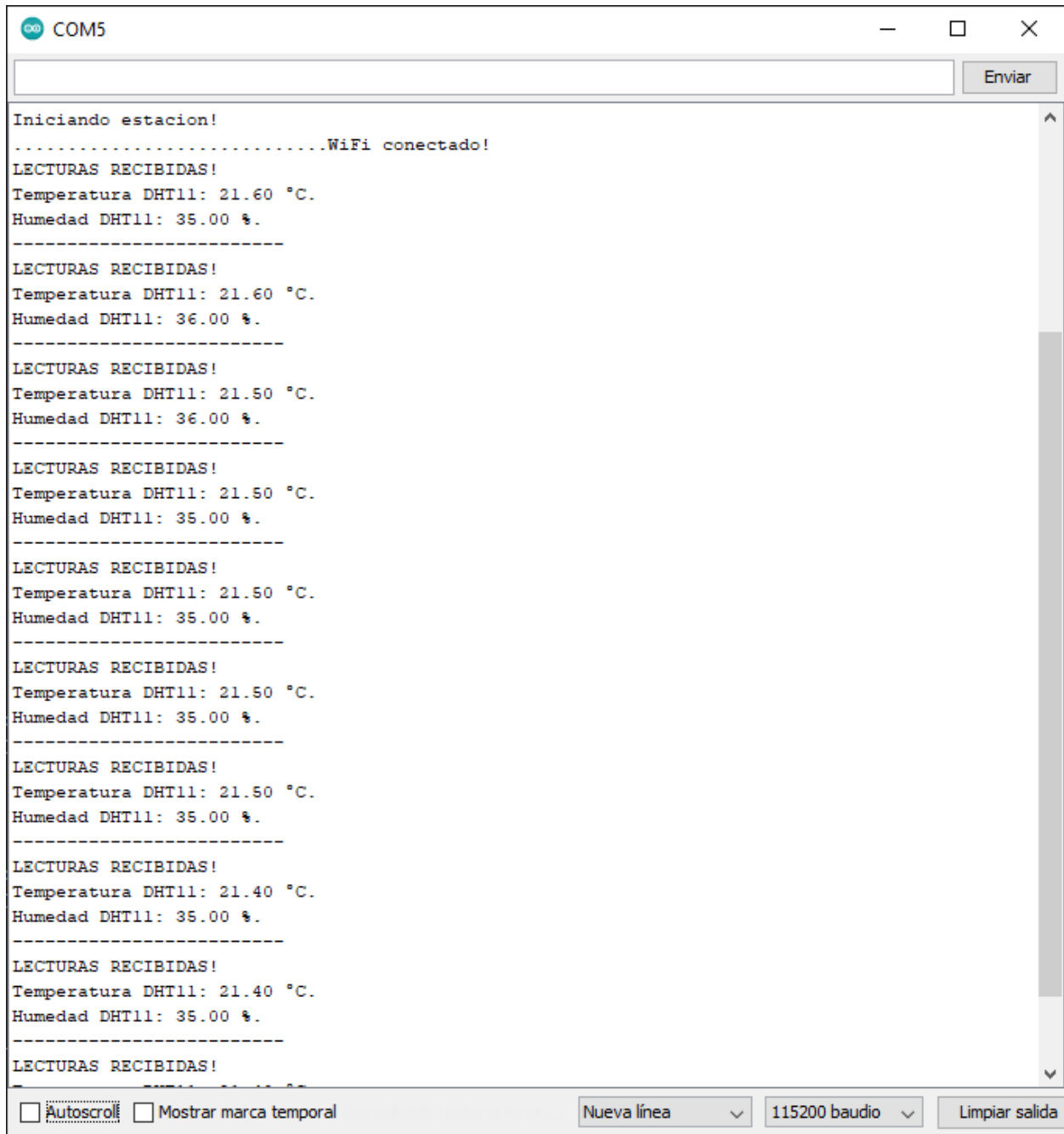


Figura 3.13. Mensaje recibido en la estación base.

La estación recibe el paquete y lo envía al canal de ThingSpeak, visualizamos la información de los últimos 30 minutos a través de dos campos uno para temperatura y otro para humedad. Estos gráficos muestran el valor medido, fecha y hora en que se recibió el paquete.

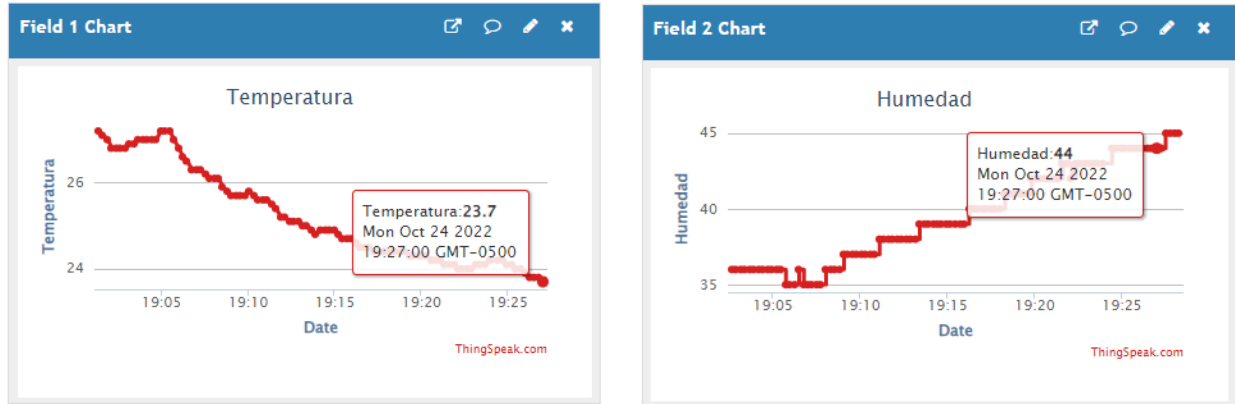


Figura 3.14. Visualizaciones del campo 1 y 2 del canal de ThingSpeak.

3.4 Evaluación económica.

Realizar un estudio económico es una parte importante del presente trabajo, ya que de esta manera es posible conocer las necesidades económicas para implementarlo. En la siguiente tabla se muestra la estimación del costo del proyecto, considerando el precio unitario de los componentes y el tiempo invertido para su diseño e investigación.

Tabla 3.1. Estimación del costo del proyecto [33].

Gasto	Concepto	Etiqueta	Cantidad	Precio(MXN)	Total
Materiales	ESP32-DevKitC V4	U1, U4	2	\$153.00	\$306.00
	RFM95W 915MHz	U2, U5	2	\$238.00	\$476.00
	Módulo Sensor DHT11	U3	1	\$40.00	\$40.00
	Protoboard 830 Pts MB-102	-	2	\$36.00	\$72.00
	Eliminador de 5V, 500mA	-	2	\$59.00	\$118.00
	Cable USB a MicroUSB	-	2	\$31.00	\$62.00
	Ingeniería	Diseño e investigación	-	6 Meses	\$4000.00
				Total	\$25074.0

Capítulo 4: Evaluación de los resultados.

El sistema implementado logro adquirir mediciones que validaron el correcto funcionamiento de la red, estos resultados permiten analizar el comportamiento de la humedad y temperatura de acuerdo a una línea de tiempo diaria y continua. La toma de muestras para este análisis comenzó el día 13 de octubre del 2022 a las 7:00 AM y termino el día siguiente a la misma hora, aunque se recopilieron lecturas correspondientes a 15 días para visualizar el comportamiento de estas variables.

4.1 Mediciones de temperatura.

Las mediciones indican que la temperatura mínima es de 10°C y aumenta en el transcurso del día, se puede observar que el rango más alto de temperatura existe entre las 14:00 y las 15:00 horas. Las variaciones de temperatura no son lineales ya que en el transcurso del día los cambios en el crecimiento y decrecimiento de la temperatura son irregulares a medida que el día avanza.

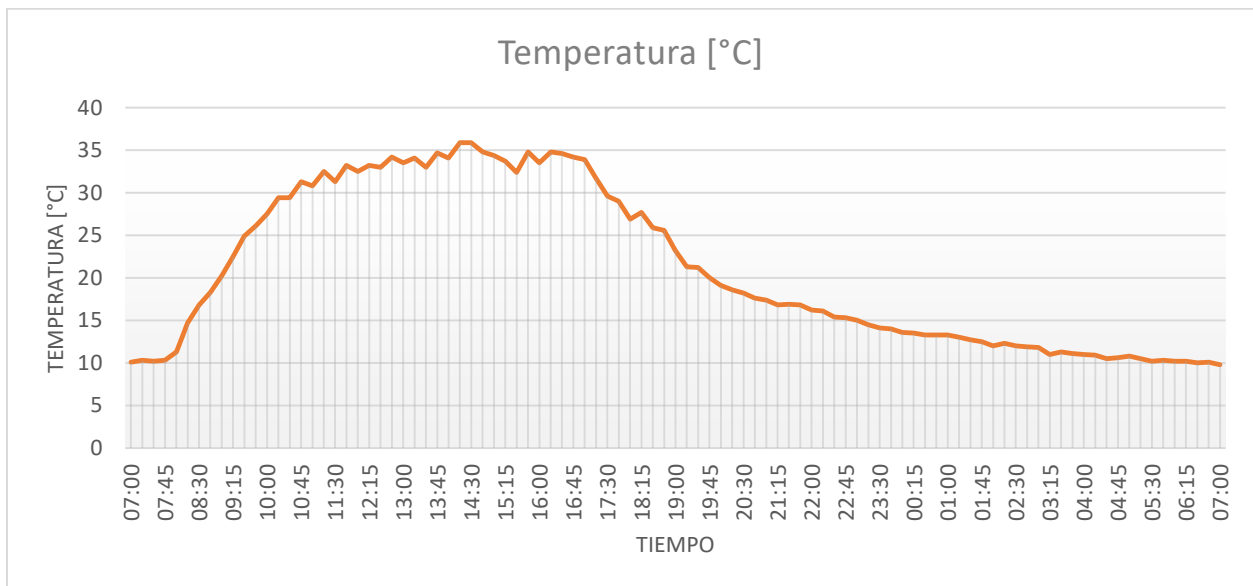


Figura 4.1. Gráfica de la temperatura.

4.2 Mediciones de humedad.

La humedad relativa tampoco tiene un comportamiento lineal dentro del invernadero, su valor dependerá en mayor parte de la temperatura. En la gráfica se observa que esta variable disminuye cuando la temperatura aumenta, el máximo valor alcanzado es del 75% y el mínimo de 13%.

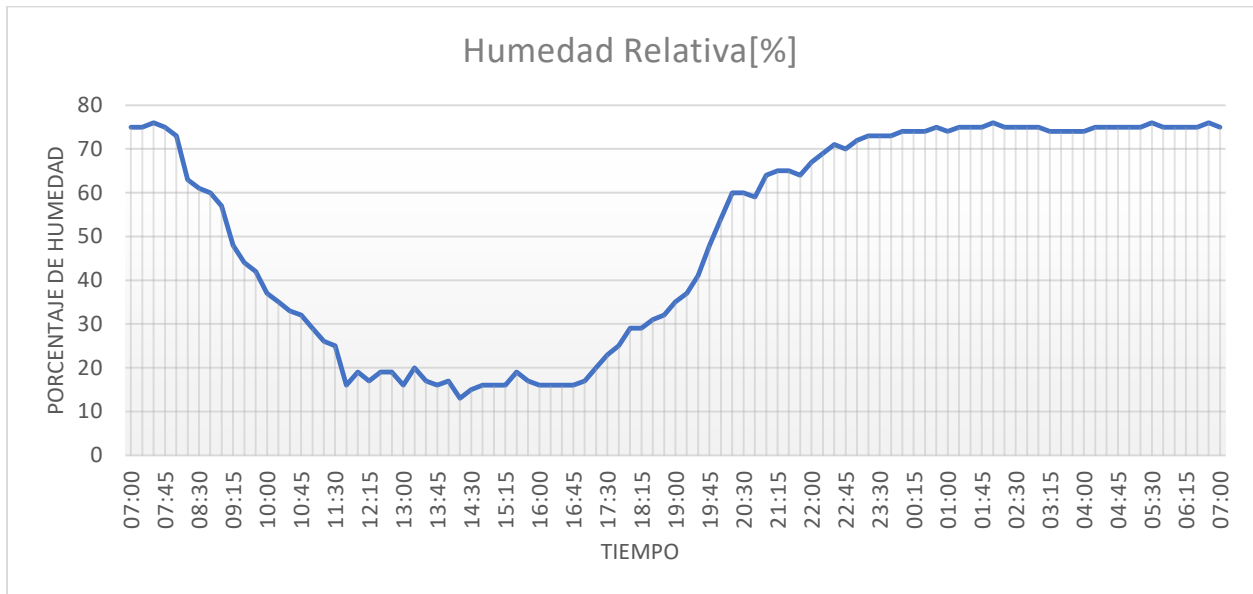


Figura 4.2. Gráfica de la humedad.

4.3 Canal de ThingSpeak.

El canal de ThingSpeak muestra humedad y temperatura cada que recibe un nuevo paquete de información, es decir cada 30 segundos aproximadamente. También permite visualizar las gráficas de las últimas 24 horas en intervalos de 15 minutos, esto para analizar de una mejor forma el comportamiento del clima dentro del invernadero. El canal está abierto así que cualquiera que acceda a él puede visualizar esta información.

Invernadero de Docencia e Investigación en Agricultura Protegida

Channel ID: **1442496**

Temperatura y Humedad dentro del IDIAP

Author: [edgarmorales](#)

Access: Public

Export recent data

Temperatura actual

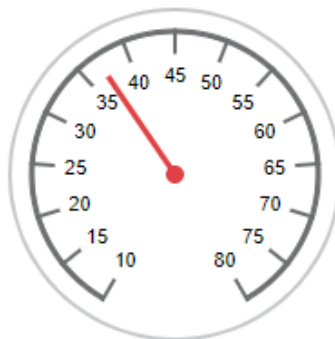


24.00

°C

18 days ago

Humedad Relativa



37
HR %

Figura 4.3. Visualización de lecturas en el canal de ThingSpeak.

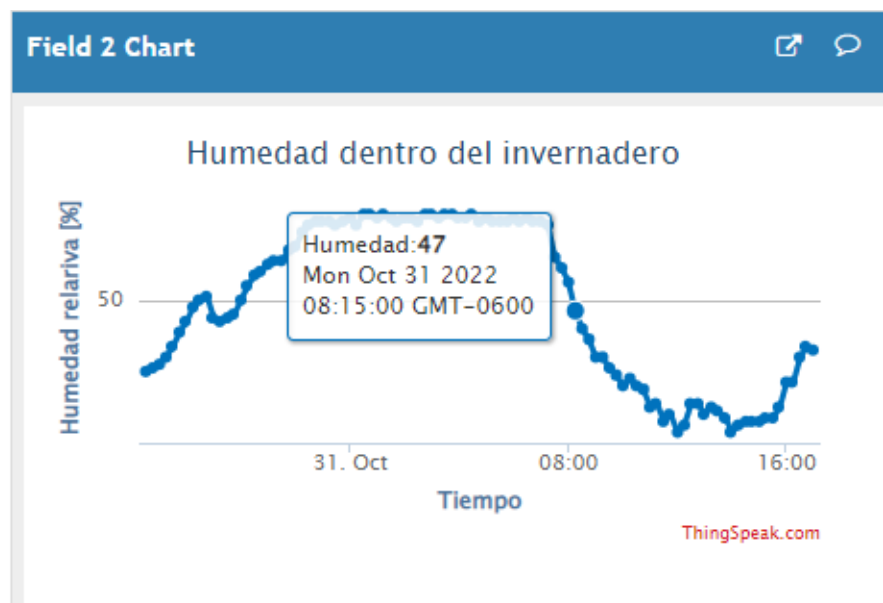
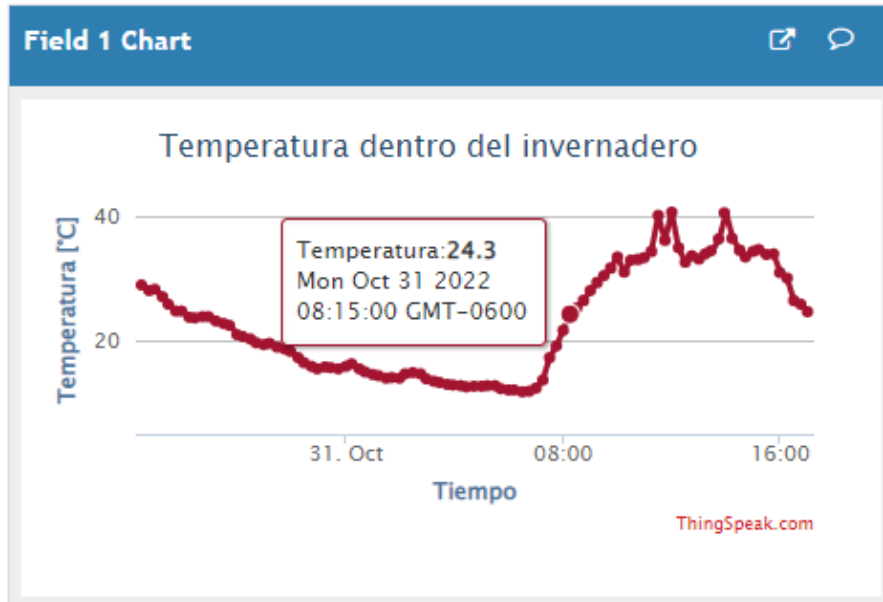


Figura 4.4. Visualización de gráficas en el canal de ThingSpeak.

Conclusiones.

Se diseñó e implementó una red inalámbrica de sensores dentro del Invernadero de Docencia e Investigación en Agricultura Protegida que permite medir, enviar, almacenar y visualizar las variables climáticas que influyen en el desarrollo de un cultivo. Para lograr la implementación del sistema fue necesario estudiar los distintos componentes posibles a utilizar, llegando a un diseño final que contiene módulos ESP32 y LoRa.

El diseño de este sistema incluye dos dispositivos denominados nodo sensor inalámbrico y estación base, el primero se encarga de la obtención y envío de datos mientras que el segundo recibe y procesa la información para ser visualizada. Estos dispositivos se comunican de forma inalámbrica a través de la banda libre de radiofrecuencias de 915MHz. Los datos se publicaron en un canal de ThingSpeak y son visibles desde cualquier navegador web. Por último, se determinaron los costos necesarios para su implementación tomando en cuenta que al ser un proyecto dedicado al ámbito académico la selección de componentes es comercial.

Los resultados obtenidos permiten visualizar humedad y temperatura dentro del invernadero dando pauta a tomar medidas preventivas de acuerdo a los parámetros que el cultivo necesite. Las gráficas muestran que durante el transcurso del día aumenta la temperatura y la humedad relativa disminuye ya que el aire se vuelve más seco, al anochecer comienza a disminuir la temperatura aumentando la humedad relativa. El sistema funciona de manera óptima con una temperatura menor a 40°C y debajo del 70% de humedad relativa, fuera de ese rango es recomendable reemplazar el sensor DHT11, sensores como el DHT 22, SHT 75 y RHT03 tienen mejores características, pero son más costosos.

El sistema de monitoreo cumple con los objetivos y tiene una gran funcionalidad, pero se pueden realizar diversos cambios para obtener un sistema más completo. Agregar sensores que midan el dióxido de carbono y la radiación térmica ayudarían a tener mayor conocimiento del ambiente dentro del invernadero, la alimentación del sistema podría ser reemplazada por celdas fotovoltaicas con baterías para implementarse en invernaderos donde no haya suministro de energía eléctrica.

Glosario.

Ancho de banda: Es el rango de frecuencias ocupado por una señal de radiofrecuencia modulada, se expresa en Hertz(Hz).

Bluetooth: Es una tecnología de comunicación para datos inalámbricos de corto alcance y transferencia bidireccional en tiempo real que proporciona velocidades de datos de hasta 24 Mb/s.

CSS: Espectro ensanchado de Chirrido (*Chirp Spread Spectrum*) es una técnica de modulación en frecuencia lineal de banda ancha para codificar información.

dBm: Decibeles miliwatt es una unidad utilizada para indicar potencia expresada en decibeles (dB) con referencia a un miliwatt (mW), se utiliza en redes de comunicación como una medida conveniente de potencia absoluta.

Gateway: Dispositivo que permite interconectar redes con protocolos y arquitecturas a diferentes niveles de comunicación.

GPRS: Servicio General de Paquetes de Radio (*General Paquet Radio Service*). Es un estándar de comunicación para telefonía móvil que transmite información por paquetes, transmite datos a una velocidad de 114Kbps.

IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) es la sociedad profesional dedicada a promover y divulgar los avances científicos en las áreas de Ingeniería eléctrica, electrónica, energía, informática y afines.

IoT: Internet de las cosas (*Internet of Things*) es una infraestructura global que permite interconectar objetos físicos y virtuales, aprovechando las capacidades identificación, adquisición de datos, procesamiento de la información y comunicación.

ITU: Unión Internacional de Telecomunicaciones (*International Telecommunication Union*) es el organismo especializado de las naciones unidas para las tecnologías de la información y comunicación encargado de regular las telecomunicaciones a nivel internacional.

LoRa: Largo alcance (*Long Range*) es una técnica de modulación inalámbrica derivada de la tecnología chirp de espectro ensanchado. Codifica información en ondas de radio utilizando pulsos de chirrido.

PAR: Radiación fotosintéticamente activa (*Photosynthetically Active Radiation*), es la radiación comprendida por las longitudes de onda del espectro visible que utilizan las plantas para realizar la fotosíntesis y producir carbohidratos.

PWM: Modulación por ancho de pulso (*Pulse Width Modulation*) es una técnica de modulación en la que se transforma una señal analógica en una señal digital, ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

RAM: Memoria de acceso aleatorio (*RAM: Random Access Memory*). Es la memoria temporal donde se almacenan los datos del programa que se está ejecutando.

ROM: Memoria de solo lectura (*Read Only Memory*). Es la memoria que almacena instrucciones o programas, estos datos no varían durante la ejecución de un programa.

SF: Factor de propagación (*Spreading Factor*) es el patrón de dispersión aplicado al flujo de bits antes de la modulación LoRa, lo que aumenta la ganancia de procesamiento y ayuda en la codificación de los mensajes

Thingspeak: Plataforma de análisis de IoT que permite recopilar, visualizar y analizar datos almacenados en la nube.

Transceptor: Dispositivo electrónico que realiza funciones de transmisión y recepción de datos.

Zigbee: Tecnología de red de área personal inalámbrica de corto alcance, baja potencia, baja tasa de datos y bajo costo especificada por el protocolo IEEE 802.15.4. El estándar Zigbee fue desarrollado por Zigbee Alliance.

Anexos.

ANEXO A. Programación del Nodo Sensor Inalámbrico.

```
#include "SPI.h"
#include "LoRa.h"
#include "DHT.h"
#define led 15
#define pin1 13
DHT dht1(pin1, DHT11);
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Serial.println("Iniciando estación!");
  LoRa.setPins(17,16,23);
  if (!LoRa.begin(915E6)) {
    Serial.println("Starting LoRa failed!");
    while (1);
  }
  LoRa.setSpreadingFactor(10);
  dht1.begin();
  pinMode(led, OUTPUT);
}
void loop() {
  float t1 = dht1.readTemperature();
  float h1 = dht1.readHumidity();
  while(isnan(t1)||isnan(h1)){
    Serial.println("Lectura fallida en el sensor DHT11, repirtiendo lectura...");
    delay(2000);
    t1 = dht1.readTemperature();
    h1 = dht1.readHumidity();
  }
  Serial.println("ENVIANDO LECTURAS!");
  Serial.print("Temperatura DHT11: ");
  Serial.print(t1);
  Serial.println(" °C.");
  Serial.print("Humedad DHT11: ");
  Serial.print(h1);
  Serial.println(" %.");
  Serial.println("-----");
  String R = (String)t1+" "+(String)h1;
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.print(R);
  LoRa.endPacket();
  digitalWrite (led,HIGH);
  delay(100);
  digitalWrite(led,LOW);
  delay(15000);}
}
```

ANEXO B. Programacion de la estación Base.

```
#include "ThingSpeak.h"
#include "WiFi.h"
#include "SPI.h"
#include "LoRa.h"
#define led 16
const char* ssid = ".:PC Puma.";
const char* password = "";
unsigned long channelID = 1442496;
const char* WriteAPIKey = "SUG948APHNRKG4BP";
WiFiClient Cliente;
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Serial.println("Iniciando estacion!");
  WiFi.begin(ssid,password);
  while(WiFi.status() !=WL_CONNECTED){
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("WiFi conectado!");
  ThingSpeak.begin(Cliente);
  LoRa.setPins(15,22,36);
  if (!LoRa.begin(915E6)) {
    Serial.println("Starting LoRa failed!");
    while (1);
  }
  LoRa.setSpreadingFactor(10); // ranges from 6-12
  pinMode(led,OUTPUT);
}
void loop() {
  int packetSize = LoRa.parsePacket();
  if (packetSize) {
    digitalWrite(led,HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(led,LOW);
    while (LoRa.available()) {
      String R = LoRa.readString();
      Serial.println("LECTURAS RECIBIDAS!");
      String t = R.substring(0,5);
      Serial.print("Temperatura DHT11: ");
      Serial.print(t);
      Serial.println(" °C.");
      String h = R.substring(6,11);
      Serial.print("Humedad DHT11: ");
      Serial.print(h);
```

```
    Serial.println(" %.");  
    Serial.println("-----");  
    ThingSpeak.setField(1, t);  
    ThingSpeak.setField(2, h);  
    ThingSpeak.writeFields(channelID, WriteAPIKey);  
  }  
}  
}
```

Anexo C. Hojas de datos técnicos.

Hoja de datos técnicos para la tarjeta ESP32-CevKitC V4.

Chapter 1

Get Started

This document is intended to help you set up the software development environment for the hardware based on the ESP32 chip by Espressif. After that, a simple example will show you how to use ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework) for menu configuration, then for building and flashing firmware onto an ESP32 board.

Note: This is documentation for the master branch (latest version) of ESP-IDF. This version is under continual development. [Stable version](#) documentation is available, as well as other *ESP-IDF Versions*.

1.1 Introduction

ESP32 is a system on a chip that integrates the following features:

- Wi-Fi (2.4 GHz band)
- Bluetooth
- Dual high performance Xtensa® 32-bit LX6 CPU cores
- Ultra Low Power co-processor
- Multiple peripherals

Powered by 40 nm technology, ESP32 provides a robust, highly integrated platform, which helps meet the continuous demands for efficient power usage, compact design, security, high performance, and reliability.

Espressif provides basic hardware and software resources to help application developers realize their ideas using the ESP32 series hardware. The software development framework by Espressif is intended for development of Internet-of-Things (IoT) applications with Wi-Fi, Bluetooth, power management and several other system features.

1.2 What You Need

1.2.1 Hardware

- An **ESP32** board.
- **USB cable** - USB A / micro USB B.
- **Computer** running Windows, Linux, or macOS.

ESP32-DevKitC V4 Getting Started Guide

This guide shows how to start using the ESP32-DevKitC V4 development board.

What You Need

- *ESP32-DevKitC V4 board*
- USB A / micro USB B cable
- Computer running Windows, Linux, or macOS

You can skip the introduction sections and go directly to *Section Start Application Development*.

Overview ESP32-DevKitC V4 is a small-sized ESP32-based development board produced by Espressif. Most of the I/O pins are broken out to the pin headers on both sides for easy interfacing. Developers can either connect peripherals with jumper wires or mount ESP32-DevKitC V4 on a breadboard.

To cover a wide range of user requirements, the following versions of ESP32-DevKitC V4 are available:

- different ESP32 modules
 - ESP32-WROOM-DA
 - ESP32-WROOM-32E
 - ESP32-WROOM-32UE
 - ESP32-WROOM-32D
 - ESP32-WROOM-32U
 - ESP32-SOLO-1
 - ESP32-WROVER-E
 - ESP32-WROVER-IE
- male or female pin headers.

For details please refer to [ESP Product Selector](#).

Functional Description The following figure and the table below describe the key components, interfaces and controls of the ESP32-DevKitC V4 board.

Key Component	Description
ESP32-WROOM-32	A module with ESP32 at its core. For more information, see ESP32-WROOM-32 Datasheet .
EN	Reset button.
Boot	Download button. Holding down Boot and then pressing EN initiates Firmware Download mode for downloading firmware through the serial port.
USB-to-UART Bridge	Single USB-UART bridge chip provides transfer rates of up to 3 Mbps.
Micro USB Port	USB interface. Power supply for the board as well as the communication interface between a computer and the ESP32-WROOM-32 module.
5V Power On LED	Turns on when the USB or an external 5V power supply is connected to the board. For details see the schematics in <i>Related Documents</i> .
I/O	Most of the pins on the ESP module are broken out to the pin headers on the board. You can program ESP32 to enable multiple functions such as PWM, ADC, DAC, I2C, I2S, SPI, etc.

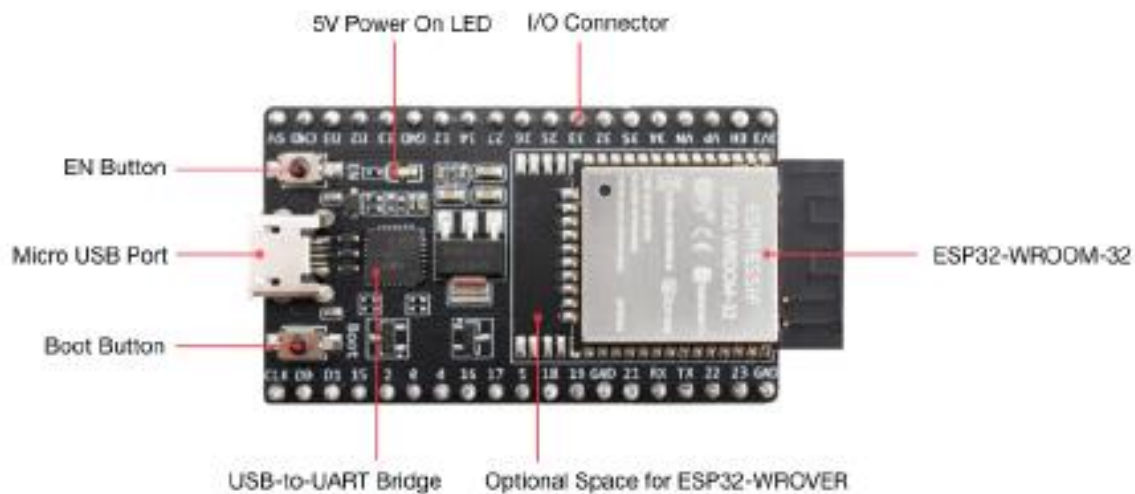


Fig. 1: ESP32-DevKitC V4 with ESP32-WROOM-32 module soldered

Power Supply Options There are three mutually exclusive ways to provide power to the board:

- Micro USB port, default power supply
- 5V / GND header pins
- 3V3 / GND header pins

Warning: The power supply must be provided using **one and only one of the options above**, otherwise the board and/or the power supply source can be damaged.

Header Block The two tables below provide the **Name** and **Function** of I/O header pins on both sides of the board, as shown in *ESP32-DevKitC V4 with ESP32-WROOM-32 module soldered*.

J2

No.	Name	Type ^{Page 6, 2}	Function
1	3V3	P	3.3 V power supply
2	EN	I	CHIP_PU, Reset
3	VP	I	GPIO36, ADC1_CH0, S_VP
4	VN	I	GPIO39, ADC1_CH3, S_VN
5	IO34	I	GPIO34, ADC1_CH6, VDET_1
6	IO35	I	GPIO35, ADC1_CH7, VDET_2
7	IO32	I/O	GPIO32, ADC1_CH4, TOUCH_CH9, XTAL_32K_P
8	IO33	I/O	GPIO33, ADC1_CH5, TOUCH_CH8, XTAL_32K_N
9	IO25	I/O	GPIO25, ADC1_CH8, DAC_1
10	IO26	I/O	GPIO26, ADC2_CH9, DAC_2
11	IO27	I/O	GPIO27, ADC2_CH7, TOUCH_CH7
12	IO14	I/O	GPIO14, ADC2_CH6, TOUCH_CH6, MTMS
13	IO12	I/O	GPIO12, ADC2_CH5, TOUCH_CH5, MTDI
14	GND	G	Ground
15	IO13	I/O	GPIO13, ADC2_CH4, TOUCH_CH4, MTCK
16	D2	I/O	GPIO9, D2 ²
17	D3	I/O	GPIO10, D3 ^{Page 6, 2}
18	CMD	I/O	GPIO11, CMD ^{Page 6, 2}
19	5V	P	5 V power supply

J3

No.	Name	Type ⁷	Function
1	GND	G	Ground
2	IO23	I/O	GPIO23
3	IO22	I/O	GPIO22
4	TX	I/O	GPIO1, U0TXD
5	RX	I/O	GPIO3, U0RXD
6	IO21	I/O	GPIO21
7	GND	G	Ground
8	IO19	I/O	GPIO19
9	IO18	I/O	GPIO18
10	IO5	I/O	GPIO5
11	IO17	I/O	GPIO17 ³
12	IO16	I/O	GPIO16 ³
13	IO4	I/O	GPIO4, ADC2_CH0, TOUCH_CH0
14	IO0	I/O	GPIO0, ADC2_CH1, TOUCH_CH1, Boot
16	IO2	I/O	GPIO2, ADC2_CH2, TOUCH_CH2
17	IO15	I/O	GPIO15, ADC2_CH3, TOUCH_CH3, MTDO
17	D1	I/O	GPIO8, D1 ⁷
18	D0	I/O	GPIO7, D0 ⁷
19	CLK	I/O	GPIO6, CLK ⁷

Pin Layout

Note on C15 The component C15 may cause the following issues on earlier ESP32-DevKitC V4 boards:

- The board may boot into Download mode
- If you output clock on GPIO0, C15 may impact the signal

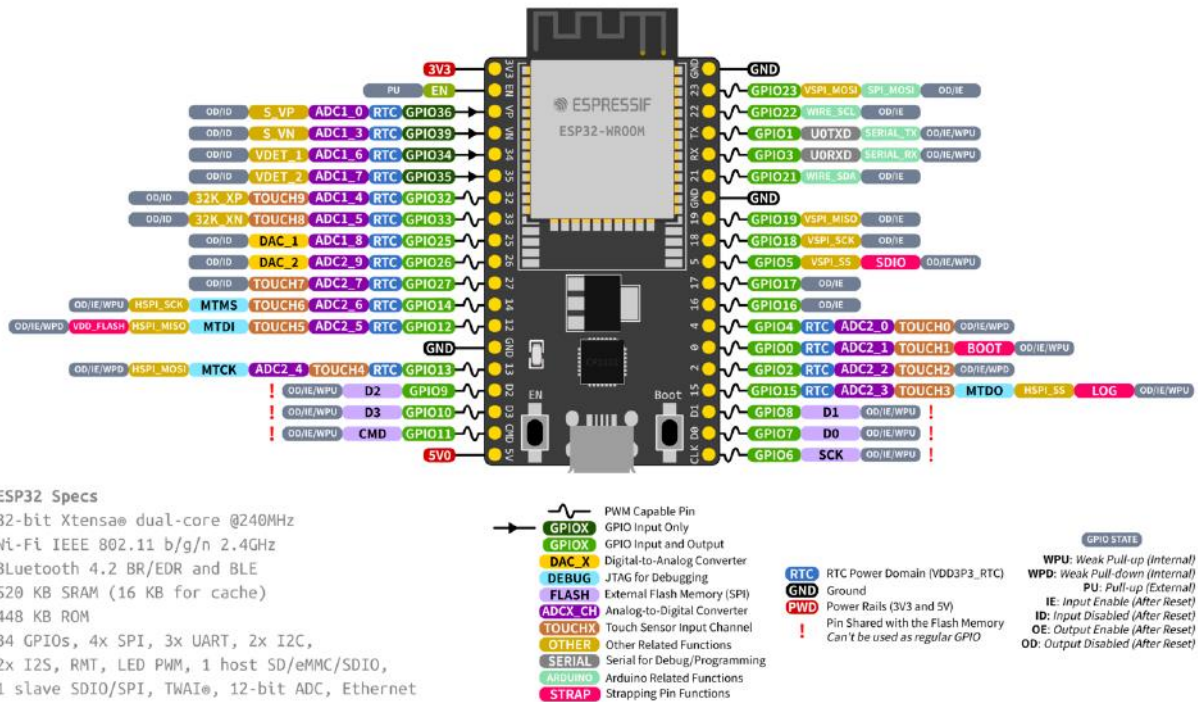


Fig. 2: ESP32-DevKitC Pin Layout (click to enlarge)

In case these issues occur, please remove the component. The figure below shows the location of C15 highlighted in yellow.

Start Application Development Before powering up your ESP32-DevKitC V4, please make sure that the board is in good condition with no obvious signs of damage.

After that, proceed to [Get Started](#), where Section *Installation* will quickly help you set up the development environment and then flash an example project onto your board.

Low Power Long Range Transceiver Module

Model No.:RFM95W/96W/98W

GENERAL DESCRIPTION

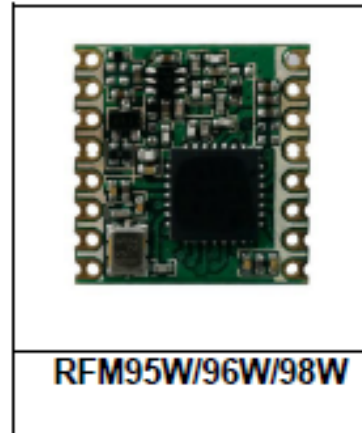
The RFM95W/96W/98W transceivers feature the LoRa™ long range modem that provides ultra-long range spread spectrum communication and high interference immunity whilst minimising current consumption.

Using LoRa™ modulation technique RFM95W/96W/98W can achieve a sensitivity of over -140dBm using a low cost crystal and bill of materials. The high sensitivity combined with the integrated +20 dBm power amplifier yields industry leading link budget making it optimal for any application requiring range or robustness. LoRa™ also provides significant advantages in both blocking and selectivity over conventional modulation techniques, solving the traditional design compromise between range, interference immunity and energy consumption.

These devices also support high performance (G)FSK modes for systems including WMBus, IEEE802.15.4g. The RFM95W/96W/98W deliver exceptional phase noise, selectivity, receiver linearity and IIP3 for significantly lower current consumption than competing devices.

KEY PRODUCT FEATURES

- ◆ LoRa™ Modem.
- ◆ 164 dB maximum link budget.
- ◆ +20 dBm - 100 mW constant RF output vs. 3.3V supply.
- ◆ +14 dBm high efficiency PA.
- ◆ Programmable bit rate up to 300 kbps.
- ◆ High sensitivity: down to -144 dBm.
- ◆ Bullet-proof front end: IIP3 = -12.5 dBm.
- ◆ Excellent blocking immunity.
- ◆ Low RX current of 10.3 mA, 200 nA register retention.
- ◆ Fully integrated synthesizer with a resolution of 61 Hz.
- ◆ FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa™ and OOK modulation.
- ◆ Built-in bit synchronizer for clock recovery.
- ◆ Preamble detection.
- ◆ 127 dB Dynamic Range RSSI.
- ◆ Automatic RF Sense and CAD with ultra-fast AFC.
- ◆ Packet engine up to 256 bytes with CRC.
- ◆ Built-in temperature sensor and low battery indicator.
- ◆ Module Size: 16*16mm



APPLICATIONS

- ◆ Automated Meter Reading.
- ◆ Home and Building Automation.
- ◆ Wireless Alarm and Security Systems.
- ◆ Industrial Monitoring and Control
- ◆ Long range Irrigation Systems

1. General Description

The RFM95W/96W/98W incorporates the LoRa™ spread spectrum modem which is capable of achieving significantly longer range than existing systems based on FSK or OOK modulation. With this new modulation scheme sensitivities 8 dB better than FSK can be achieved with a low-cost, low-tolerance, crystal reference. This increase in link budget provides much longer range and robustness without the need for external amplification. LoRa™ also provides significant advances in selectivity and blocking performance, further improving communication reliability. For maximum flexibility the user may decide on the spread spectrum modulation bandwidth (BW), spreading factor (SF) and error correction rate (CR). Another benefit of the spread modulation is that each spreading factor is orthogonal - thus multiple transmitted signals can occupy the same channel without interfering. This also permits simple coexistence with existing FSK based systems. Standard GFSK, FSK, OOK, and GMSK modulation is also provided to allow compatibility with existing systems or standards such as wireless MBUS and IEEE 802.15.4g.

The RFM95W/96W offers bandwidth options ranging from 125 kHz to 500 kHz with spreading factors ranging from 6 to 12, RFM98W Band3 module options ranging from 20.83kHz to 125kHz with spreading factors ranging from 6 to 12, The RFM95W covers the higher UHF bands. The RFM96W/98W cover the lower UHF bands.

1.1. Simplified Block Diagram

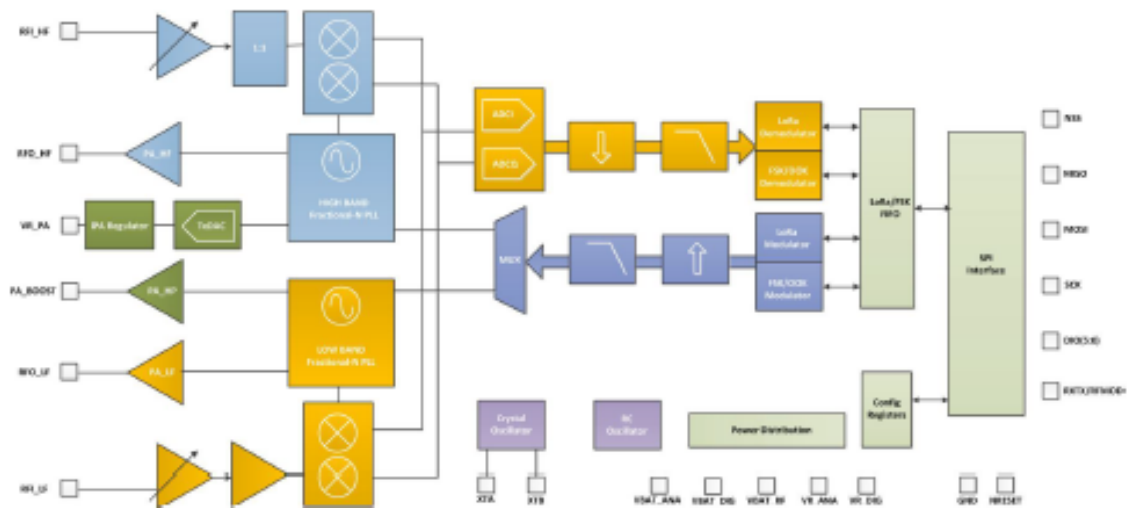


Figure 1. Block Diagram

1.2. Product Versions

The features of the three product variants are detailed in the following table.

Table 1 RFM95W/96W/98W Device Variants and Key Parameters

Part Number	Frequency Band	Spreading Factor	Bandwidth	Effective Bitrate	Est. Sensitivity
RFM95W	868/915MHz	6 - 12	125 - 500 kHz	.293 - 37.5 kbps	-111 to -136 dBm
RFM96W/98W	433/470MHz	6 - 12	62.5- 500 kHz	.1465 - 37.5 kbps	-112 to -140dBm
RFM98W	169MHz	6 - 12	31.25- 125 kHz	73.24- 9375 bps	-118 to -143 dBm

1.3. Pin Diagram

The following diagram shows the pin arrangement , top view.

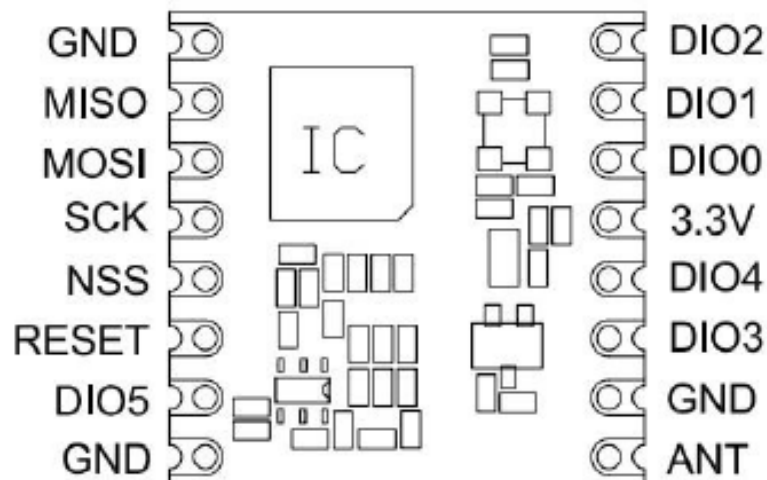


Figure 2. Pin Diagrams

1.4. Pin Description

Table 2 Pin Description

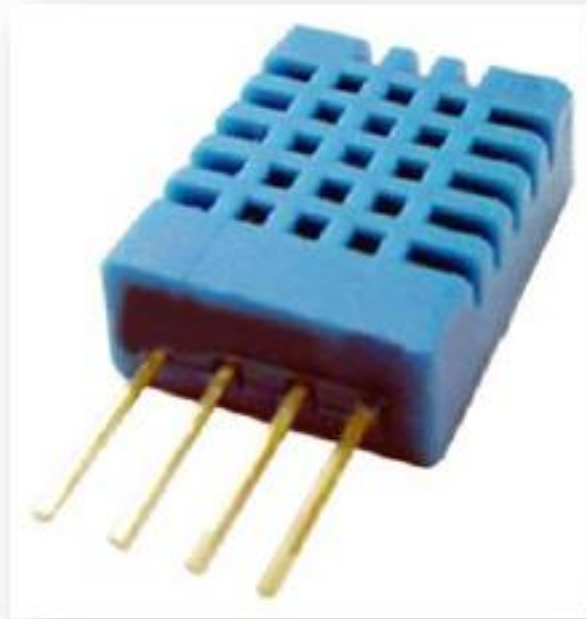
Number	Name	Type	Description
			Description Stand Alone Mode
1	GND	-	Ground
2	MISO	O	SPI Data output
3	MOSI	I	SPI Data input
4	SCK	I	SPI Clock input
5	NSS	I	SPI Chip select input
6	RESET	I	Reset trigger input
7	DIO5	I/O	Digital I/O, software configured
8	GND	-	Ground
9	ANT	-	RF signal output/Input.
10	GND	-	Ground
11	DIO3	I/O	Digital I/O, software configured
12	DIO4	I/O	Digital I/O, software configured
13	3.3V	-	Supply voltage
14	DIO0	I/O	Digital I/O, software configured
15	DIO1	I/O	Digital I/O, software configured
16	DIO2	I/O	Digital I/O, software configured

Hoja de datos técnicos para el sensor DHT11.

DHT 11 Humidity & Temperature Sensor

1. Introduction

DHT11 Temperature & Humidity Sensor features a temperature & humidity sensor complex with a calibrated digital signal output. By using the exclusive digital-signal-acquisition technique and temperature & humidity sensing technology, it ensures high reliability and excellent long-term stability. This sensor includes a resistive-type humidity measurement component and an NTC temperature measurement component, and connects to a high-performance 8-bit microcontroller, offering excellent quality, fast response, anti-interference ability and cost-effectiveness.



Each DHT11 element is strictly calibrated in the laboratory that is extremely accurate on humidity calibration. The calibration coefficients are stored as programmes in the OTP memory, which are used by the sensor's internal signal detecting process. The single-wire serial interface makes system integration quick and easy. Its small size, low power consumption and up-to-20 meter signal transmission making it the best choice for various applications, including those most demanding ones. The component is 4-pin single row pin package. It is convenient to connect and special packages can be provided according to users' request.

2. Technical Specifications:

Overview:

Item	Measurement Range	Humidity Accuracy	Temperature Accuracy	Resolution	Package
DHT11	20-90%RH 0-50 °C	± 5%RH	± 2°C	1	4 Pin Single Row

Detailed Specifications:

Parameters	Conditions	Minimum	Typical	Maximum
Humidity				
Resolution		1%RH	1%RH	1%RH
			8 Bit	
Repeatability			± 1%RH	
Accuracy	25 °C		± 4%RH	
	0-50 °C			± 5%RH
Interchangeability	Fully interchangeable			
Measurement Range	0 °C	30%RH		90%RH
	25 °C	20%RH		90%RH
	50 °C	20%RH		80%RH
Response Time (Seconds)	1/e(63%)25 °C , 1m/s Air	6 S	10 S	15 S
Hysteresis			± 1%RH	
Long-Term Stability	Typical		± 1%RH/year	
Temperature				
Resolution		1 °C	1 °C	1 °C
		8 Bit	8 Bit	8 Bit
Repeatability			± 1 °C	
Accuracy		± 1 °C		± 2 °C
Measurement Range		0 °C		50 °C
Response Time (Seconds)	1/e(63%)	6 S		30 S

3. Typical Application (Figure 1)

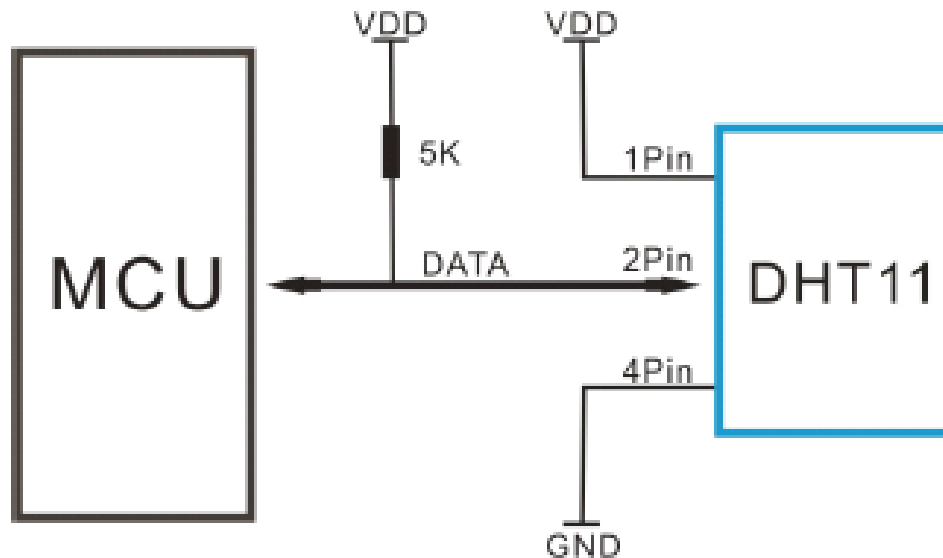


Figure 1 Typical Application

Note: 3Pin – Null; MCU = Micro-computer Unite or single chip Computer

When the connecting cable is shorter than 20 metres, a 5K pull-up resistor is recommended; when the connecting cable is longer than 20 metres, choose a appropriate pull-up resistor as needed.

4. Power and Pin

DHT11's power supply is 3-5.5V DC. When power is supplied to the sensor, do not send any instruction to the sensor in within one second in order to pass the unstable status. One capacitor valued 100nF can be added between VDD and GND for power filtering.

5. Communication Process: Serial Interface (Single-Wire Two-Way)

Single-bus data format is used for communication and synchronization between MCU and DHT11 sensor. One communication process is about 4ms.

Data consists of decimal and integral parts. A complete data transmission is 40bit, and the sensor sends higher data bit first.

Data format: 8bit integral RH data + 8bit decimal RH data + 8bit integral T data + 8bit decimal T data + 8bit check sum. If the data transmission is right, the check-sum should be the last 8bit of "8bit integral RH data + 8bit decimal RH data + 8bit integral T data + 8bit decimal T data".

Anexo D. Lecturas registradas para la figura 4.1 y 4.2

La toma de muestras para este análisis comenzó el día 13 de octubre del 2022 a las 7:00 AM y termino el día siguiente a la misma hora.

Lecturas del 13 al 14 de Octubre del 2022			
N°	Hora	Temperatura[°C]	Humedad [%]
1	07:00	10.1	75
2	07:15	10.3	75
3	07:30	10.2	76
4	07:45	10.3	75
5	08:00	11.3	73
6	08:15	14.7	63
7	08:30	16.8	61
8	08:45	18.3	60
9	09:00	20.2	57
10	09:15	22.5	48
11	09:30	24.9	44
12	09:45	26.1	42
13	10:00	27.5	37
14	10:15	29.4	35
15	10:30	29.4	33
16	10:45	31.3	32
17	11:00	30.8	29
18	11:15	32.5	26
19	11:30	31.3	25
20	11:45	33.2	16
21	12:00	32.5	19
22	12:15	33.2	17
23	12:30	33	19
24	12:45	34.2	19
25	13:00	33.5	16
26	13:15	34.1	20
27	13:30	33	17
28	13:45	34.7	16
29	14:00	34.1	17
30	14:15	35.9	13
31	14:30	33.9	15
32	14:45	34.8	16
33	15:00	34.4	16

34	15:15	33.7	16
35	15:30	32.4	19
36	15:45	34.8	17
37	16:00	33.5	16
38	16:15	34.8	16
39	16:30	34.6	16
40	16:45	34.2	16
41	17:00	33.9	17
42	17:15	31.7	20
43	17:30	29.6	23
44	17:45	29	25
45	18:00	26.9	29
46	18:15	27.7	29
47	18:30	25.9	31
48	18:45	25.6	32
49	19:00	23.2	35
50	19:15	21.3	37
51	19:30	21.2	41
52	19:45	20	48
53	20:00	19.1	54
54	20:15	18.6	60
55	20:30	18.2	60
56	20:45	17.6	59
57	21:00	17.4	64
58	21:15	16.8	65
59	21:30	16.9	65
60	21:45	16.8	64
61	22:00	16.2	67
62	22:15	16.1	69
63	22:30	15.4	71
64	22:45	15.3	70
65	23:00	15	72
66	23:15	14.5	73
67	23:30	14.1	73
68	23:45	14	73
69	00:00	13.6	74
70	00:15	13.5	74
71	00:30	13.3	74
72	00:45	13.3	75
73	01:00	13.3	74
74	01:15	13	75

75	01:30	12.7	75
76	01:45	12.5	75
77	02:00	12	76
78	02:15	12.3	75
79	02:30	12	75
80	02:45	11.9	75
81	03:00	11.8	75
82	03:15	11	74
83	03:30	11.3	74
84	03:45	11.1	74
85	04:00	11	74
86	04:15	10.9	75
87	04:30	10.5	75
88	04:45	10.6	75
89	05:00	10.8	75
90	05:15	10.5	75
91	05:30	10.2	76
92	05:45	10.3	75
93	06:00	10.2	75
94	06:15	10.2	75
95	06:30	10	75
96	06:45	10.1	76
97	07:00	9.8	75

Referencias bibliográficas.

- [1] Azcón-Bieto, J., & Talón, M. (2013). *Fundamentos de fisiología vegetal*. Madrid: Mc Graww-Hill.
- [2] Castilla, N. (2007). *Invernaderos de plástico: tecnología y manejo*. Madrid: Mundi-Prensa.
- [3] Cengel, Y., Boles, M., & Mehmet, K. (2019). *Termodinámica (9a. ed.)*. México: McGraw-Hill Interamericana.
- [4] Dogan, I. (2014). *PIC Microcontroller Projects in C*. Oxford: Elsevier.
- [5] El-Bendary, M. A. (2015). *Developing Security Tools of WSN and WBAN Networks Applications*. Tokyo: Springer.
- [6] Espressif Systems. (09 de Noviembre de 2021). *ESP32-DevKitC V4 Getting Started Guide*. Obtenido de ESP-IDF Programming Guide: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html#esp32-devkitc-v4-getting-started-guide>
- [7] Espressif Systems. (09 de Noviembre de 2021). *ESP32-WROOM-32*. Obtenido de Datasheet: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf
- [8] Fahmy, H. (2016). *Wireless Sensor Networks. Signals and Communication Technology*. Singapore: Springer.
- [9] Forster, A. (2016). *Introduction to Wireless Sensor Networks*. Piscataway, NJ: IEEE PRESS . doi:<https://ieeexplore-ieee-org.pbidi.unam.mx:2443/servlet/opac?bknumber=7906176>
- [10] Google Maps. (30 de Octubre de 2022). *Ingeniería Agrícola*. Obtenido de <https://www.google.com.mx/maps/place/Ingenier%C3%ADa+Agr%C3%ADcola/@19.6940121,-99.1906865,176m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x85d21fe1f095fd49:0x80d9ace076f2d642!8m2!3d19.6937817!4d-99.1897863>
- [11] HOPERF ELECTRONIC. (09 de Noviembre de 2021). *RFM95W*. Obtenido de <https://www.hoperf.com/data/upload/portal/20190801/RFM95W-V2.0.pdf>
- [12] Hussain, F. (2017). *Internet of Things: Building Blocks and Business Models*. Toronto: Springer Cham.
- [13] Jiménez, J., & Gutiérrez, C. (2014). *Termodinámica*. México: Grupo Editorial Patria.
- [14] Johan S. Rueda R., J. M. (2017). Similitudes y diferencias entre Redes de Sensores Inalámbricas e Internet de las Cosas: Hacia una postura clarificadora. *Revista Colombiana de Computación*, 58 - 74.
- [15] Jukka Suhonen, M. K. (2012). Protocols, Services and Applications. En M. K. Jukka Suhonen, *Low-Power Wireless Sensor Networks* (págs. 7-15). New York: Springer.
- [16] Kalantar-zadeh, K. (2013). *Sensors, an introductory course*. Melbourne: Springer.

- [17] Kamal, Z., & Salahuddin, M. (2015). *Wireless Sensor and Mobile Ad-Hoc Networks*. New York: Springer.
- [18] Lawrence P., O. J. (2019). *Agricultura protegida en México: Elaboración de la metodología para el primer bono verde agrícola certificado*. México: Banco Interamericano de Desarrollo. doi:<http://dx.doi.org/10.18235/0001705>
- [19] Lenscak, M., & Iglesias, N. (2019). *Invernaderos, Tecnología apropiada en las regiones productivas del territorio nacional argentino*. Panpanea: INTA Ediciones.
- [20] MathWorks. (09 de Septiembre de 2022). *ThingSpeak*. Obtenido de <https://la.mathworks.com/help/thingspeak/>
- [21] MathWorks. (18 de Septiembre de 2022). *ThingSpeak*. Obtenido de Heplp Center: <https://la.mathworks.com/help/thingspeak/>
- [22] MOUSER ELECTRONICS. (20 de 10 de 2022). *DHT 11 Humidity & Temperature Sensor*. Obtenido de Datasheet: <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>
- [23] Ojeda, W., & Flores, J. (2015). *Consideraciones agronómicas para el diseño de invernaderos típicos de México*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- [24] Raghunandan, K. (2022). *Introduction to Wireless Communications and Networks*. Suiza: Springer, Cham.
- [25] Rodríguez F., B. M.-A. (2015). *Advice and Suggestions for Greenhouse Technicians and Producers. In: Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth. Advances in Industrial Control*. Springer, Cham. doi:https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/978-3-319-11134-6_5
- [26] Salvatierra, D. (2012). *Microcontroladores PIC16F887A Y PIC16F887*. México: Alfaomega.
- [27] Saunders, S. R., & Aragón-Zavala, A. (2013). *Antenas y propagación para comunicaciones inalámbricas*. Nuevo Leon: McGraw-Hill Interamericana.
- [28] Selmic R.R., P. V. (2016). *Wireless Sensor Networks. Security, Coverage, and Localization*. USA: Springer, Cham. doi:<https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/978-3-319-46769-6>
- [29] Seneviratne, P. (2019). Introduction to LoRa and LoRaWAN. En P. Seneviratne, *Beginning LoRa Radio Networks with Arduino*. (págs. 1-22). Berkeley, CA.: Apress.
- [30] SIAP. (15 de Julio de 2022). *Superficie cubierta y número de instalaciones de agricultura protegida*. Obtenido de Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera: <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>
- [31] Sung-Moon, M. Y. (2020). *Modern Digital Radio Communication Signals and Systems*. Suiza: Springer, Cham.
- [32] Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. México: Prentice Hall.

- [33] UNIT ELECTRONICS. (02 de 11 de 2022). *Tienda de componentes electrónicos*. Obtenido de UNIT ELECTRONICS: <https://uelectronics.com/categoria-producto/componentes/>
- [34] Vargas-Canales, J. P.-R.-Á.-V.-L.-C. (2018). Efficiency of small enterprises of protected agriculture in the adoption of innovations in Mexico. *Estudios generales*, 34(146), 52 - 62. doi:<https://doi.org/10.18046/j.estger.2018.146.2811>
- [35] Wulff, A. (2019). *Beginning Radio Communications*. Massachusetts: Apress, Berkeley, CA.
- [36] Zhang Q., H. Y. (2021). *Agricultural Internet of Things. Agriculture Automation and Control*. (N. P. He Y., Ed.) Washington, USA: Springer, Cham. doi:https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/978-3-030-65702-4_3
- [37] Zheng, J., & Jamalipour, A. (2009). *Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective*. Piscataway, NJ: Wiley-IEEE Press. doi:<https://ieeexplore-ieee-org.pbidi.unam.mx:2443/servlet/opac?bknumber=5361027>
- [38] Zúñiga, I., & Crespo, E. (2015). *Meteorología y climatología*. Madrid: UNED.