

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA DE  
SENSORES PARA MONITOREO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD  
PARA UN CULTIVO DE INVERNADERO DE ROSAS**

**PRESENTADO POR**

**DUVAN CAMILO PUERTO BARAJAS**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**UNIVERSIDAD ECCI  
FACULTAD DE INGENIERIA  
BOGOTÁ D.C.**

**2016**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA DE  
SENSORES PARA MONITOREO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD  
PARA UN CULTIVO DE INVERNADERO DE ROSAS**

**PRESENTADO POR**

**DUVAN CAMILO PUERTO BARAJAS**

**DIRECTOR**

**ING. JAVIER ANDRÉS TORRES PÉREZ M.Sc**

**UNIVERSIDAD ECCI  
FACULTAD DE INGENIERIA  
BOGOTÁ D.C.**

**2016**

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi padre principalmente pues es la persona que me ha apoyado en todo el proceso, además de apoyarme incondicionalmente en mi vida entera. También lo dedico a mi tutor de tesis, pues fue un gran apoyo en el desarrollo, ejerciendo inclusive papel de compañero de trabajo.

También lo dedico a las personas, familiares y amigos que de una u otra forma me apoyaron para que no bajara el brazo y siguiera trabajando en la meta propuesta.

A mi padre, a mi tutor y a todos los que me ayudaron muchas gracias.

## **AGRADECIMIENTOS**

Le agradezco a la universidad por proporcionar los recursos físicos y económicos para la realización de este proyecto. También le agradezco a Andrés Torres por otorgar su tiempo en la asesoría de este trabajo. Agradezco a profesores y compañeros que me ayudaron con su conocimiento cuando más lo necesitaba.

A todos ellos muchas gracias por su apoyo.

## RESUMEN

El siguiente proyecto muestra el desarrollo y la implementación de una red inalámbrica de sensores enfocada a cultivos de invernadero, en donde primero se detalla cómo se realizó la selección de componentes en cuanto al hardware que compone la red. También se encuentra cómo se hicieron los diseños de la placa del circuito del "NODO AD" (el cual es el dispositivo que sustenta la red inalámbrica y fue llamado así por su creador). Muestra también el diseño de la placa de la fuente de alimentación y de los sensores que miden dos variables atmosféricas: Temperatura y humedad.

En la tercera parte detalla cómo se desarrolló la red inalámbrica (Red basada en radios Xbee). Para la cuarta parte presenta las pruebas de funcionamiento del NODO AD y su tabla de consumo. En la última etapa expone las pruebas de campo, en donde se implementa el dispositivo en un cultivo real (Cultivo de alverjas en un ambiente emulado) y sus respectivos resultados.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pag
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>TITULO DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	2
<b>PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</b> .....	3
3.1) DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	3
3.2) FORMULACIÓN DEL PROBLEMA: .....	4
<b>OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	5
4.1) OBJETIVO GENERAL .....	5
4.2) OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
<b>JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	6
5.1) JUSTIFICACIÓN .....	6
5.2) DELIMITACIÓN .....	7
<b>MARCO DE REFERENCIA DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	8
6.1) MARCO TEÓRICO .....	8
6.1.1) Microprocesador PIC18 .....	8
6.1.2) El micro controlador PIC 18LF26K22.....	8
6.1.2) Zigbee.....	9
6.1.3) Eagle.....	11
6.1.4) Protocolo I2c.....	11
6.1.5) Estándar RS232 .....	12
6.2) MARCO CONCEPTUAL.....	13
6.2.1) Humedad .....	13
6.2.2) Temperatura .....	15
6.2.3) Rosas .....	15
6.3) MARCO LEGAL.....	17
6.3.1) Artículo 75 de la constitución política de Colombia .....	17
6.3.2) Decreto 1900 de 1990 .....	17
6.3.3) Artículo 18.....	17
6.3.4) Artículo 33.....	18

6.3.5) Resolución 689.....	18
6.4) MARCO HISTORICO .....	19
6.4.1) Antecedentes.....	19
<b>DISEÑO METODOLOGICO .....</b>	<b>22</b>
7.1) DISEÑO DE LA PCB .....	22
7.1.1) Determinación de elementos. ....	22
7.1.2) Elementos adicionales .....	23
7.2) DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL PCB.....	28
7.2.1) Archivos Gerber .....	34
7.3) DISEÑO DE LA RED XBEE .....	35
7.3.1) Configuración de Parámetros .....	36
7.3.2) Visualización de los datos .....	38
7.3.3) Solución alternativa. ....	39
7.4) DIAGRAMA DE FLUJO.....	40
7.4.1) Diagrama de flujo del microcontrolador en el Coordinador. ....	41
7.4.2) Diagrama de Flujo del microcontrolador que está en el Nodo Router. ....	42
7.5) PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL NODO AD .....	43
7.5.1) Pruebas I2C .....	43
7.5.2) Pruebas USART.....	46
7.6) TABLA DE CONSUMO .....	48
7.7) PROCESAMIENTO DE DATOS HUMEDAD Y TEMPERATURA .....	48
7.8) PRUEBAS EN CAMPO .....	49
7.8.1) Capsulas hidrofóbicas .....	50
7.8.2) Pruebas en cultivo.....	51
7.8.3) Desarrollo de la prueba.....	53
7.8.4) Comparación capsulas hidrofóbicas .....	57
7.9) CONEXIÓN CONECTOR P606C CON EL NODO.....	58
7.10) NODO AD .....	60
7.11) MEDIDAS .....	63
7.12) COSTOS .....	64

<b>RESULTADOS</b> .....	66
<b>CONCLUSIONES</b> .....	68
<b>TRABAJOS FUTUROS</b> .....	70
<b>GLOSARIO</b> .....	71
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	72
<b>ANEXOS</b> .....	75
13.1 HOJAS DE ESPECIFICACIÓN .....	75
13.2 OTROS DOCUMENTOS .....	75

## LISTAS ESPECIALES

### TABLAS

Tabla 1 Comparación de precios de dispositivos.....	6
Tabla 2 Dispositivos del proyecto.....	24
Tabla 3 Comparación de sensores.....	25
Tabla 4 Comparación de radios.....	26
Tabla 5 Comparación de microcontroladores.....	27
Tabla 6 Tabla de consumo.....	47
Tabla 7 Resoluciones permitidas en el SHT21 .....	48
Tabla 8 Medidas del NODO AD.....	61
Tabla 9 Costos.....	62

### GRAFICAS

Grafica 1 Humedad Relativa por 15 minutos.....	52
Grafica 2 Humedad Relativa por 60 minutos.....	53
Grafica 3 Temperatura por 15 minutos.....	53
Grafica 4 Temperatura por 60 minutos.....	54

### FIGURAS

Fig 1 Dispositivos Zigbee.....	10
Fig 2 Red Zigbee tipo Mesh.....	10
Fig 3 Red Basada en protocolo I2C.....	12
Fig 4 Circuito de MEWIN.....	19

Fig 5 NODO MICA.....	20
Fig 6 Programa ECH20.....	20
Fig 7 Nodo EM50.....	21
Fig 8 Conector P606C.....	24
Fig 9 Plano Microcontrolador.....	28
Fig 10 Plano Radio Xbee.....	29
Fig 11 Plano Memoria EEPROM.....	29
Fig 12 Plano RTC.....	30
Fig 13 Plano MAX 3232.....	30
Fig 14 Plano conector P606C.....	31
Fig 15 Plano Placa de sensores.....	31
Fig 16 Plano Placa de Fuentes.....	32
Fig 17 Plano completo NODO AD.....	32
Fig 18 Parte TOP NODO AD.....	33
Fig 19 Parte BOTTOM NODO AD.....	33
Fig 20 Capas de Archivo GERBER.....	34
Fig 21 Red real.....	35
Fig 22 Configuración NODO Router A.....	36
Fig 23 Configuración NODO Coordinador.....	37
Fig 24 Visualización de datos.....	38
Fig 25 Comunicación I2C Microcontrolador-Sensor.....	42
Fig 26 Trama comunicación sensor 1.....	42
Fig 27 Trama comunicación sensor 2.....	43
Fig 28 Comparación tramas del mismo sensor.....	43

Fig 29 Desfase en segundos de las Tramas.....	44
Fig 30 Comunicación I2C Microcontrolador-Memoria.....	44
Fig 31 Comunicación I2C Microcontrolador-RTC.....	45
Fig 32 Comunicación USART Microcontrolador-Radio.....	45
Fig 33 Trama enviada hacia el computador.....	46
Fig 34 Capsula hidrofóbica de ADAFRUIT.....	48
Fig 35 Capsula hidrofóbica de China.....	49
Fig 36 Materas empleadas en el cultivo.....	50
Fig 37 Cultivo de alverjas 45 días de gestación.....	50
Fig 38 Sensores Seleccionados.....	51
Fig 39 Comparación Capsulas hidrofóbicas .....	55
Fig 40 Conector P606C.....	56
Fig 41 Disposición de pines P606C.....	56
Fig 42 PCB del Sensor.....	57
Fig 43 Configuración de pines PCB sensor.....	57
Fig 44 Conexión Conector Hembra- Macho P606C.....	58
Fig 45 Parte superior NODO AD.....	58
Fig 46 Parte inferior NODO AD.....	59
Fig 47 Fuente y Baterías.....	59
Fig 48 NODO AD completo.....	60
Fig 49 Medidas del NODO AD.....	61

## INTRODUCCIÓN

Las redes de sensores inalámbricas (WSN), son una alternativa tecnológica económica, debido a que no necesitan cableado físico, lo que se traduce en un ahorro de costos; además es práctica y flexible, ya que en algunas áreas no es fácil desplegar una red física, como es el caso de un cultivo de invernadero. Con solo ubicar los sensores – radios en los puntos específicos y configurarlos de manera adecuada, se logra obtener una red funcional para monitorear las variables atmosféricas requeridas.

Al desarrollar esta tecnología en Colombia, siendo nuestro país catalogado como: “En vía de desarrollo” permite que sea competitivo a nivel internacional en muchos sectores industriales, en particular en el sector floricultor, mercado en donde Holanda se posiciona como primer exportador mundial de flores gracias a una alta inversión y desarrollo tecnológico [5].

El Impacto que tiene esta tecnología a nivel socio-económico, consiste en que permite generar más fuentes de empleo, dado que el sector floricultor es un sector constituido mayoritariamente por madres cabeza de familia. Al implementar una tecnología que ayuda a mejorar la calidad de las flores, se mejora la productividad, se fortalece el sector y aumenta la demanda a nivel internacional, esto garantiza una mano de obra laboral estable y creciente.

## **TITULO DE LA INVESTIGACIÓN**

Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores para monitoreo de temperatura y humedad en un cultivo de invernadero de rosas

## PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 3.1) DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El Sector Floricultor, es el cuarto renglón más importante de la Economía Colombiana, después del Petróleo, Café, y Carbón [1]. La Rosa en particular es la flor con mayor importancia dentro del renglón económico. En el año 2013 el país exportó 211.978 toneladas de flores que equivalen a 1.334 millones de dólares, de los cuales el 27.4% fue producto de la venta de tallos de rosas. [7]

En el año 2013 Holanda, con una participación en ventas del 52%, se posicionó como el primer exportador mundial de flores, gracias a su buen proceso de automatización de cultivos[5], que les permitió generar una cosecha de mejor calidad, llevándolas a ser más apetecidas por los comerciantes, mientras que Colombia obtuvo el segundo lugar [2], con una participación en ventas del 18%, a pesar de su excelente ubicación geográfica, la cual proporciona condiciones naturales que favorecen una mejor cosecha. [3]

Según estudio realizado en el año 2006 por el Banco de la República, se requiere impulsar un desarrollo tecnológico que solvete varios problemas relacionados con el sector floricultor [4], entre los cuales se encuentran dos aspectos de nuestro interés en particular:

- a) Desarrollo de nuevos sistemas de vigilancia de temperatura y humedad.
- b) Reducir la tasa de afectación que tiene la enfermedad denominada “Mildeo Velloso” generada por la humedad y relacionada con los excesos de lluvia en zonas de cultivo.

Con base en lo anterior, se hace visible la necesidad de diseñar e implementar un sistema mediante el cual se pueda monitorear en tiempo real el comportamiento de las variables atmosféricas presentes en un cultivo de invernadero para rosas, con el fin de facilitarles a los Ingenieros y Tecnólogos Agroindustriales, la adquisición de información ambiental precisa, que les permita controlar en todo momento el estado de la cosecha, así como planear y ejecutar acciones de mejora dentro de la misma.

### 3.2) FORMULACIÓN DEL PROBLEMA:

¿Cómo automatizar un sistema que monitoree la temperatura y humedad para cultivos de rosas producidas en Invernadero?

## OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

### 4.1) OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un sistema en hardware que sirva como plataforma para implementar una red de sensores inalámbricos (WSN, Wireless Sensor Networks), con capacidad para monitorear hasta dos variables atmosféricas presentes en un cultivo de rosas de invernadero.

### 4.2) OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Identificar tanto las variables presentes en un cultivo de rosas, como las falencias en la toma y monitoreo de datos.
- ✓ Establecer y caracterizar las variables a monitorear, para determinar la frecuencia de muestreo, el ancho de banda requerido por el sistema y los sensores a utilizar.
- ✓ Seleccionar el procesador y el radio transmisor-receptor a utilizar en la implementación de un módulo que pueda configurarse como coordinador, enrutador o terminal final.
- ✓ Integrar los elementos necesarios (procesador, radio, circuito de alimentación) en un módulo de hardware funcional, con los cuales se implementará la red inalámbrica de sensores.
- ✓ Implementar una red inalámbrica junto a un protocolo de comunicación pre establecido y determinar su funcionalidad.
- ✓ Implementar un sistema de visualización de la información a través de una laptop.

## JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

### 5.1) JUSTIFICACIÓN

En el mercado Colombiano es posible encontrar soluciones tecnológicas similares, que se adaptan a las necesidades de los floricultores nacionales y suplen las problemáticas anteriormente descrita, sin embargo los costos de estas soluciones las hacen poco viables incluso para las multinacionales con mayor músculo financiero. Esto se pudo constatar al realizar una visita a AGROEXPO en 2015 donde se realizaron varias cotizaciones con diferentes fabricantes los cuales proveen redes inalámbricas con sensores que permiten monitorear las variables mencionadas, en tiempo real, como se muestra en la **tabla 1**.

Dado el alto costo por parte de los fabricantes y gracias a que en la actualidad existen empresas que fabrican circuitos integrados más económicos se encontró que es posible diseñar un hardware propio mediante el cual se pueda implementar una red inalámbrica de sensores junto a un sistema de monitoreo de variables ambientales tales como humedad y temperatura.

Teniendo en cuenta lo anterior se determinó que este problema puede ser la oportunidad para desarrollar una tecnología enfocada a nivel nacional, que dé respuesta a las problemáticas presentes en el campo floricultor y agrícola de nuestro país y que además sea de muy bajo costo.

Dispositivo	Tipo	Precio	Empresa	Web de precio
Em50R	Nodo	€ 409,55	Decagon Devices	<a href="http://es.aliexpress.com">http://es.aliexpress.com</a>
5MT	Sensor H & T	€ 141,07	Decagon Devices	<a href="http://es.aliexpress.com">http://es.aliexpress.com</a>
Em50	Nodo	€ 405,00	Decagon Devices	<a href="http://es.aliexpress.com">http://es.aliexpress.com</a>
5TE	Sensor H & T	€ 181,11	Decagon Devices	<a href="http://es.aliexpress.com">http://es.aliexpress.com</a>
GS3	Sensor H & T	€ 436,85	Decagon Devices	<a href="http://es.aliexpress.com">http://es.aliexpress.com</a>

Tabla 1. Comparación precios de dispositivos de la marca Decagon Devices (El nodo y el sensor se vende por separado).

## 5.2) DELIMITACIÓN

El Objetivo del proyecto es desarrollar un sistema inalámbrico de adquisición de datos para un cultivo de invernadero de rosas, que monitoree dos variables (temperatura y humedad) sin embargo puede haber una migración a otra(s) variable(s) requerida(s) por las condiciones y necesidades del cultivo o dependiendo de la disponibilidad del sensor en el mercado.

El sistema estará compuesto por una unidad en hardware que se reconoce como "nodo", para un mejor diseño se desarrollará en tres bloques; El primero comprende un sistema de radio frecuencia (RF) limitado por las características de los fabricantes en cuanto a costos, tamaño, frecuencia de transmisión, operabilidad y rango de comunicación entre nodo y nodo. El segundo bloque contiene cualquiera de los dos sensores (no se harán los sensores), se escogerán de acuerdo a su costo, facilidad de implementación u otras características, este bloque procesará la señal generada por los sensores. Por último está el tercer bloque, el cual conlleva un microprocesador mínimo de 8 bits y que cuente con los siguientes periféricos: SPI, USART, I2C y ADC.

Durante este proyecto se utilizará un protocolo de red ya establecido, más no se diseñará uno nuevo. A continuación se mencionan los posibles protocolos que se pueden usar: Miwi, Xbee y Zigbee[8],[9]. Se escogerá el que convenga de acuerdo a costos, diseño, accesibilidad y facilidad de implementación.

La unidad "nodo" podrá ser configurada como coordinador, router o dispositivo final.

El prototipo no ejercerá control sobre el cultivo, solo hará la adquisición de los datos y la visualización de estos por medio de un computador. Para el momento de la propuesta del desarrollo no se ha establecido cual lenguaje computacional se utilizará. En su momento se escogerá el que mejor se adapte a los requisitos del proyecto.

## MARCO DE REFERENCIA DE LA INVESTIGACIÓN

### 6.1) MARCO TEÓRICO

#### 6.1.1) Microprocesador PIC18

Los microprocesadores PIC18 de 8 bits de la casa fabricante Microchip® fueron desarrollados en el año 1999 bajo la estructura harvard, los cuales incorporaban una serie de mejoras comparados con sus antecesores los microprocesadores de la familia PIC 16. Entre las mejoras más destacadas se pueden nombrar el aumento de capacidad en su memoria de programa y memoria de datos. Los procesadores corren instrucciones con mayor velocidad de procesamiento y sus periféricos han mejorado y aumentado en número. Un aporte importante que se destaca en algunos microprocesadores es su bajo consumo llamado comúnmente como XLP (Extreme Low Power) que permite la implementación de sistemas a base de baterías para alimentar su funcionamiento debido al bajo consumo de potencia. [10]

#### 6.1.2) El micro controlador PIC 18LF26K22

Este dispositivo de la familia PIC18 posee una memoria de programa tipo Flash de 64KB. También tiene dos memorias para datos, la primera tipo SRAM de 3896 Bytes y la segunda una memoria EEPROM 1024 Bytes. También cuenta con 25 pines de uso I/O (Input /output) 19 de ellos habilitados para conversión de datos para el módulo ADC (Analog to digital Conversion). Cuenta Con 5 módulos CCP, 2 MSSP, 2 USART, 3 Timer de 8 bits y 4 Timer de 16 bits.

Este microcontrolador cuenta con la opción de bajo consumo XLP y consume un voltaje nominal de 1.8 V a 3.6 V. Posee un Oscilador interno de 16 MHz y tiene dos entradas para oscilador externo para más de 64 MHz. [11]

### 6.1.2) Zigbee

En 1999 el grupo Firefly Working Group creó la tecnología que dio paso a lo que se conoce como Zigbee. Hoy esta tecnología es estipulada en el estándar IEEE 802.15.4 adoptado en 2003.[paper en ingles de zigbee]. Zigbee es un protocolo de radio frecuencia (RF) el cual especifica la forma como se debe realizar la comunicación en una red inalámbrica de área personal (WPAN). Las características básicas se concentran en redes con bajo consumo, ciclos de trabajos bajos y dispositivos con baja tasa de velocidad de procesamiento. Zigbee provee ruteo y funciones multi hop para paquetes basados en protocolos de radio.

La especificación Zigbee es un producto de la alianza que lleva su mismo nombre, la cual es una asociación de compañías trabajando juntas para asegurar el éxito del uso de un estándar global IEEE 802.15.4.

#### 6.1.2.1) Xbee

Xbee es el nombre que Digi le dio a los transceptores físicos de radio frecuencia y se refiere a la forma del protocolo, pero dichos radios son basados en Zigbee, por lo tanto Xbee es una red radial que puede recibir y transmitir datos en diferentes frecuencias, por medio de unos módulos de radio frecuencia.

#### 6.1.2.2) *Tipos de módulos.*

Zigbee define tres diferentes dispositivos: coordinador, router y dispositivo final como se describen en la Fig 1.

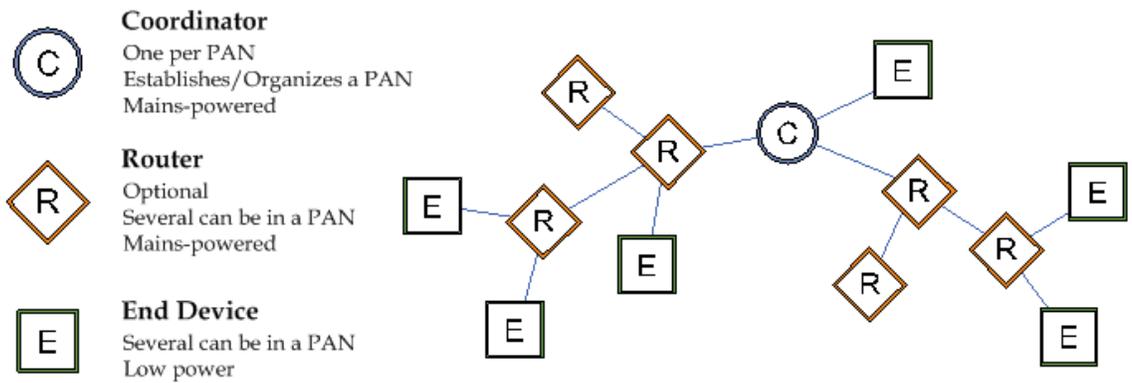


Fig 1. Muestra los diferentes dispositivos que pertenecen al protocolo Zigbee.

### 6.1.2.3) Topología tipo MESH

En la topología Tipo mesh (Fig 2) se necesita un puente de red o una puerta de entrada para transportar los datos en una red de área personal (PAN) o en una red de área extendida (WAN). Los datos pueden ser almacenados en un servidor remoto para después ser procesados. [12]

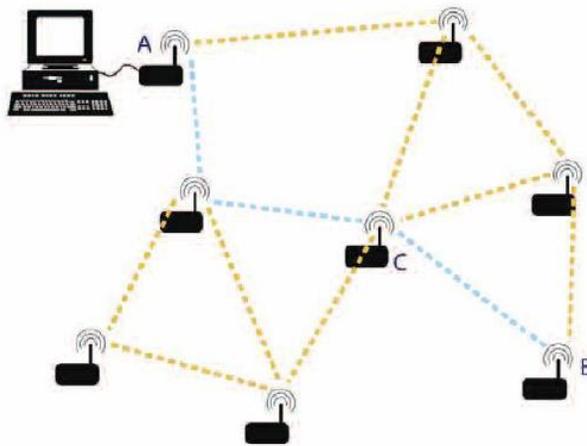


Fig 2. Muestra una red Zigbee tipo Mesh

#### 6.1.2.4) Diferencias entre Xbee y Zigbee

Xbee es el nombre que Digi le dio a los transceptores físicos de radio frecuencia y se refiere a la forma del protocolo. Zigbee es un protocolo de radio frecuencia (RF) el cual especifica la forma como se debe realizar la comunicación en una red inalámbrica de área personal (WPAN). Las características básicas se concentran en redes con bajo consumo, ciclos de trabajos bajos y dispositivos con baja tasa de velocidad de procesamiento.

#### 6.1.3) Eagle

Eagle (En inglés Easy Applicable Graphical Layout Editor) es un software de edición para PCBs adaptado hacia las necesidades de diseñadores y estudiantes. Provee herramientas de diseño en un entorno fácil de manejar, intuitivo y sencillo, el cual posee una librería extensiva, con la posibilidad de añadir elementos ya sea creados por el diseñador o tomados de otra fuente. Eagle maneja dos entornos de diseño, el primero es un entorno gráfico, en donde el diseñador construye el circuito a modo lógico, usando los símbolos que representan a los dispositivos y entrelazándolos para formar la red electrónica que se desea. En segundo lugar está el entorno real que migra del primer entorno y en el cual se puede visualizar como quedara la PCB en su forma física, con dimensiones reales, con el esquemático real de los dispositivos y con los caminos eléctricos establecidos. La herramienta de CadSoft resulta muy útil y es ampliamente usada en el entorno profesional.

#### 6.1.4) Protocolo I2c

Es un protocolo de comunicación bidireccional desarrollado por Philips Semiconductors en 1982. Es comúnmente llamado I2C. Tiene solo dos líneas de transmisión: Una de datos seriales bidireccional (SDA) y una línea de reloj (SCL). La comunicación es en formato serial y está basada en una trama de 8 bits de información bidireccional que puede viajar a velocidades promedio de 100kbit/s en el modo estándar y a 400kbits/s en modo Fast.

El protocolo es ahora implementado en millones de dispositivos ICs producidos por más de 50 compañías. Es usado comúnmente para sistemas de control en donde se necesite enviar y recibir información de chips a otros chips, como los son los PICs o los sensores que tienen embebido el protocolo.

Existen dos entes en el protocolo; El maestro y los esclavos. El primero es quien controla la comunicación y los segundos son los que obedecen. [13]

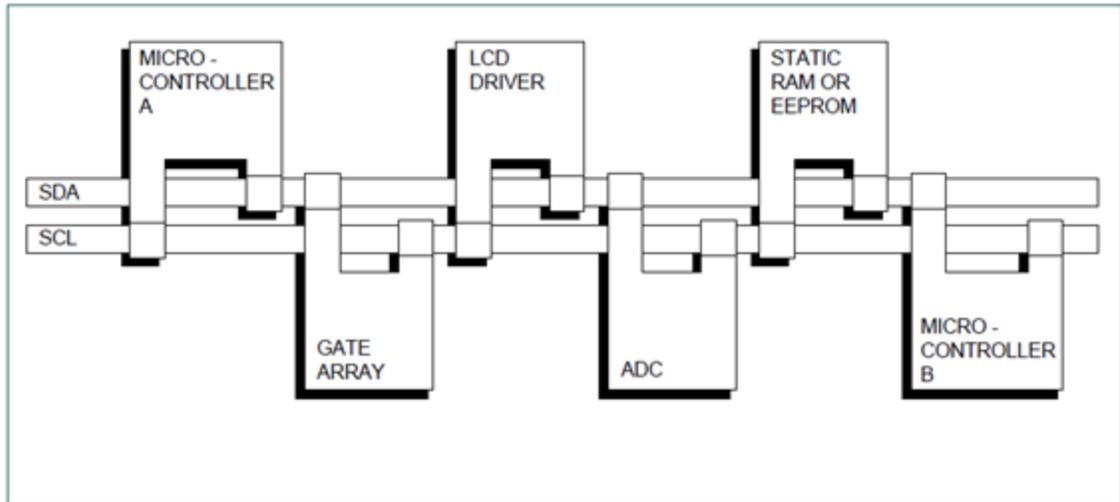


Fig 3. Se observa una red basada en el protocolo I2c, en donde se tienen 6 dispositivos diferentes de los cuales el microcontrolador A es el maestro y los demás son los esclavos.

#### 6.1.5) Estándar RS232

Es también llamado TIA/EIA fue introducido en el mercado en 1962 para estandarizar la comunicación entre varios dispositivos, dado que existían muchos protocolos y no se podían comunicar los unos con los otros. Provee las funciones de estabilizar, mantener y terminar una comunicación. El rápido crecimiento de la computadora personal provocó un uso acelerado del estándar, ampliamente usado en las comunicaciones entre dispositivos como por ejemplo: los mouse, impresoras, etc.

Todos los circuitos con RS232 llevan señales de voltaje y no exceden los  $\pm 25V$ . Puede manejar comunicación serial, asíncrona y síncrona. La velocidad de transmisión depende del fabricante y el protocolo usado. [14]

## 6.2) MARCO CONCEPTUAL

### 6.2.1) Humedad

La humedad es la cantidad de vapor de agua presente en una mezcla la cual puede estar en estado sólido o líquido, es un proceso natural que se presenta a nivel molecular. Existen varias formas de medir la humedad; Humedad absoluta, Humedad específica, Humedad relativa y punto de rocío.

#### 6.2.1.1) Humedad absoluta

Es la razón entre la masa de agua presente en la mezcla (en [Kg]), y el volumen (en [m<sup>3</sup>]) de la misma (aire, tierra, etc.).

$$\text{Humedad Absoluta} = \frac{\text{Kg (masa de agua)}}{\text{m}^3 \text{ (volumen de aire, tierra, etc)}} \quad (1)$$

#### 6.2.1.2) Humedad específica

Es la razón entre la masa de agua y la masa de sustancia seca presentes en la mezcla ([Kg agua]/[Kg Sustancia seca]).

$$\text{Humedad Especifica} = \frac{\text{Kg (agua)}}{\text{Kg (Sustancia Seca)}} \quad (2)$$

### 6.2.1.3) Presión parcial de vapor ( $P_v$ ):

Es la fracción de presión ambiental debido a la presencia de vapor de agua en el aire, se mide en [Pascal] lo que equivale a [N/m<sup>2</sup>].

### 6.2.1.4) Presión de vapor de saturación ( $P_{sat}$ ):

Es la máxima presión de vapor que un gas puede soportar, a una cierta temperatura y presión atmosférica, a partir de la cual el vapor se comienza a condensar (cambia a estado líquido), se mide en [Pa].

### 6.2.1.5) Humedad Relativa

La humedad relativa es normalmente usada para propósitos de medición. Esta es definida como la razón entre la presión parcial de vapor en el aire y la presión de saturación del vapor a una dada temperatura. O de otra manera, es la cantidad de agua que contiene un gas expresada en tanto por ciento de la cantidad que el gas tendría en estado de saturación, a la misma temperatura y presión absoluta: Esta es normalmente expresada en porcentaje.[15]

La humedad relativa es muy sensible al cambio de temperatura.

$$RH = \frac{P_v}{P_{sat}} * 100[\%] \quad (3)$$

Note que:

- si  $P_v = P_{sat}$ , se tiene una humedad relativa del 100%.
- $P_v$  = Presión parcial de vapor de aire.
- $P_{sat}$  = Presión de saturación.

## 6.2.2) Temperatura

La temperatura de la materia se expresa con un número que corresponde a lo caliente o frío que una materia, según determinada escala. Existen actualmente tres tipos de variables para medir la temperatura; Celsius, Fahrenheit y Kelvin. LA temperatura es proporcional a la energía cinética de translación promedio del movimiento molecular (el que lleva la molécula de un lugar a otro). [16]

### 6.2.2.1) *Índice de calor*

El Índice de calor indica como el cuerpo humano siente la temperatura. Si la humedad relativa es baja, el cuerpo humano se enfría a si mismo por medio de transpiración, de esta manera disipando el calor del cuerpo. En una condición de humedad relativa alta la velocidad de evaporación sobre la piel humana es bajo, por lo tanto no puede disipar fácilmente el calor como en el caso del aire seco. [17]

## 6.2.3) Rosas

### 6.2.3.1) *Luz*

Las rosas son extremadamente sensibles a la falta de luz. La capacidad de las plantas de rosal para interceptar y utilizar la energía luminosa por la fotosíntesis determina la posibilidad de carbohidratos y energía para su crecimiento.

Aunque las hojas expuestas al sol se saturan a 2.000 – 3.000 bujías-pie (los niveles de fotosíntesis no aumentarían con incrementos adicionales de luz) la planta entera alcanza su fotosíntesis máxima solo cuando la intensidad luminosa sube a 10.000 bujías-pie. La sombra de las hojas es el principal responsable de esta diferencia en los niveles de saturación luminosa. Cuando hay mayor número de horas luz, hay un incremento en la producción, una reducción entre los días a floración y una mayor longitud de los tallos.

#### *6.2.3.2) Iluminación artificial*

Por muchos años se pensó que la rosa no respondía a la luz suplementaria. Las investigaciones muestran que esto es falso. Usando una serie de fuentes de luz como lámparas de vapor de alta presión (HID) o combinaciones de lámparas fluorescentes e incandescentes, se ha demostrado que la producción de rosas puede mejorar significativamente a través del uso de luz suplementaria. Se han reportado incrementos del 50% -240% en la producción.

#### *6.2.3.3) Temperatura*

La temperatura es un factor que tiene un efecto decisivo en la calidad y producción de un rosal. En promedio, las temperaturas ideales son de 28°C en el día y de 12°C en la noche. La temperatura ideal para la hora es de 24°C, a temperaturas mayores (40°C) la hoja muere, por debajo de 10°C la hoja no es activa, es decir, no existe translocación de fotosintatos desde la hoja hacia tallos y flores, y como consecuencia se tiene una hoja más grande.

La fotosíntesis debe ser mayor que la respiración para que se consiga un rápido crecimiento es por ello que la temperatura diurna debe estar en función de la luz recibida, la máxima temperatura debe ser de 29°C.

#### *6.2.3.4) Efecto de la temperatura sobre la producción*

En contraste las temperaturas bajas reducen la productividad y retrasan la floración, pero tiene alta calidad y especialmente mayor peso fresco.

#### *6.2.3.5) Temperaturas nocturnas*

Se ha determinado que durante la noche la rosa tiene un mayor crecimiento que durante el día, allí la temperatura cumple un rol muy importante. Se tiene como regla que a mayor temperatura mayor producción, debido al acortamiento entre floraciones, pero no a que se activen yemas por tallo pues esto es más responsabilidad de la luz.

#### 6.2.3.6) *Temperaturas diurnas*

Existe una tendencia a olvidar la importancia de la temperatura durante el día. En las épocas de verano en la mayoría de campos se alcanzan temperaturas demasiado altas, que dan como resultado un capullo floral más pequeño de lo normal. La luz afecta la velocidad de fotosíntesis, mientras que la temperatura afecta la respiración, para conseguir un crecimiento rápido. Esto pone en evidencia que la temperatura diurna debe estar en función de la cantidad de luz recibida. [6]

### 6.3) MARCO LEGAL

#### 6.3.1) Artículo 75 de la constitución política de Colombia

El espectro electromagnético es un bien público inenajenable e imprescriptible sujeto a la gestión y control del Estado. Se garantiza la igualdad de oportunidades en el acceso a su uso en los términos que fije la ley.

Para garantizar el pluralismo informativo y la competencia, el Estado intervendrá por mandato de la ley para evitar las prácticas monopolísticas en el uso del espectro electromagnético [18]

#### 6.3.2) Decreto 1900 de 1990

Por el cual se reforman las normas y estatutos que regulan las actividades y servicios de telecomunicaciones y afines. [19]

#### 6.3.3) Artículo 18

El espectro electromagnético es de propiedad exclusiva del Estado y como tal constituye un bien del dominio público, inajenable e imprescriptible, cuya gestión, administración y control corresponden al Ministerio de Comunicaciones de conformidad con las leyes vigentes y el presente Decreto.

#### 6.3.4) Artículo 33

Servicios especiales son aquellos que se destinan a satisfacer, sin ánimo de lucro ni comercialización en cualquier forma, necesidades de carácter cultural o científico. Forman parte de estos servicios, entre otros, el de radioaficionados, los experimentales, y los relacionados con la investigación industrial, científica y técnica.

#### 6.3.5) Resolución 689

Por la cual se atribuyen unas bandas de frecuencia para su libre utilización dentro del territorio nacional, mediante sistemas de acceso inalámbrico y redes inalámbricas de área local, que utilicen tecnologías del espectro ensanchado y modulación digital, de banda ancha y baja potencia, y se dictan otras disposiciones.

En las disposiciones técnicas se debe mencionar el artículo 5:

Artículo 5. Bandas de frecuencias.

Se atribuyen dentro del territorio nacional, a título secundario, para operación sobre una base de no-interferencia y no protección de interferencia, los siguientes rangos de frecuencias radioeléctricas, para su libre utilización por sistemas de acceso inalámbrico y redes inalámbricas de área local, que empleen tecnologías de espectro ensanchado y modulación digital, de banda ancha y baja potencia, en las condiciones establecidas por esta resolución. [20]

- a) Banda de 902 a 928 MHz;
- b) Banda de 2 400 a 2 483,5 MHz;
- c) Banda de 5 150 a 5 250 MHz;
- d) Banda de 5 250 a 5 350 MHz;
- e) Banda de 5 470 a 5 725 MHz;
- f) Banda de 5 725 a 5 850 MHz.

## 6.4) MARCO HISTORICO

### 6.4.1) Antecedentes

#### 6.4.1.1) MEWIN

MEWIN (*Multi Environmental Wireless Node*) fue un nodo desarrollado por la universidad politécnica de Cartagena para monitorear variables como temperatura. Fue optimizado para cultivos tipo hortícola. Para el diseño en hardware, se usaron los radios CC2520 y el microprocesador MSP430F2618 todos del fabricante TI (*Texas Instruments*). Se usó un reloj en tiempo real el cual no especifican y una memoria SD para almacenar los datos. Para el protocolo de comunicación inalámbrica se usó Zigbee y se implementó una librería que proporcionaba el fabricante de los radios llamada Z-stack. Para alimentar el sensor se desarrolló una placa aparte que proporcionaba el potencial eléctrico. [9]

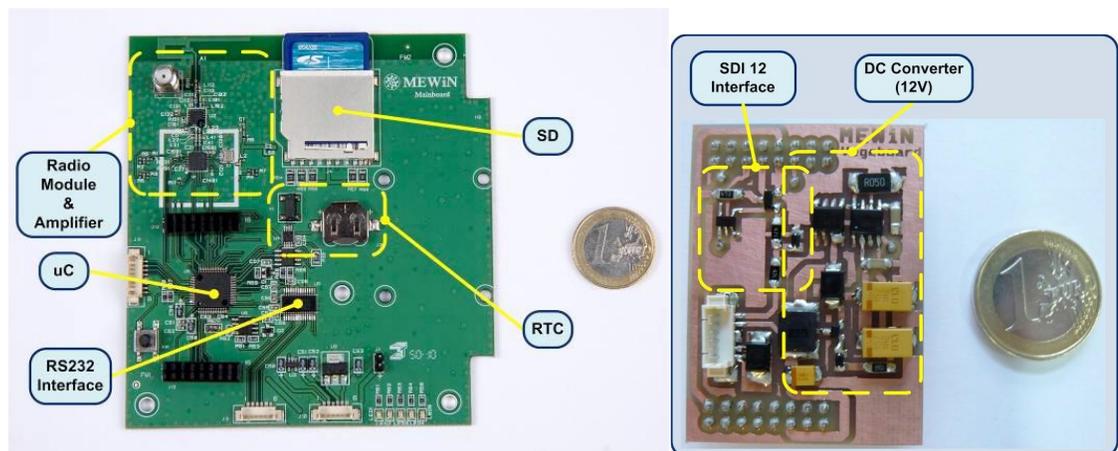


Fig 4. Muestra el circuito de MEWIN, comparando los tamaños respecto a una moneda de 1 euro.

#### 5.4.1.2) Monitoring System using in flowers growing

Fue un Proyecto que desarrollaron en la Universidad Sergio Arboleda, en Bogotá Colombia en donde el objetivo principal era implementar un dispositivo nodo llamado MICA2, el cual fue desarrollado en base a los "MOTES" por la universidad de Berkeley para fines estudiantiles. Actualmente el MICA2 es comercializado por la

empresa *Crossbow* [21]. El dispositivo nunca se implementó y solo se usaron datos basados de otra investigación. [22]



Fig 5. Muestra el nodo MICA el cual es actualmente producido por MEMSIC.

#### 6.4.1.3) EM50

Es un nodo desarrollado por la empresa DECAGON DEVICE, el cual consta de un sistema de transmisión inalámbrica capaz de transmitir datos provenientes de sensores. El nodo EM50 es el dispositivo servidor que controla la red. Funciona en la frecuencia de 900MH y 2,4GHZ. Tiene 5 puertos a los cuales se les puede conectar diferentes tipos de sensores que fabrica la empresa. Posee un software de configuración llamado ECH20 Utility con el cual se pueden descargar los datos de la red vía USB. [23]

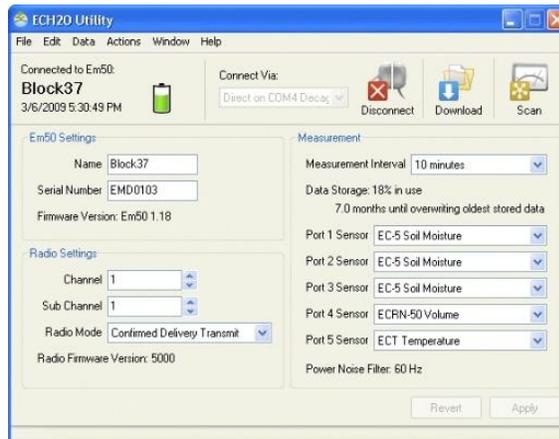


Fig 6. Programa ECH20 utilizado por DECAGON DEVICE para visualizar la información del nodo.



Fig 7. Nodo EM50 de la empresa DECAGON DEVICE. Este nodo tiene conectados 5 sensores en sus terminales y posee 5 pilas AA.

Este dispositivo sin los sensores tiene un valor en ALIEXPRESS [24] de 450 Dólares sin contar con los sensores ni baterías.

## DISEÑO METODOLOGICO

### 7.1) DISEÑO DE LA PCB

#### 7.1.1) Determinación de elementos.

Cuando se comenzó el proyecto, se tenía una idea básica de la red de sensores inalámbricos, la cual consistía en un conjunto de dispositivos integrados capaces de conformar un nodo funcional. El primero de la lista era el dispositivo de radiofrecuencia para transmitir información inalámbricamente. También se tenía la necesidad de incorporar sensores, que en un principio solo se pensaba escoger uno enfocado a temperatura. Por añadidura se necesitaba un microcontrolador que administrara la red, coordinara la comunicación con el usuario y recibiera los datos desde el sensor. Por último se requería suplir un sistema de alimentación capaz de mantener el dispositivo funcionando por un largo periodo de tiempo.

Entonces, se hizo un estudio detallado y enfocado en la búsqueda de los mejores componentes, con el fin de escoger los más económicos, aptos y con el mejor desempeño posible.

Primero se buscó un microcontrolador y se tenían varias opciones de diferentes casas fabricantes como se ve en la **Tabla 3**. Todos los dispositivos tienen características similares pero destacan dos; el de Freescale y el de Microchip. El primero por su velocidad de procesamiento interno y el segundo por su bajo consumo, pero en un proyecto de estas características prima el ahorro en consumo por esta razón se escogió el PIC 18LF26k22. Tiene un bajo consumo (XLP – extreme low power) en modo “sleep”, dos módulos MSSP, dos módulos EUSART y una empaquetadura SO (Small Outline) la cual es de superficie y fácil de soldar a mano.

El segundo dispositivo que se analizó fue el radio. Se tenían varias opciones como se visualiza en la **Tabla 4**. Destaca el radio MRF24J40MA de microchip debido a su bajo consumo, su precio, la antena integrada y su rango de transmisión (en metros) por estas razones fue la primera opción con el que se trabajó, pero este tenía una gran desventaja: Estos radios no cuentan con un software que permita configurarlos de tal forma que se puedan emplear en una red, por el contrario, para implementar la red era necesario desarrollar el firmware en el microcontrolador para dicho fin, por esta razón se migro al radio de Digi, el cual ya tenía una plataforma (XCTU) con la cual se podían programar los radios y a su vez cada radio cuenta con un

procesador que reconoce comandos AT con el cual se puede crear la red completa. El transceptor que se escogió fue el Xbee Serie 2 y se usó el software XCTU en la versión 6.1.3 la cual es gratuita y es distribuida por la compañía fabricante.

En el proceso de reconocimiento de los dispositivos (slave, router y coordinador) de la red, se pudo apreciar que para la versión de firmware 20AO el router puede entrar en modo sleep, contrario a lo que especifica el manual de usuario. Esta característica permite crear una red con solo un coordinador y varios nodos tipo router.

La razón para configurar un modo sleep radica en aprovechar el bajo consumo energético y de esta manera alargar la vida de la batería. Esto es muy importante pues los nodos se plantean dejar en tierra durante semanas.

La solución energética llevo a un problema de sincronización, el cual consistía en coordinar todos los radios en modo sleep para que se despertaran al mismo tiempo. Se pensó usar el TIMER que posee el microcontrolador pero esta idea fue desechada puesto que necesita un Oscilador externo y este (el oscilador) es susceptible a variaciones de temperatura, por esta razón se buscó un módulo RTC (Real Time Clock - reloj en tiempo real) que incorpora un sistema de compensación por variaciones de temperatura. El Reloj que se selecciono fue el PCF2129 de la casa fabricante NXP debido a que este dispositivo cuenta con un oscilador interno, junto a un circuito que garantiza que la frecuencia de oscilación interna sea estable, incluso cuando se presentan variaciones de temperatura.[25]

Luego de una investigación previa acerca de las variables más importantes que se necesitan medir en un cultivo y en especial en un invernadero de rosas, se decidió buscar sensores que midieran temperatura y humedad. Se tenían varias opciones como se ve en la **Tabla 5** y el elegido fue el STH21 de Sensirion, gracias a su bajo costo, comunicación I2c y bajo consumo.

### 7.1.2) Elementos adicionales

Durante la etapa de diseño se requirió adicionar otros dispositivos como: Una memoria para almacenar los datos provenientes de los sensores, un repetidor para el protocolo I2C y una interfaz de comunicación asíncrona. En la **tabla 2** se muestran los componentes seleccionados. Para la conexión entre el la PCB del sensor y el NODO se usó el conector P606C el cual se observa en la Fig 8.

Para alimentar el circuito se decidió optar por un regulador de voltaje LDO (Low-dropout), el cual se puede observar en la **tabla 2**. Para alimentarla se usaron 4 pilas recargables AA de 2300 mAh.

Tabla 2. La tabla muestra los dispositivos seleccionados para el proyecto.

Dispositivo	Descripción	Referencia	Fabricante
Memoria	Memoria de tipo EEPROM con una capacidad de almacenamiento de 512Kbits. Usa el protocolo I2C para almacenar y/o extraer la información.	24FC512	Microchip
Repetidor	Repetidor para comunicaciones I2C	PCA9515A	NXP
Interfaz Asíncrona	Dispositivo de interfaz de comunicación asíncrona capaz de elevar el voltaje de salida de 3,2V a 5V	MAX3232	Maxim Integrate
Regulador de voltaje	Regulador de voltaje de 3,3V tipo LDO (low dropo ut)	AS1360	ASM



Fig 8. Conector macho y hembra P606C.

Tabla 3. Comparación Sensores de 5 fábricas diferentes.

	SHT21		SHT11		DHT22		DHT11		HTU21D	
										
	Sensirion		Sensirion		Aosong		Aosong		Measurement specialities	
	Humedad	Temp.	Humedad	Temp.	Humedad	Temp.	Humedad	Temp.	Humedad	Temp.
Rango	0-100% RH	-40-125 °C	0-100% RH	-40-123.8 °C	0-99,9% RH	-40 – 80 °C	20-90% RH	0-50 °C	0-100% RH	-40 – 125 °C
Exactitud	±2%RH	±0,3 °C	±3%RH	±0,4 °C	±2%RH	±0,5 °C	±4%RH	±2 °C	±2%RH	±0,3 °C
T respuesta	8s	5s - 30s	8s	5s -- 30s	5s	10s	6s – 15s	6s – 30s	5s – 10s	10s
Resolución	0,7%RH 8bit 0,04%RH 12bit	0,04°C-12bit 0,01°C-14bit	0,4%RH8 bit 0,05%RH 12bit	0,04°C-12bit 0,01°C-14bit	0,1%RH	0,1 °C	1%RH	1°C -8 bit	0,7%RH 8bit 0,04%RH 12bit	0,04°C 12bit 0,01°C 14bit
Alimentación	2,1 – 3,6 V DC		2,4 – 5,5 V DC		3.3 – 5,5 V DC		3 – 5,5V DC		1,5 – 3,6 V DC	
Tipo de encapsulado.	Integrado de superficie DO 220		LCC (Leadless Chip Carrier)		4 Pin Single Row		4 Pin Single Row		DNF	
Comunicación	Digital 2-wire interface, I2C protocol		Interface Serial propietaria compatible con bus I2C		Interface serial		Interface Serial.		digital 2-wire interface, I <sup>2</sup> C protocol	
Modo Sleep	Si		Si		No		No		Si	
Certificación	Si		Si		No		No		No	
Resistencia al agua	¿?		Si		No		No		Si	
App agrícolas	Si		Si		Si		Si		No	
Costos En Dólares USA	Precio	Tienda	Precio	Tienda	Precio	Tienda	Precio	Tienda	Precio	Tienda
	6,07	Newegg.com	24	Mikroe.com	7	Newegg.com	4	Newegg.com	12,37	Digikey.com
			22	Newark.com	15	Adafruit.com	5,41	Sigmaelectronica.net	14,95	Sparkfun.com

Tabla 4. Comparación Módulos Radios entre 4 casas fabricantes diferentes.

	MRF24J40MA-I/RM		ATZB-24-B0R		XB24-Z7WIT-004		ETRX357LRS	
								
	Microchip		Atmel		Digi International		Telegesis	
<b>Frecuencia</b>	2.4GHz		2.4GHz		2.4GHz		2.4GHz	
<b>Data Rate</b>	250kbps		250kbps		250kbps		250kbps	
<b>Protocolo</b>	802.15.4		802.15.4		802.15.4		802.15.4	
<b>Rango Tx línea de vista directa</b>	400 ft (121,92 m)		NO APLICA DEPENDE ANTENA		300 ft (100mt)		NO APLICA DEPENDE ANTENA	
<b>Salida en dBm</b>	0dBm		3dBm		0dBm		21dBm	
<b>Alimentación</b>	2,4 - 3,6 V DC		1,8 – 3,6 V DC		2,8 – 3,4 V DC		2,1 – 3,6 V DC	
<b>Antena</b>	On-Board, Trace		On-Board, Trace (Es necesario diseñarla)		Chip, Wire Whip, U.FL, y RPSMA		On-Board y U.FL coaxial conector (Es necesario diseñarla)	
<b>Corriente Tx</b>	23 mA		20,8mA		45mA		140mA	
<b>Corriente Rx</b>	19mA		21,8 mA		50mA		33mA	
<b>Interfaz de comunicación</b>	SPI		I2C		3.3V CMOS UART		I2C, SPI, EmberZNet	
<b>Tipo de encapsulado</b>	PCB, Surface Mount		PCB Module		PCB Module		PCB Module	
<b>Modo Sleep</b>	Si		Si		Si		Si	
<b>Certificación</b>	Si		Si		Si		Si	
<b>Costos En Dólares USA</b>	Precio	Tienda	Precio	Tienda	Precio	Tienda	Precio	Tienda
	9,12	Newark.com	23,51	Digikey.com	17	Digikey.com	30,08	Digikey.com
	9,30	Mouser.com	21,55	Newark.com	17	Mouser.com		
	10,30	Digikey.com	28,44	Mouser.com				

Tabla 5. Comparación Microcontroladores de 4 casas fabricantes.

	PIC18LF26K22		STM8L052C6		MC908LJ24CFUE		ATMEGA16A-AU	
								
	Microchip		STMicroelectronics		Freescale		Atmel	
<b>MIPS</b>	16		16		8		16	
<b>Oscilador</b>	Interno – 16 MHz (2)Externos – 64MHz		Interno – 16 MHz Externo – 16MHz		Interno - 64MHz Externo – 32MHz		Interno - 16MHz	
<b>Ancho de Palabra ALU</b>	8 bits		8 bits		8 bits HC08		8 bits AVR	
<b>Tipo de memoria de programa</b>	Flash		Flash		Flash		Flash	
<b>Memorias</b>	ROM = 64 KB	RAM = 2K	ROM = 32KB	RAM = 2K	ROM = 24KB	RAM = 768 B	ROM = 16KB	RAM = 1kB
<b>Alimentación</b>	1,8 – 3.3 V DC		1,8 – 3,6 V DC		3 - 5,5 V DC		2,7 – 5,5 V DC	
<b>Conectividad</b>	I <sup>2</sup> C, SPI, UART/USART		I <sup>2</sup> C, IrDA, SPI, UART/USART		I <sup>2</sup> C, IRSCI, SPI		I <sup>2</sup> C, SPI, UART/USART	
<b>Periféricos</b>	HLVD, POR, PWM, WDT		DMA, IR, LCD, POR, PWM, WDT		LCD, LVD, POR, PWM		POR, PWM, WDT	
<b>Modo Sleep</b>	Si		Si		Si		Si	
<b>Corriente Modo bajo consumo<sup>1</sup></b>	Maximo 10 nA @ 3 Volts		Maximo 3,3uA @ 3 volts		Maximo 1uA @ 3 volts		Maximo 300 nA @ 3 Volts	
<b>ADC</b>	28 canales de 10 bits		25 canales de 12 bits		6 canales de 10 bits		8 canales de 10 bits	
<b>Timers</b>	3 x 8-bit, 4 x 16-bit		1x 8-bits , 2x 16-bits		2X 16-bits		2 x 8-bits, 1 x 16-bits	
<b>Rango de temperatura</b>	-40°C a 125°C		-40°C a 85°C		-40°C a 85°C		-40°C a 85°C	
<b>Costos En Dólares USA</b>	Precio	Tienda	Precio	Tienda	Precio	Tienda	Precio	Tienda
	2,99	Newark.com	0,81	Newark.com	12,25	Digikey.com	5,5	Digikey.com
	3,59	Mouser.com	1,89	Digikey.com	12,25	Mouser.com	3,9	Newark.com
	3,72	Digikey.com	1,89	Mouser.com	12,04	Newark.com	4,75	Mouser.com

<sup>1</sup> La CPU no tiene fuente de reloj y todos los periféricos están apagados.

## 7.2) DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL PCB

Una vez se determinaron todos los componentes y se tenían claros sus respectivos conceptos relacionados con su funcionamiento, el siguiente paso fue desarrollar la PCB. Se usó una herramienta de diseño para PCB llamada EAGLE de la empresa CadSoft.

Muchos componentes fueron diseñados en Eagle por que no existían las librerías. El PCB tiene dos capas y sus respectivos planos a tierra. Se siguieron todas las recomendaciones dadas por los fabricantes en los manuales de los dispositivos. Las placas se hicieron en la empresa Seedstudio ubicada en Shenzhen, China.

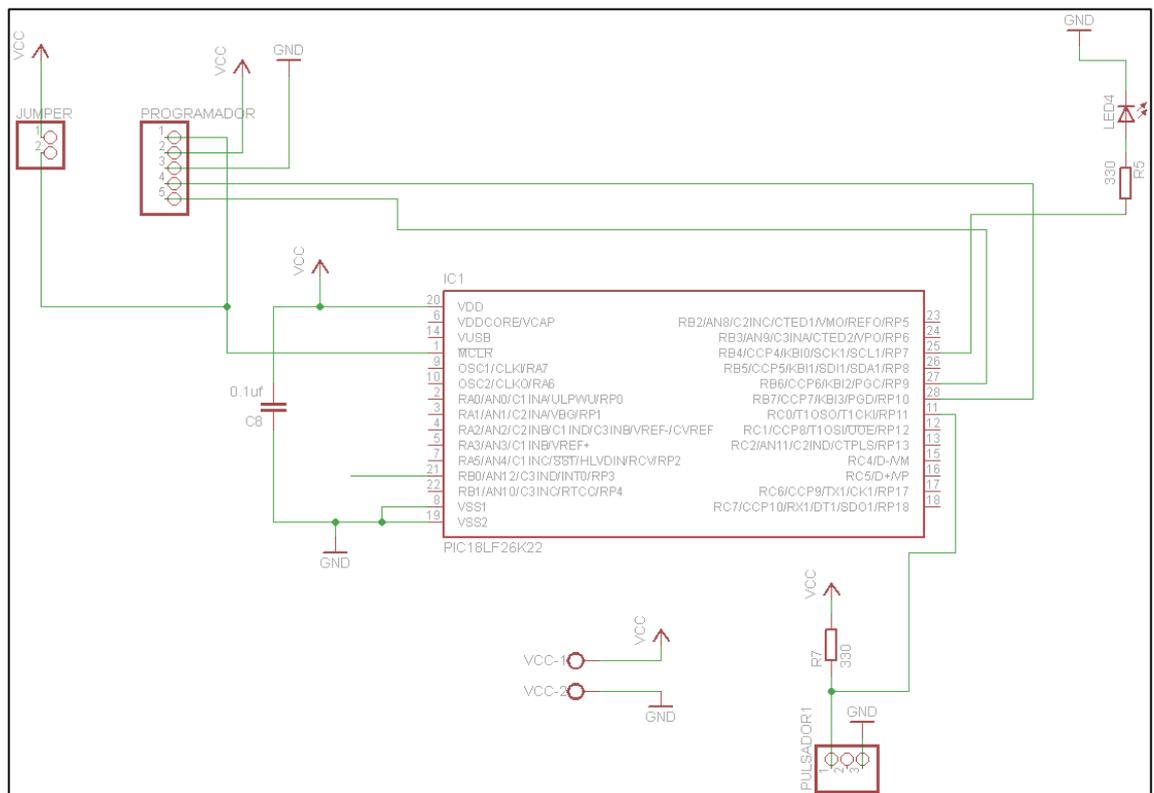


Fig 9. Plano del microcontrolador con sus respectivas partes para su correcto funcionamiento.

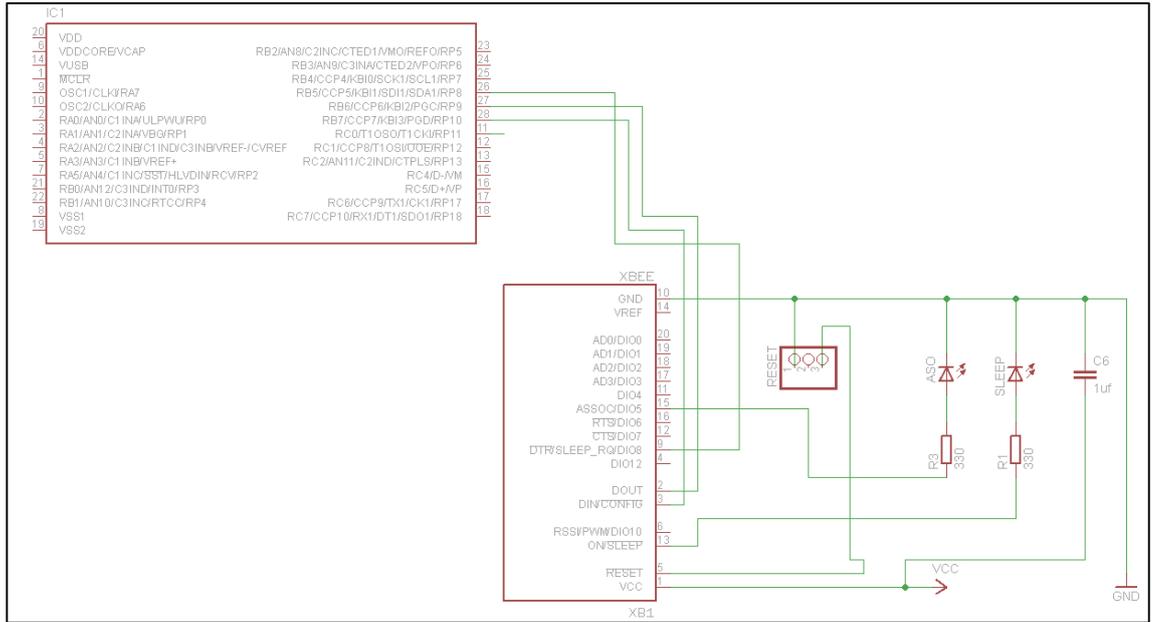


Fig 10. Plano con las conexiones del microcontrolador y el radio Xbee.

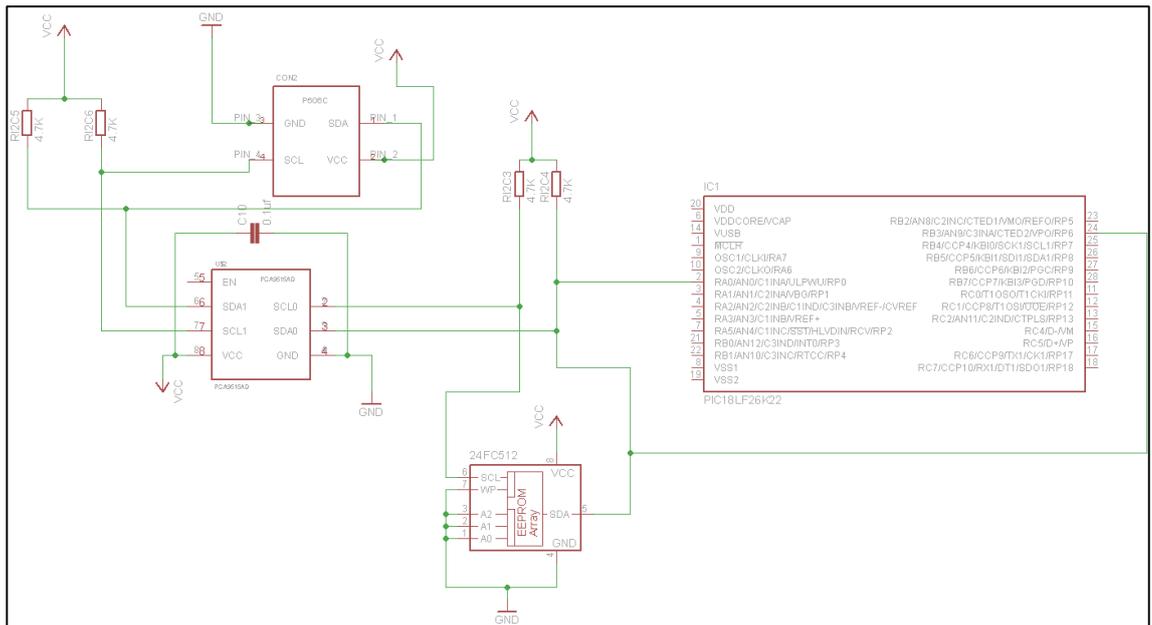


Fig 11. Plano del microcontrolador con la memoria EEPROM y uno de los repetidores.

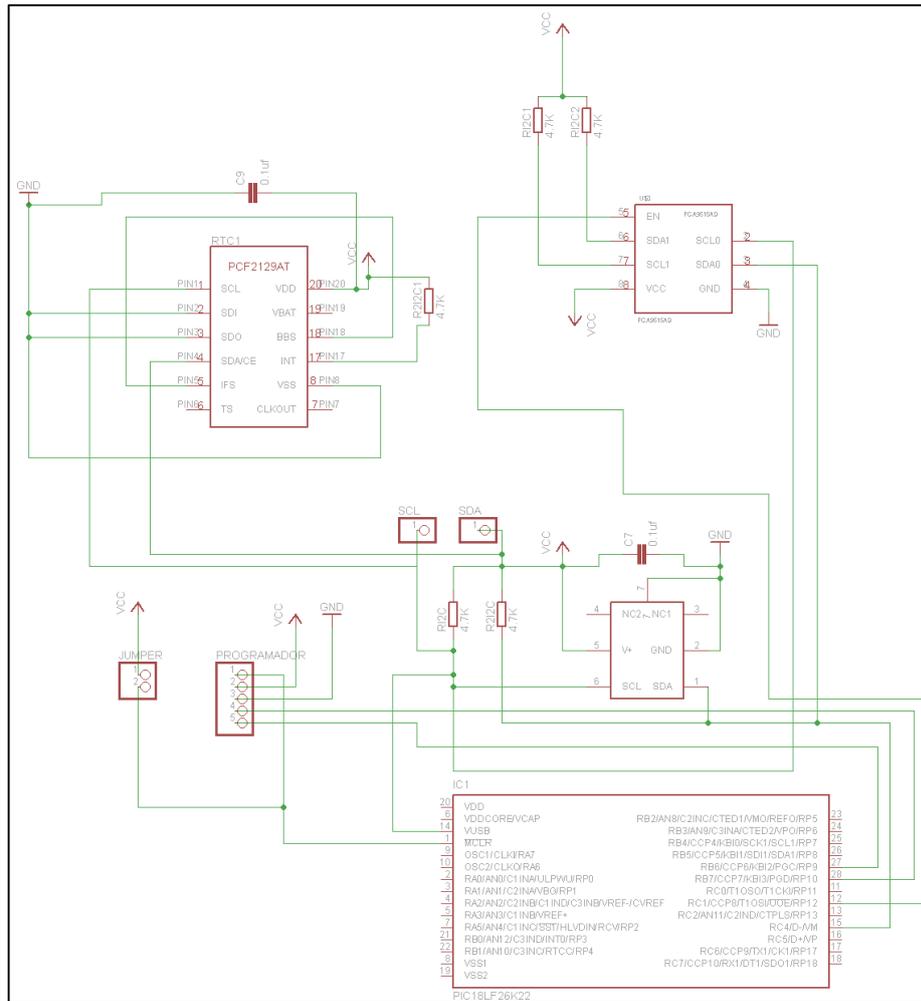


Fig 12. Plano del microcontrolador con el RTC, el sensor SHT21 y uno de los repetidores.

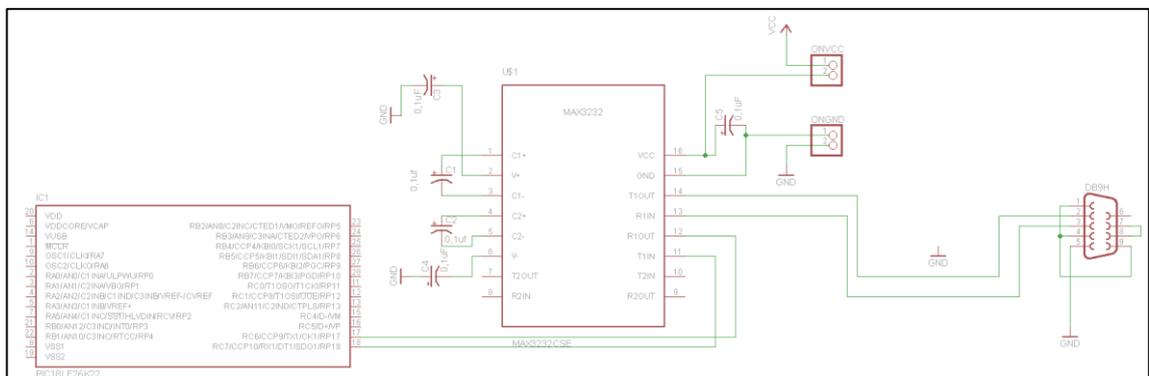


Fig 13. Plano con las conexiones del microcontrolador y el MAX3232.

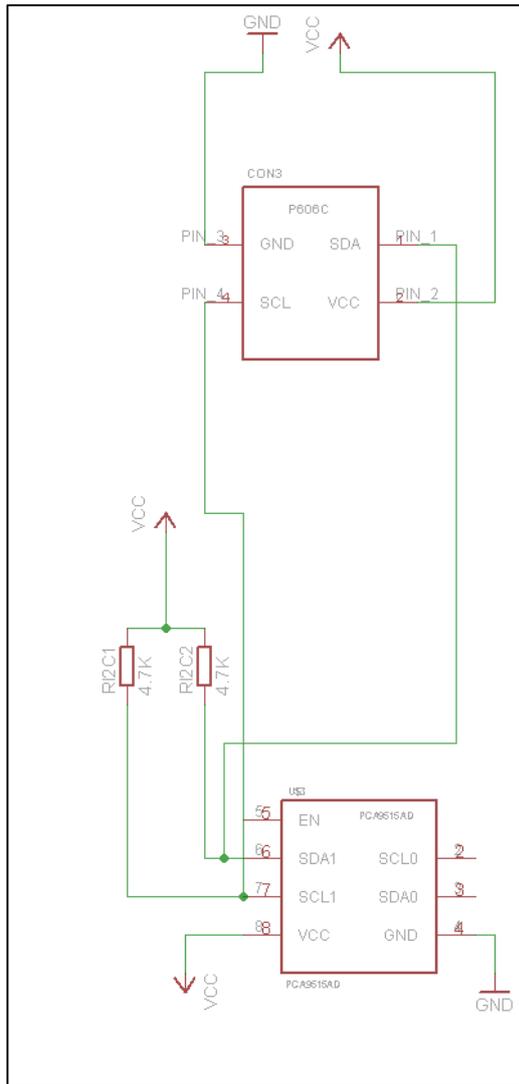


Fig 14. Plano del repetidor con el plug P606C.

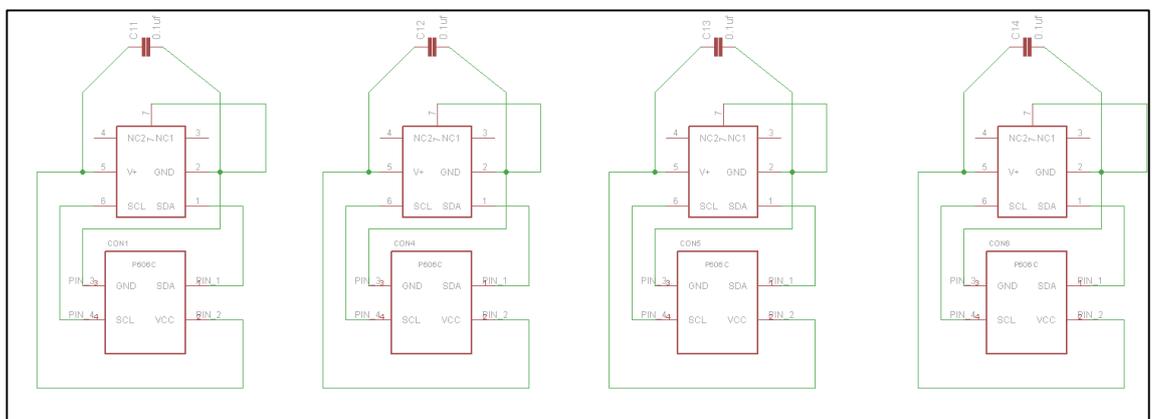


Fig 15. Planos de las placas de los sensores.

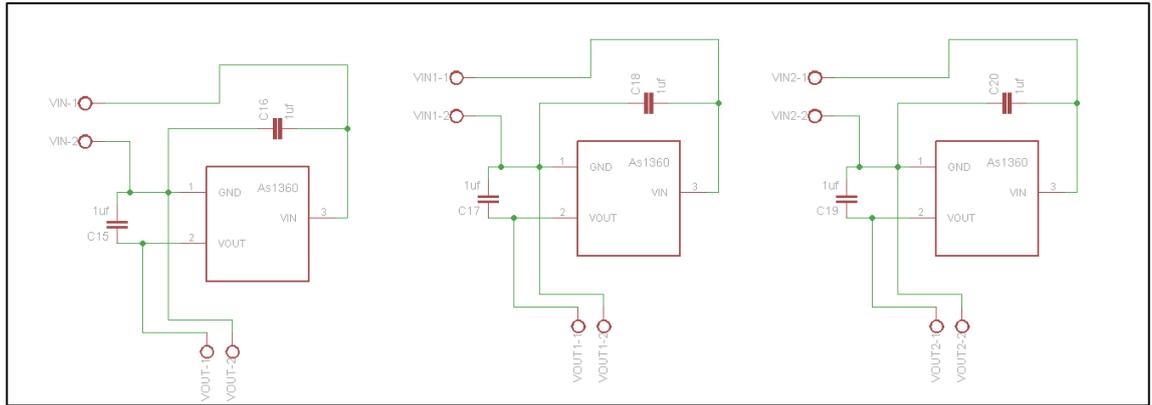


Fig 16. Planos de las placas de las fuentes.

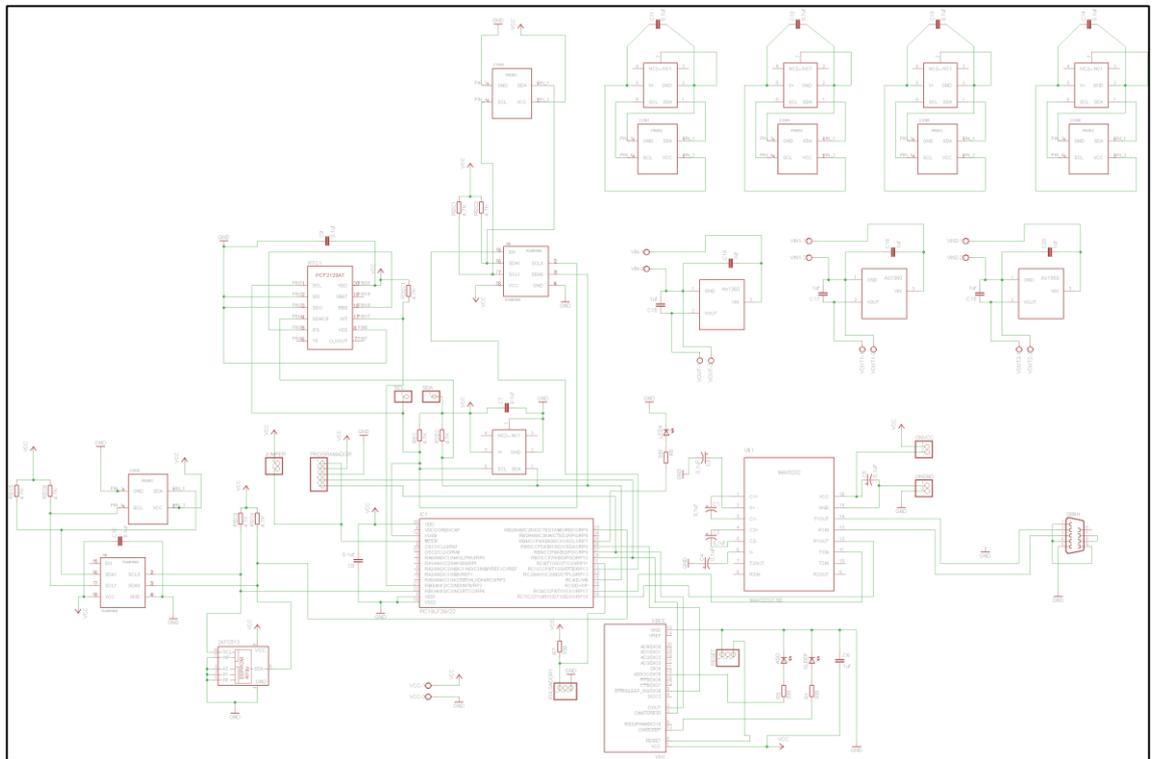


Fig 17. Muestra el plano completo del NODO AD.

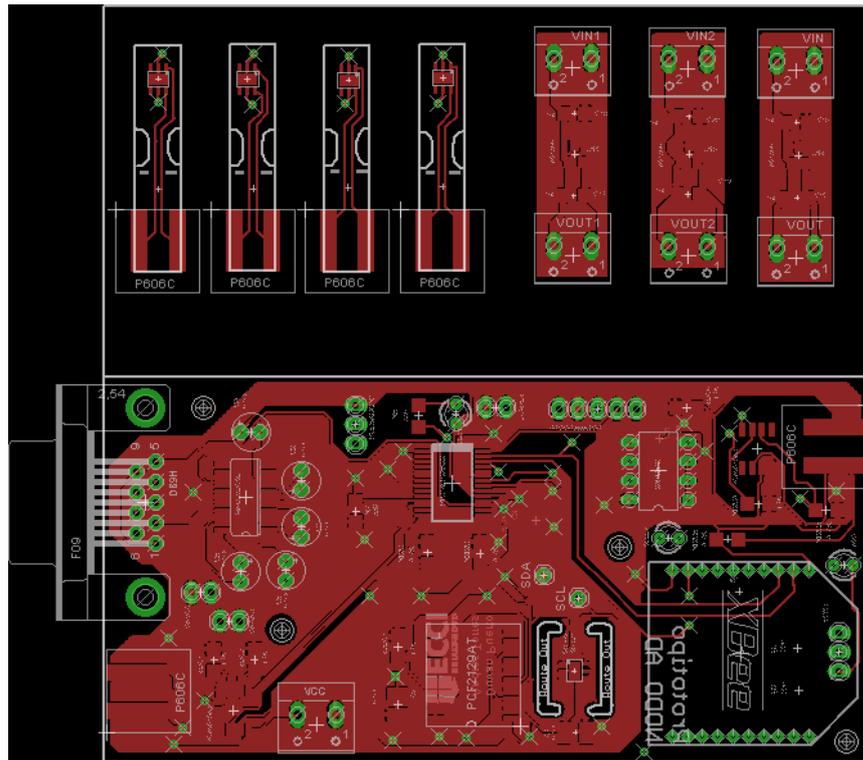


Fig 18. Muestra la parte TOP del circuito real.

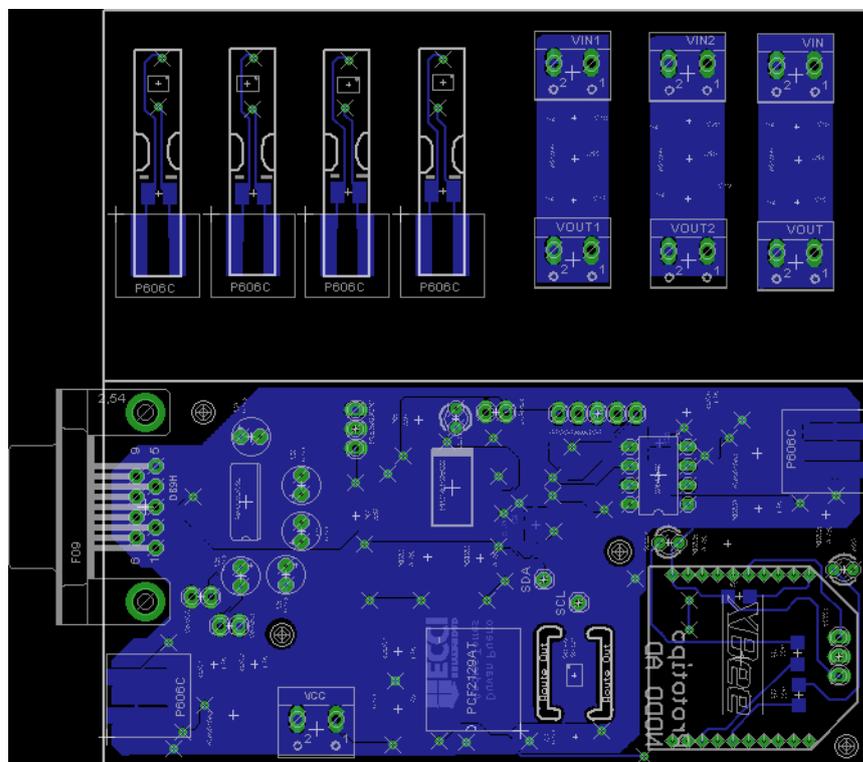


Fig 19. Muestra la parte Bottom del circuito real

De la Fig 9 a la Fig 16 son el plano del circuito dividido en partes. En la Fig 17 se puede observar el plano completo del Nodo AD. Y por último en las Fig 18 y 19 se observa el circuito real del Nodo AD en las partes Bottom y Top y sus respectivos planos a tierra.

### 7.2.1) Archivos Gerber

Para el proceso de fabricación se diseñaron los archivos gerber según las especificaciones que requería la empresa SeeedStudio. Para tal propósito se siguió el manual que provee la empresa Microensamble en su página web [26].

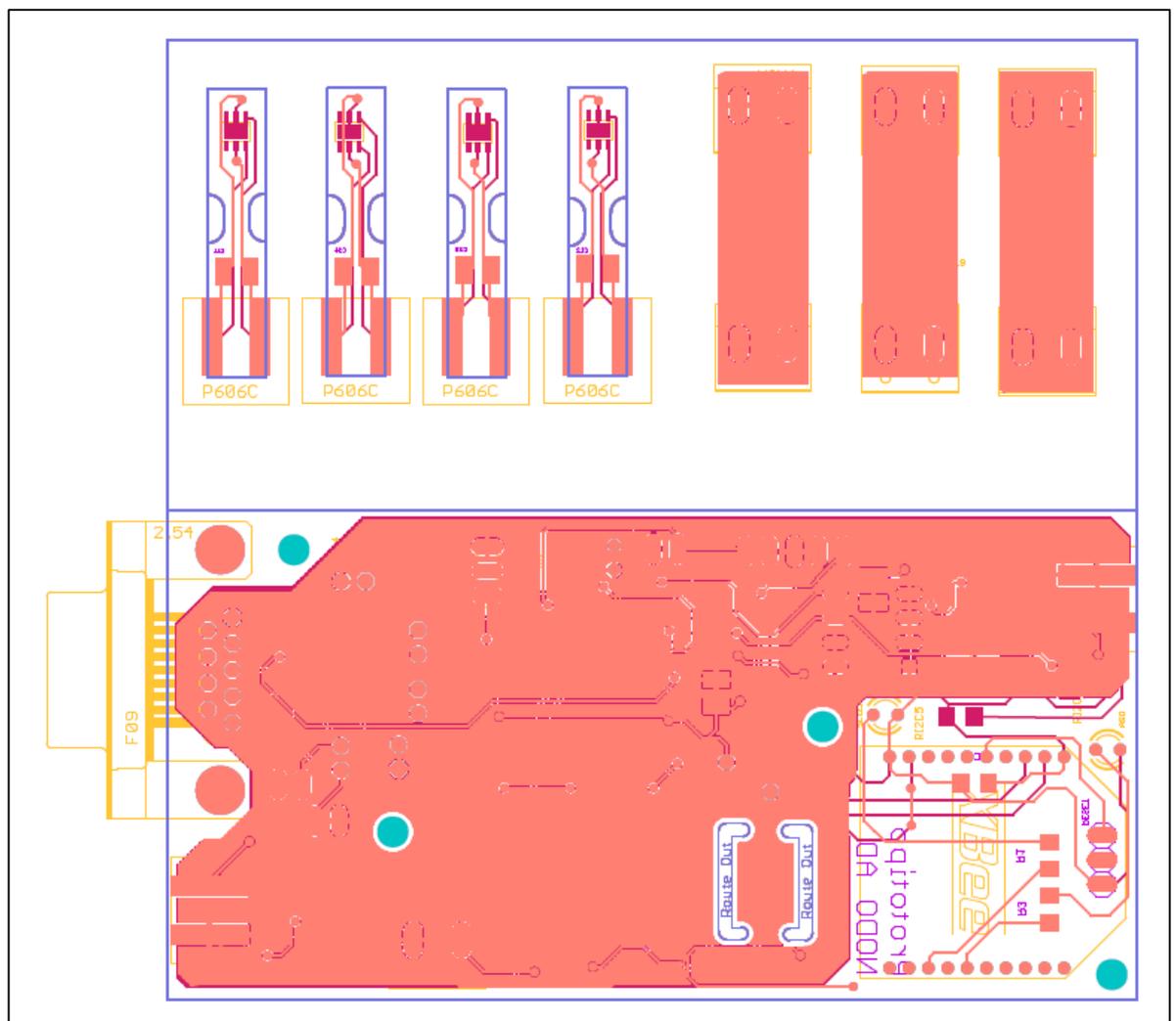


Fig 20. Muestra las todas las capas del archivo gerber para el prototipado.

### 7.3) DISEÑO DE LA RED XBEE

Para el diseño de la red Xbee se usó el programador de comandos XCTU de la empresa Digi. El firmware de los módulos Xbee fue configurado en modo AT de la versión 20A7.

Para hacer el direccionamiento, se configuró primero la dirección de destino del coordinador en modo Broadcast y los demás dispositivos en modo Unicast apuntando al coordinador, como se muestra en la Fig 21.

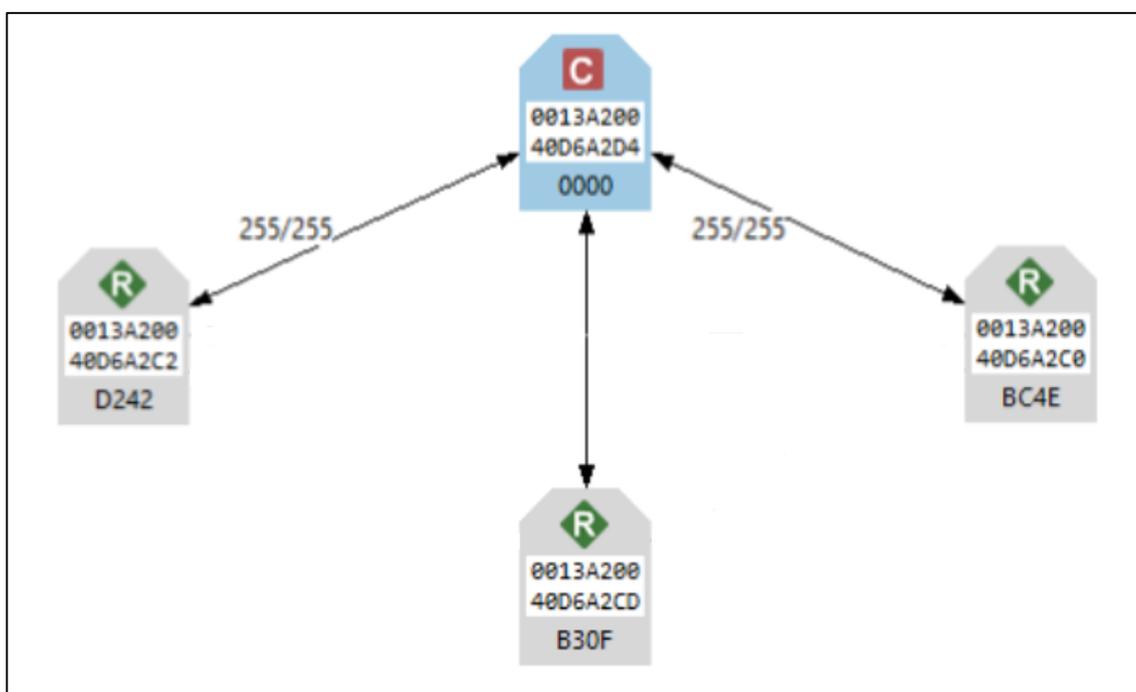


Fig 21. Muestra la red real configurada con un coordinador (C) y tres routers (R).

De esta manera, cada router en la red apunta al coordinador y el coordinador apunta de forma Broadcast a todos los routers. Por lo tanto si el coordinador no tiene el alcance para comunicarse con un router que pertenece a la red, alguno de los routers direccionaran la información a dicho router lejano, pues la información es tipo broadcast y todos los dispositivos deben recibirla. Por otro lado en cuanto al direccionamiento hacia el coordinador, si dicho router que no tiene la comunicación directa con él, otro router servirá de puente entre ellos y direccionará la información hacia el coordinador.

El protocolo es manejado por el Microcontrolador del coordinador el cual direcciona la información de manera muy similar a como se desarrolla en el protocolo I2c, en donde se envía primero una trama de direcciones que emparejen con el dispositivo y el microprocesador del router responderá con un comando de confirmación enviado a través del Xbee.

#### 7.3.1) Configuración de Parámetros

La configuración que se visualiza en la Fig 22 corresponde al Router A. Todos los dispositivos incluyendo al coordinador trabajan sobre la dirección de PAN 2222 (Personal Area Network - Red de área personal). El canal de trabajo sobre la frecuencia de 2,4 GHZ se escogió aleatorio (FFFF).

## Firmware information

**Product family:** XB24-ZB  
**Function set:** ZigBee Router AT  
**Firmware version:** 22A7

### ▼ Networking

Change networking settings

<b>ID</b> PAN ID	<input type="text" value="2222"/>
<b>SC</b> Scan Channels	<input type="text" value="FFFF"/> Bitfield

### ▼ Addressing

Change addressing settings

<b>SH</b> Serial Number High	13A200
<b>SL</b> Serial Number Low	40D6A2CD
<b>DH</b> Destination Address High	<input type="text" value="0"/>
<b>DL</b> Destination Address Low	<input type="text" value="0"/>
<b>NI</b> Node Identifier	<input type="text" value="RA"/>

### ▼ Serial Interfacing

Change modem interfacing options

<b>BD</b> Baud Rate	<input type="text" value="9600 [3]"/>
<b>NB</b> Parity	<input type="text" value="No Parity [0]"/>

### ▼ Sleep Modes

Configure low power options to support end device children

<b>SM</b> Sleep Mode	<input type="text" value="Pin Hibernate [1]"/>
----------------------	--

### ▼ Diagnostic Commands

Access diagnostic parameters

<b>VR</b> Firmware Version	22A7
<b>HV</b> Hardware Version	194B

Fig 22. Muestra la configuración del Router A.

La dirección de destino está configurada como cero y apunta al coordinador. Cada Router tiene configurado una NI (Nodo indentifier - Identificación del nodo), por ejemplo en la imagen está configurado como RA, lo que indica que este nodo es el Router A. La Velocidad de la USART interna del Xbee está configurada en 9600 bps sin bit de paridad. Se configura el modo Sleep en base al pin de hibernación, dicho pin es controlador por el microcontrolador del Módulo.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Cuando se configura el pin hibernate o se escoge algún modo Sleep, el Xbee deja de ser un Router para convertirse en un End Device.

## Firmware information

**Product family:** XB24-ZB  
**Function set:** ZigBee Coordinator AT  
**Firmware version:** 20A7

### Networking

Change networking settings

<b>ID</b> PAN ID	<input type="text" value="2222"/>
<b>SC</b> Scan Channels	<input type="text" value="FFFF"/> Bitfield

### Addressing

Change addressing settings

<b>SH</b> Serial Number High	<input type="text" value="13A200"/>
<b>SL</b> Serial Number Low	<input type="text" value="40D6A2D4"/>
<b>DH</b> Destination Address High	<input type="text" value="0"/>
<b>DL</b> Destination Address Low	<input type="text" value="FFFF"/>
<b>NI</b> Node Identifier	<input type="text" value="C"/>

### Serial Interfacing

Change modem interfacing options

<b>BD</b> Baud Rate	<input type="text" value="9600 [3]"/>
<b>NB</b> Parity	<input type="text" value="No Parity [0]"/>

### Diagnostic Commands

Access diagnostic parameters

<b>VR</b> Firmware Version	<input type="text" value="20A7"/>
<b>HV</b> Hardware Version	<input type="text" value="194B"/>

Fig 23. Muestra la configuración del Coordinador.

Del mismo modo como en el Router la configuración del coordinador (Fig 23), describe la PAN de 2222 y un canal aleatorio FFFF. La velocidad de baudio de la USART interna del Xbee también es de 9600 bps. En cuanto al direccionamiento se configura la dirección de destino como 0FFFF, que refiere a una dirección broadcast. La identificación del Nodo es C para coordinador.

### 7.3.2) Visualización de los datos

La recepción de los datos es enviada por el puerto USART hacia el RS3232 y son mostrados directamente en código ASCII, reconocidos por el programa Hyperterminal como se observa en la Fig 24.

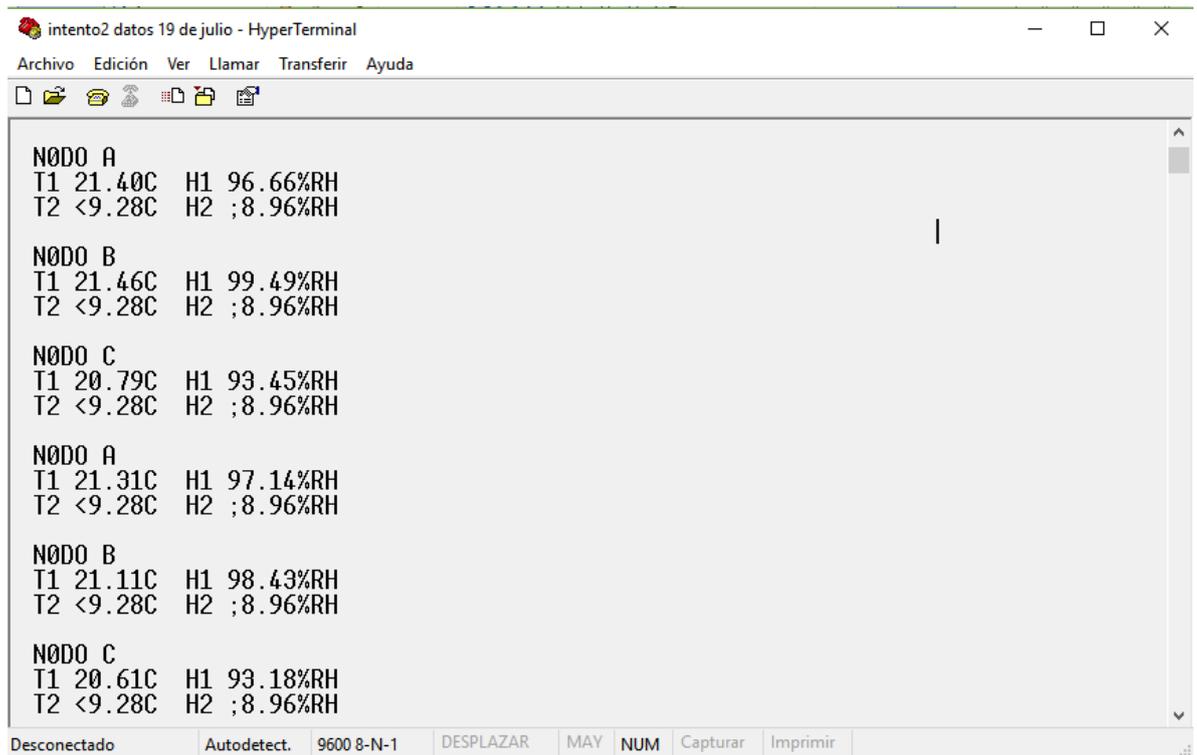


Fig 24. Muestra la visualización de los datos que obtiene el coordinador desde los diferentes nodos en campo. Todas las lecturas T2 y H2 son un dato aleatorio debido a que no estaba conectado el sensor físico en los Nodos AD.

### 7.3.3) Solución alternativa.

Cuando se realizaron las pruebas del funcionamiento de la red, los resultados obtenidos no fueron satisfactorios. El direccionamiento que trae por defecto el módulo Xbee no es eficiente, puesto que en una transmisión normal los datos se pierden o se demoran en llegar. Por otro lado, la comunicación punto a punto es más fiable y veloz, pero para poder crear una red que maneje una comunicación de este tipo era necesario implementarla completamente en el microcontrolador del coordinador.

La red punto a punto nace a partir del comando ATND, el cual sensa el espectro de frecuencia buscando los dispositivos cercanos. Dicho comando entrega lo siguientes datos por cada dispositivo encontrado:

- La dirección MY de 16 bits.

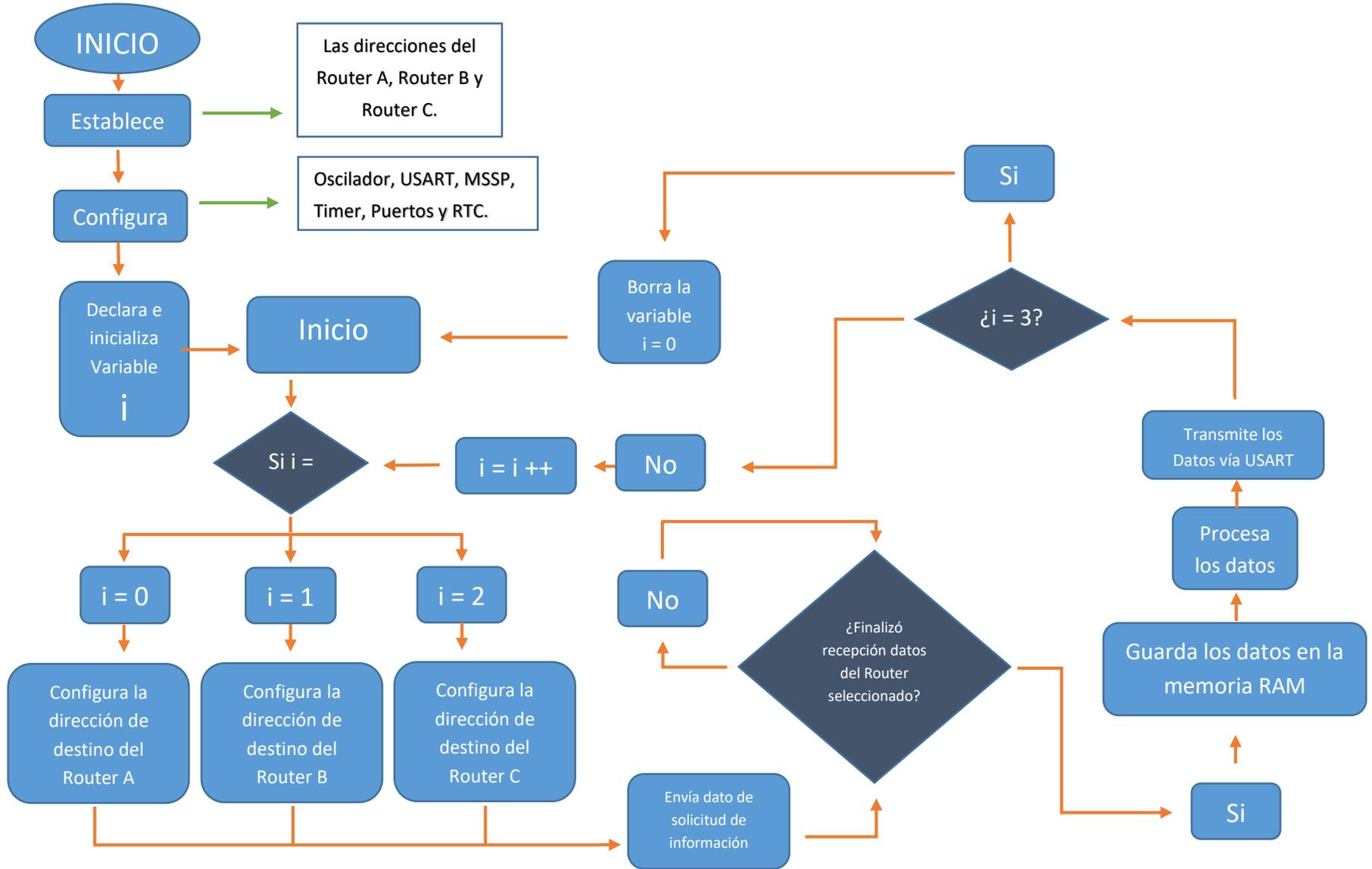
- La dirección propia del dispositivo
- La NI de dispositivo

Con esta información el coordinador puede construir una red y apuntar individualmente a cada Nodo descubierto. Estas direcciones se almacenan en la memoria EEPROM y el coordinador construye una red a partir de múltiples comunicaciones punto a punto.

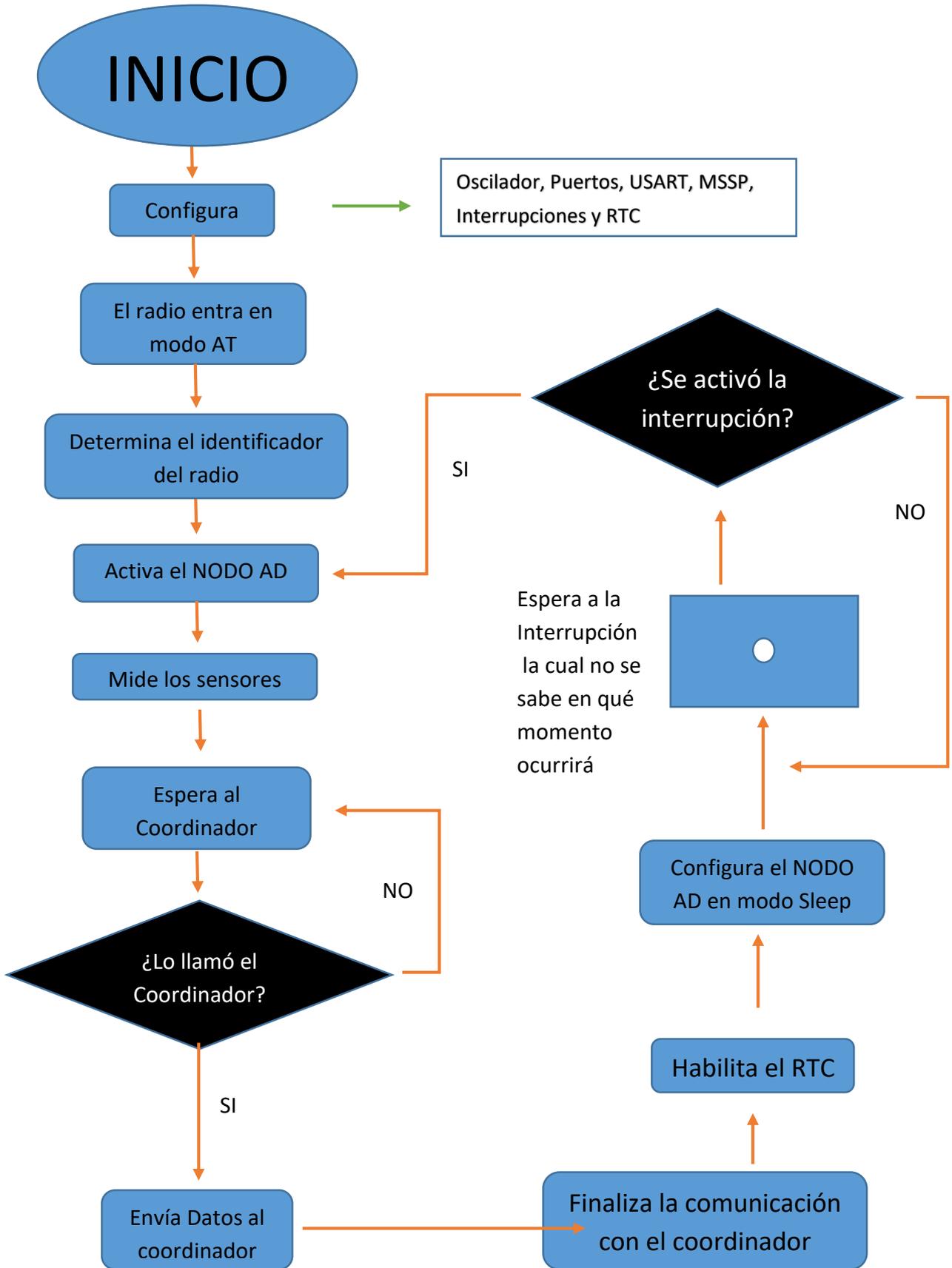
#### 7.4) DIAGRAMA DE FLUJO

Los siguientes diagramas corresponden a los códigos que tienen los microcontroladores de los dispositivos de la red; Coordinador y Router. El primer diagrama corresponde al microcontrolador del Router y el segundo al microcontrolador del Coordinador. El programa se hizo en MPLAB IDE en su versión 8.92 y se utilizó el lenguaje de programación C18. Cabe destacar que esta herramienta es proporcionada por Microchip en su versión gratuita. Para la programación del código en los microcontroladores de ambos dispositivos se usó el Pickit 3 según especificación del datasheet.

7.4.1) Diagrama de flujo del microcontrolador en el Coordinador.



7.4.2) Diagrama de Flujo del microcontrolador que está en el Nodo Router.



## 7.5) PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL NODO AD

### 7.5.1) Pruebas I2C

#### 7.5.1.1) SHT21 Sensor.

En la siguiente etapa se mostrarán las pruebas de funcionamiento en cuanto a los sensores SHT21.

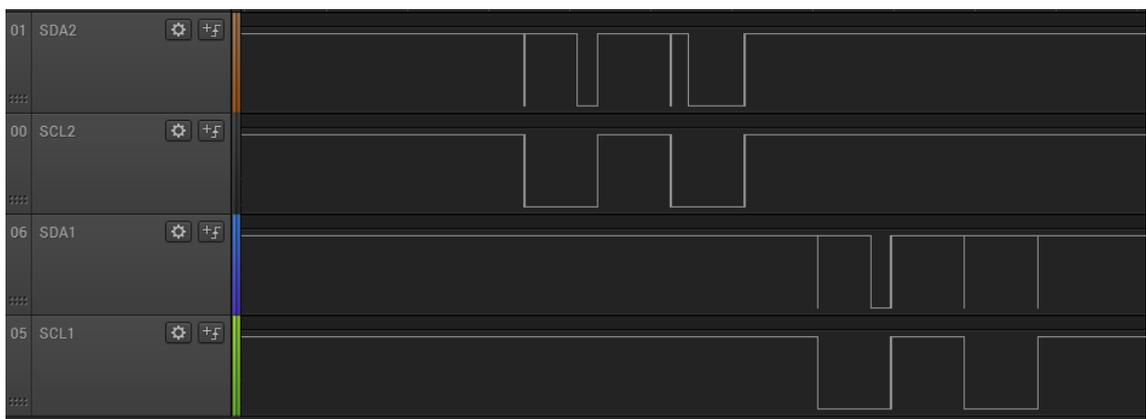


Fig 25. Comunicación Microprocesador con los dos sensores SHT21

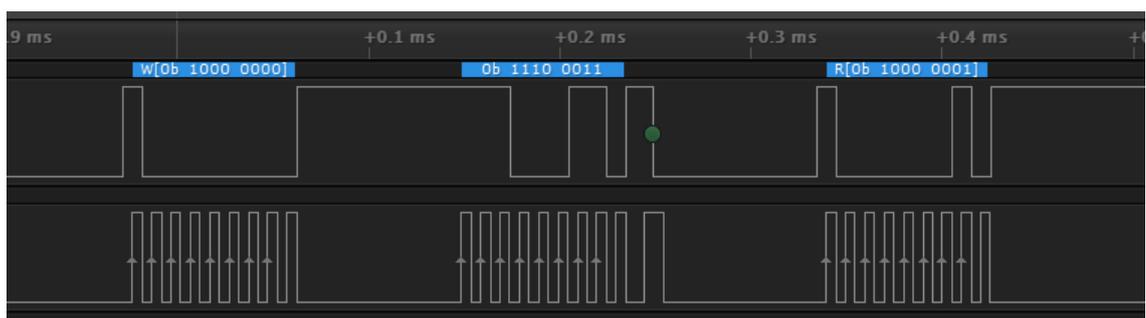


Fig 26. Muestra las tramas necesarias para iniciar la comunicación con el sensor 1.

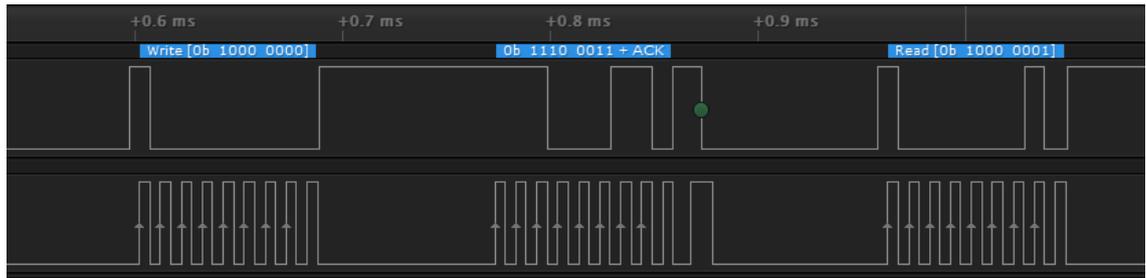


Fig 27. Muestra las tramas necesarias para iniciar la comunicación con el sensor 2.

En las imágenes anteriores se puede observar el funcionamiento del sensor. La primera trama de ambos sensores (Fig 26 y 27) se observa la dirección del sensor SHT21 la cual equivale en números binarios a 10000000. Durante el noveno pulso de reloj de la línea SCL, la línea de datos permanece en bajo (SDA) esto se debe a que el sensor genera un Acknowledgment (ACK) e indica que el sensor está recibiendo datos de manera correcta. Las siguientes tramas son necesarias para el correcto funcionamiento del dispositivo, según lo detalla el datasheet.

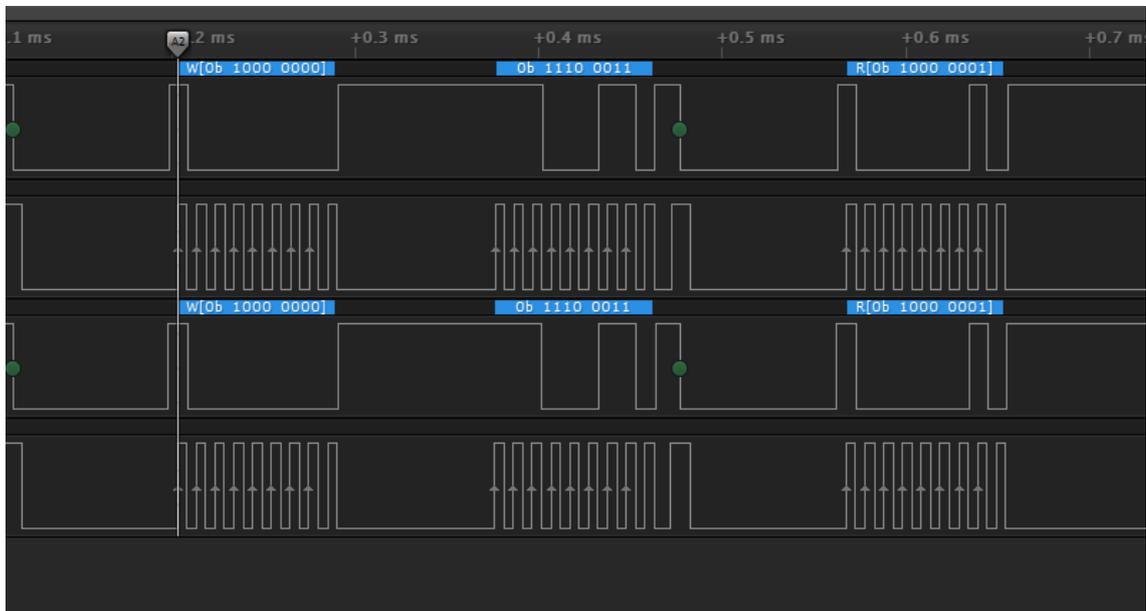


Fig 28. Comparación tramas del mismo sensor. La trama superior es tomada desde el microcontrolador, en la entrada del repetidor I2c y la trama inferior es tomada directamente desde el sensor, a la salida del repetidor I2c.

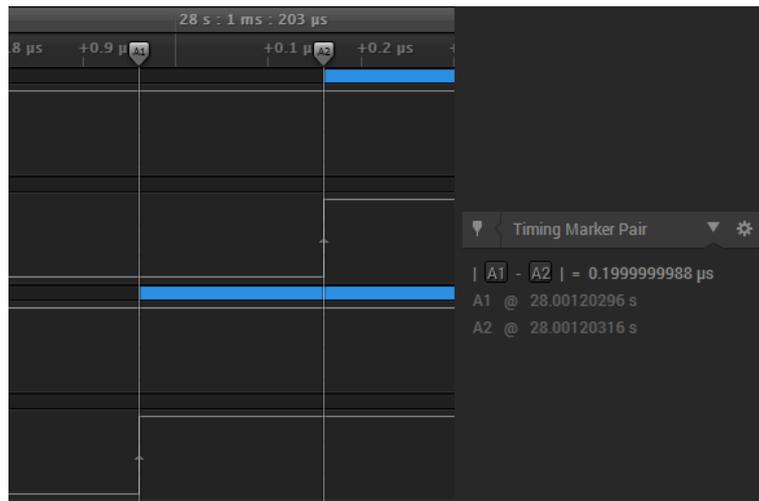


Fig 29. Desfase en segundos de las tramas de la Fig 27.

En la Fig 28 se observa la comunicación del sensor 1. Las primeras dos tramas son las líneas SDA y SCL tomadas en los pines de entrada del repetidor I2C y las últimas dos son las mismas líneas SDA y SCL pero tomadas en los pines de salida del repetidor I2C. La señal que viaja desde el microcontrolador, atraviesa el repetidor siguiendo un cable de aproximadamente 67cm hasta llegar a la PCB del sensor. El tiempo sensado por los marcadores A1 y A2 es de 0,19us, lo que equivale al tiempo que demora la señal en viajar desde el microcontrolador hasta el sensor SHT21 y viceversa, como se observa en la Fig 29.

### 6.5.1.2) 24FC512 Memoria

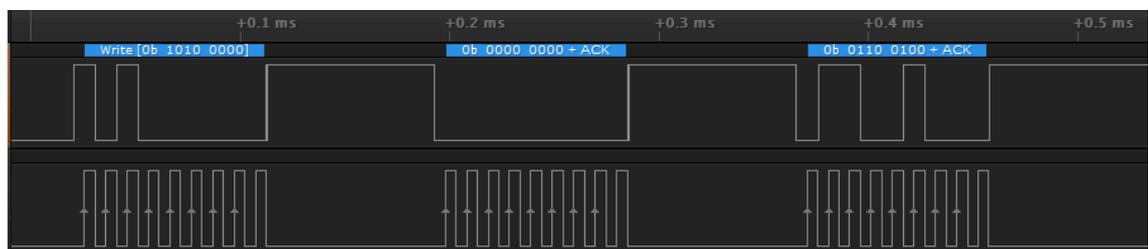


Fig 30. Muestra la comunicación de la memoria con el microcontrolador.

En la Fig 30, la primera trama es la dirección de la memoria en la red, la cual equivale en binario a 10100000. Las dos siguientes tramas se refieren a la

dirección interna del puntero en la memoria, la cual direcciona a la posición que se desea escribir o leer. Nótese la respuesta de la memoria al bajar la línea SDA en el noveno flanco de reloj de la línea SCL cuando su dirección es transmitida correctamente en el bus de datos. Del mismo modo de acuerdo con el protocolo I2c la memoria en rol de esclavo responderá cada trama bajando la línea SDA en el noveno flanco de reloj de SCL.

### 7.5.1.3) PCF2129AT RTC

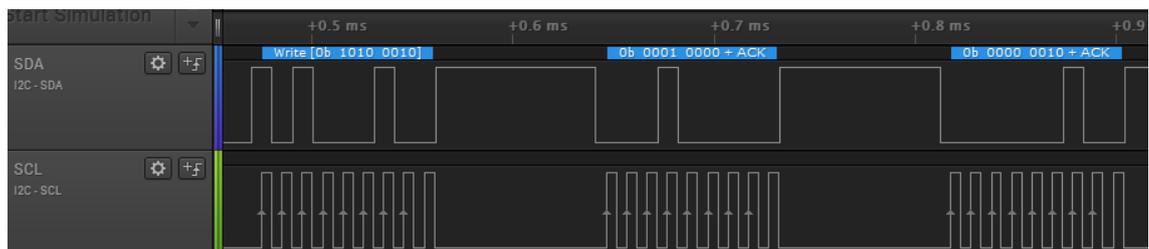


Fig 31. Muestra la comunicación del reloj en tiempo real (RTC por sus siglas en inglés) con el microprocesador.

En la Fig 31 se observan tres tramas; la primera equivale a la dirección del RTC en la red la cual equivale a 10100010, según especificaciones del datasheet. La Segunda y la tercera son comandos para desactivar el Watch Dog Time interno del RTC. Nótese la respuesta del RTC al bajar la línea SDA en el noveno flanco de reloj de la línea SCL cuando su dirección es desplazada en el bus de datos.

### 7.5.2) Pruebas USART

#### 7.5.2.1) Radio Transmisor Xbee S2.

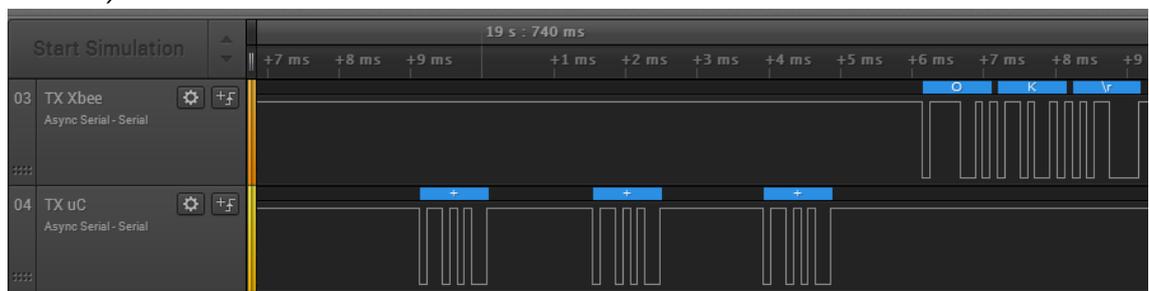


Fig 32. Muestra la comunicación del microcontrolador con el radio transmisor Xbee.

En la Fig 32 se observa una comunicación estándar del microcontrolador con el radio transmisor Xbee. Es un típico comando para disponer al radio en Modo AT, enviando tres caracteres ASCII (+++) a lo cual el Xbee responde con un OK y un retorno de carro ( \r).

#### 7.5.2.2) USART – PC.

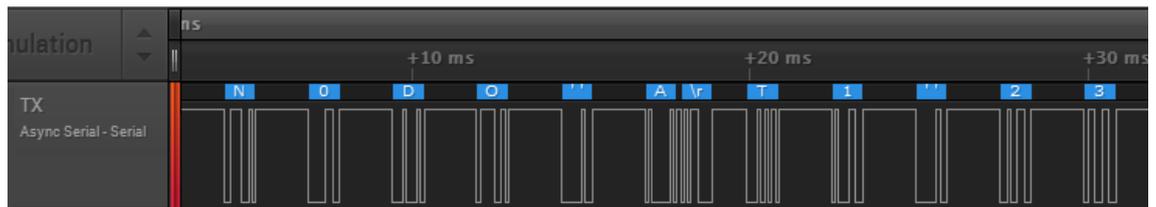


Fig 33. Ejemplo de una trama enviada desde el coordinador hacia el computador.

En la Fig 33 se observa una serie de tramas enviadas por el microcontrolador hacia el PC. La señal tiene un voltaje de 0 a 3,3V y es procesada por un MAX 3232 generando un equivalente de 0 a 5V. En la transmisión se puede observar el mensaje visualizado en código Ascii: NODO A T1 23, que hace referencia a una temperatura de 23 °C del sensor 1 en el Nodo A.

## 7.6) TABLA DE CONSUMO

Componente	Descripción	Funcionalidad	Características de muestras: VCC = 2,9V a 3,0V T = 20°C a 22°C	
			Consumo típico	Unidades
MAX 3232	Convertor de señal RS232 de 3,0V a 5,0V	en funcionamiento normal	2,73	mA
PCA9515A	Repetidor de señales I2C	en funcionamiento normal	0,38	mA
		En modo sleep con MSSP, INTERRUPCIONES, USART y Pines de salida activados	7,88	mA
		En modo sleep sin periféricos activados	1,71	mA
XB24	Radio transmisor Xbee serie 2	Rourter Sin red en condiciones normales	37,97	mA
		Rourter con red en condiciones normales	8,08	mA
		Rourter con red en modo Sleep	1,91	mA
		Coordinador en condiciones normales	38,1	mA
24FC512	Memoria EPROM de 512Kbits	En modo reposo	0,01	mA
SHT21	Sensor de humedad y temperatura	En funcionamiento normal	0,58	mA
NODO AD	Es el nodo de la tesis de grado	Coordinador	51,4	mA
			3,0 -3,6	V
		Rourter En funcionamiento normal	18,3	mA
			3,0 -3,6	V
		Rourter en funcionamiento Sleep	6	mA
			3,0 -3,6	V

Tabla 6. Tabla de consumo en voltaje y amperaje de dispositivos.

NOTA:

- Los valores tomados son aproximados y pueden variar según las condiciones de alimentación y factores ambientales.
- La toma de datos fue realizada en un laboratorio, no directamente en un cultivo.

## 7.7) PROCESAMIENTO DE DATOS HUMEDAD Y TEMPERATURA

Cuando el sensor realiza la medición de la temperatura y la humedad, este otorga los datos dependiendo de la configuración que tiene internamente. Existen cuatro posibles combinaciones de resolución de las variables como se ve en la tabla 7 y son programables en el registro de usuario que tiene el SHT21. La configuración de los sensores que se usaron en este proyecto fue de '00', la cual es la que trae por defecto el SHT21.

	RH	T
'00'	12 bit	14 bit
'01'	8 bit	12 bit
'10'	10 bit	13 bit
'11'	11 bit	11 bit

Tabla 7. Muestra las 4 posibles combinaciones para la resolución de los datos obtenidos por parte del señor SHT21.

A los datos que entrega el sensor se le deben hacer un procesamiento matemático como lo detalla el datasheet para obtener la medición real de las variables. La ecuación que se usa para la temperatura es la (4) y la que se usa para humedad es la (5).

$$T = -46.85 + 175.72 * \frac{S_T}{2^{RES}} \quad (4)$$

$$RH = -6 + 125 * \frac{S_{RH}}{2^{RES}} \quad (5)$$

Donde:

- T= Temperatura.
- RH= Humedad relativa.
- ST = El valor en decimal de la medición de la temperatura.
- SRH= El valor en decimal de la medición de la humedad.
- RES = El valor de la resolución que se usó para la medición.

## 7.8) PRUEBAS EN CAMPO

### 7.8.1) Capsulas hidrofóbicas

Para medir la humedad y la temperatura en las raíces de la planta era necesario introducir el sensor SHT21 en la tierra pero en el momento de riego, cuando el agua bajaba hacia la raíz, el sensor quedaba expuesto a mojarse. Según el datasheet, este no puede tener contacto con agua pues se dañaría. Tal situación generaba un problema y por consiguiente, una solución. La empresa Adafruit vende una capsula que no permite la entrada de agua pero si el ingreso de humedad y tampoco afecta la medición de temperatura, dicha capsula traía consigo el sensor SHT10 (una versión más vieja del SHT21 pero de la misma fabrica SENSIRION) y el cable de datos (Fig 34). Esta alternativa era muy costosa, por dicha razón se buscó una capsula en el mercado chino, directamente en la página web Aliexpress (Fig 35).

Para el proyecto se decidió comprar una muestra de la empresa Adafruit y otras de la empresa china.

El sensor SHT10 no funciona porque este sensor no maneja un protocolo I2C estándar y realizar el protocolo propio no es viable, sin embargo se usó la capsula para el prototipo SHT21.



Fig 34. Capsula hidrofóbica con cable de datos de la empresa ADAFRUIT.



Fig 35. Capsula hidrofóbica con cable de datos hecha en china.

#### 7.8.2 Pruebas en cultivo

La prueba a la red de sensores se hizo en un cultivo de alverjas casero. Se sembraron 4 materas con diferente cantidad de semillas, como se muestra en la Fig 36. La primera matera se sembró con 15 semillas, la segunda con 5 semillas, la tercera con 3 semillas y por último la cuarta con 6 semillas. A las materas grandes se les añadió 5 kilogramos de tierra abonada cada una y a las materas pequeñas se les añadió 1 kilogramo de tierra abonada cada una. Fueron puestas a la intemperie y crecieron en condiciones naturales en la ciudad de Bogotá.

Después de 45 días de gestación (Fig 37) se hicieron las pruebas con los Nodos AD. A la matera número 1 se le instaló el Nodo C, a la matera número 2 el Nodo B y a la matera número 4 el Nodo A, como se muestra en la Fig 38.



Fig 36. Materas empleadas como elementos de prueba las cuales fueron utilizadas para germinar un cultivo de alverjas.



Fig 37. Muestra el cultivo de alverjas pasados 45 días de gestación.

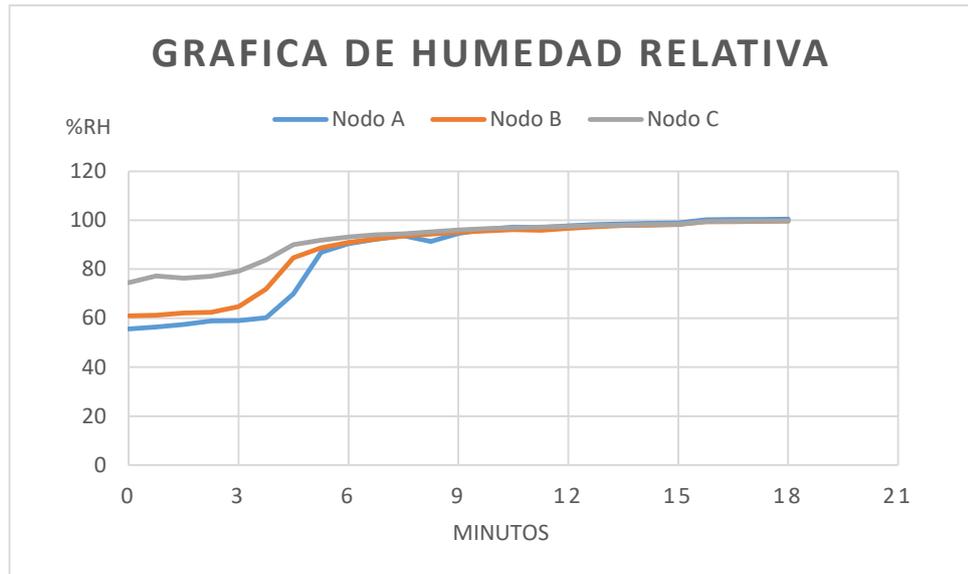


Fig 38. Muestra los sensores seleccionados

### 7.8.3 Desarrollo de la prueba

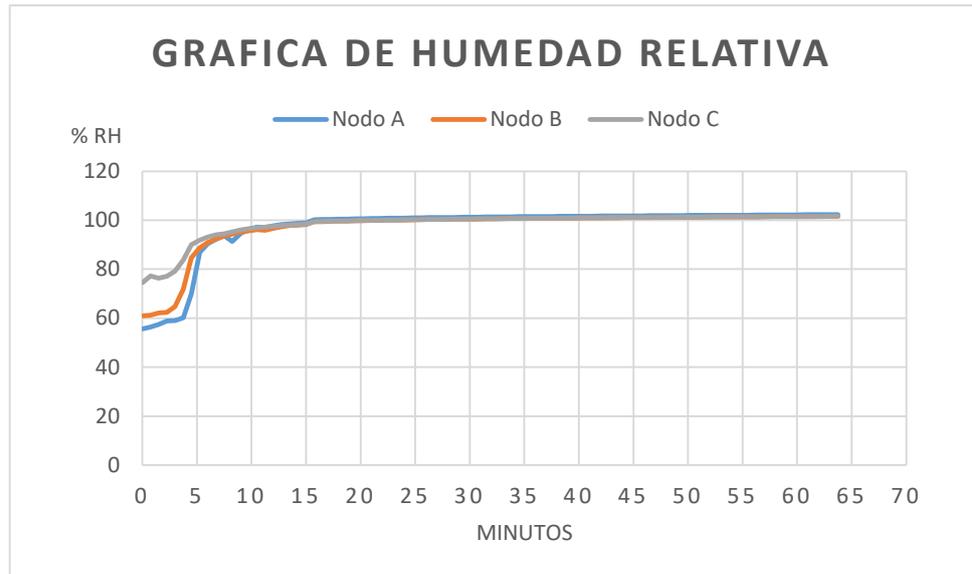
El objetivo del experimento era monitorear el cultivo durante un periodo de 60 minutos. Dicho monitoreo se dividió en cinco partes y se visualizan en las Gráficas 1, 2, 3 y 4:

- Minuto 0: Los sensores comienzan el monitoreo sobre la superficie de la tierra como se visualiza en la Fig 36.
- Minuto 3: Se inserta el sensor en la tierra, cerca de las raíces de las plantas.
- Minuto 6: Se añaden 250 ml de agua, sin retirar los sensores de la tierra.
- Minuto 9: Se añaden 250 ml de agua, sin retirar los sensores de la tierra.
- Minuto 12: Se añaden 250 ml de agua, sin retirar los sensores de la tierra.
- Minuto 15: Se añaden 250 ml de agua, sin retirar los sensores de la tierra.
- Minuto 16-60: El monitoreo continua durante 45 minutos sin añadir agua y sin retirar los sensores de la tierra.
- Minuto 60: Finaliza el monitoreo.



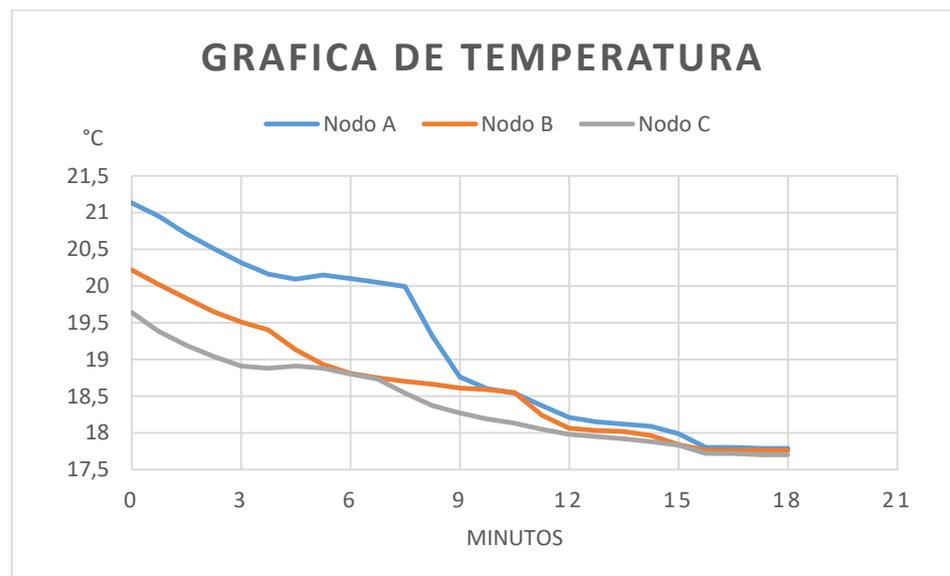
Grafica 1. Muestra la medición durante los primeros 15 minutos del porcentaje de Humedad Relativa.

En la Gráfica 1 se visualiza el porcentaje de humedad relativa que tuvo el cultivo durante los primeros 18 minutos. En el minuto 0 se observa un mínimo de 55%RH y un máximo de 74,53 %RH. En el minuto 3 se introduce el sensor en la tierra la RH (Humedad Relativa) sube rápidamente hasta un tope de 90%RH. En el minuto 6 se adicionan 250ml de agua y la RH se eleva lentamente hasta un máximo de 96%RH. En el minuto 9 se adicionan nuevamente 250ml de agua y la humedad se incrementa con más lentitud que la anterior hasta llegar a un tope de 97%RH. En el minuto 12 y minuto 15 se adicionan también 250ml de agua cada uno pero no se evidencia un aumento significativo en la RH. En el minuto 18 la RH llego a un porcentaje del 100%RH.



Grafica 2. Muestra la gráfica de la humedad relativa durante el tiempo que duro la medición (60 minutos).

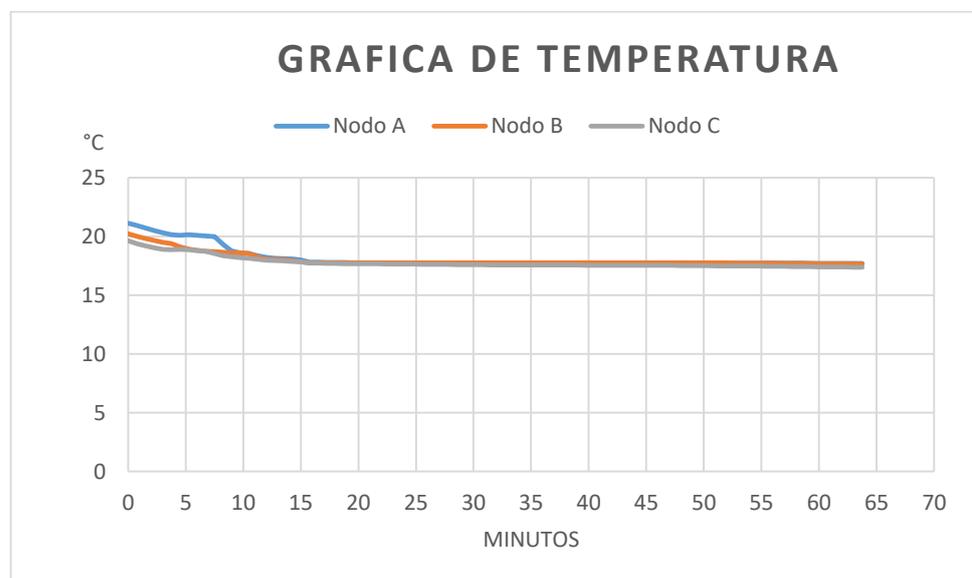
En la Gráfica 2 se aprecia la medición respecto a la humedad relativa que duró 60 minutos. En el rango de los 18 minutos a los 60 minutos, la humedad no tuvo cambios significativos y el máximo registrado fue de 102 % RH. Nótese que la RH jamás deajo de subir y la causa es que la planta es incapaz de absorber 1 litro de agua en 60 minutos.



Grafica 3. Muestra la medición de la temperatura del cultivo en los primeros 18 minutos.

En la Gráfica 3 se visualiza la temperatura sensada durante los primeros 18 segundos. En el minuto 0 el sensor estaba sobre la superficie de la tierra registrando una temperatura máxima de 21,13 °C y una mínima de 19,64°C. En ese transcurso de tiempo hasta el minuto 3 la temperatura descendió de forma constante hasta llegar a un mínimo de 18,91°C y un máximo de 20,31°C. En el minuto 3 se añadieron 250ml de agua lo que produjo una caída de temperatura en los nodos, durante el periodo de los 3 minutos a los 6 minutos la temperatura varió dependiendo del tamaño de la materia, del recorrido interno del agua en la tierra, la capsula que se usó y la cantidad de plantas cercanas.

En el minuto 6 se añadió de nuevo 250ml de agua lo que produjo una caída significativa en la temperatura del Nodo A, sin embargo los otros Nodos no reflejaron un cambio similar. En el minuto 9 se añadió nuevamente 250ml de agua y en el trascurso de los 9 a los 12 minutos la temperatura de los sensores se estabilizo descendiendo hasta los 18 °C. En el minuto 12 y 15 se añadieron 250ml de agua cada uno hasta lograr una temperatura mínima de 17, 83 °C.



Grafica 4. Muestra la temperatura de la medición durante los 60 minutos que duró la toma de datos.

En la Gráfica 4 se aprecia el comportamiento de la temperatura registrada por los 3 Nodos durante la toma de datos. La temperatura se estabilizo en los 15 minutos del experimento. Se llegó a una temperatura máxima de 21,13°C y a una mínima de 17,39°C en el transcurso de los 60 minutos.

#### 7.8.4) Comparación capsulas hidrofóbicas



Fig 39. Muestra las capsulas hidrofóbicas hechas en China y en Estados Unidos.

Se observó que el uso de las capsulas hidrofóbicas (Fig 39) pueden alterar la medición de las variables de temperatura y humedad. En el experimento el Nodo A tenía la capsula de origen estadounidense y los Nodos B y C tenían las capsulas de origen chino. Es por esta razón que los datos del nodo A son diferentes a los datos de los otros nodos. Dicha diferencia afecta en mayor medida a la variable de temperatura.

## 7.9) CONEXIÓN CONECTOR P606C CON EL NODO

Para conectar el sensor con el NODO AD, es necesario soldar el conector P606C tipo macho a los terminales de la placa del nodo como se ve en la Fig 40, así, de este modo el conector hembra puede empalmar con su respectivo conector ya soldado (Fig 44). La disposición de los pines se muestra en la Fig 41.

Para la placa del sensor, se conecta el otro extremo del cable que tiene un conector macho como se muestra en la Fig 42. Para su conexión refiérase a la Fig 43.

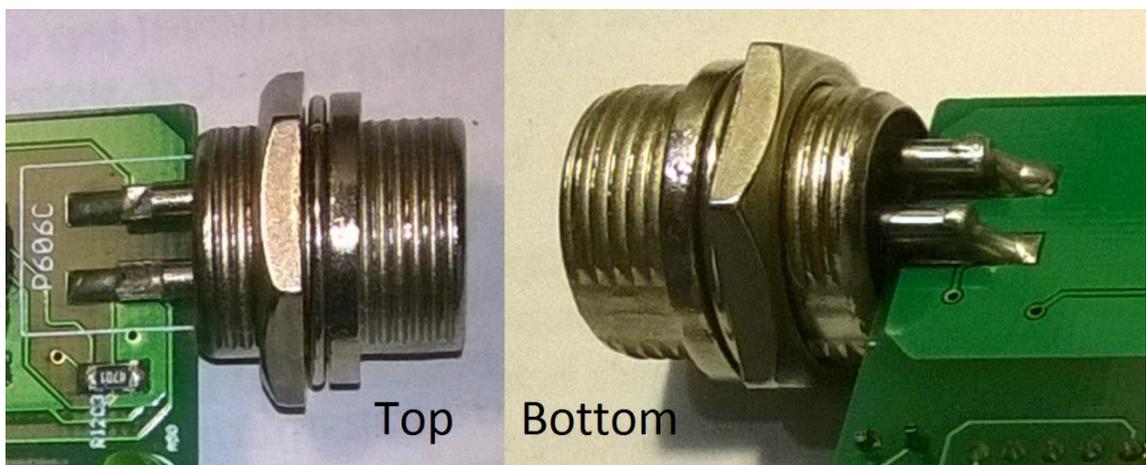


Fig 40. Conector P606C Tipo Macho parte Superior (TOP) e inferior (BOTTOM).

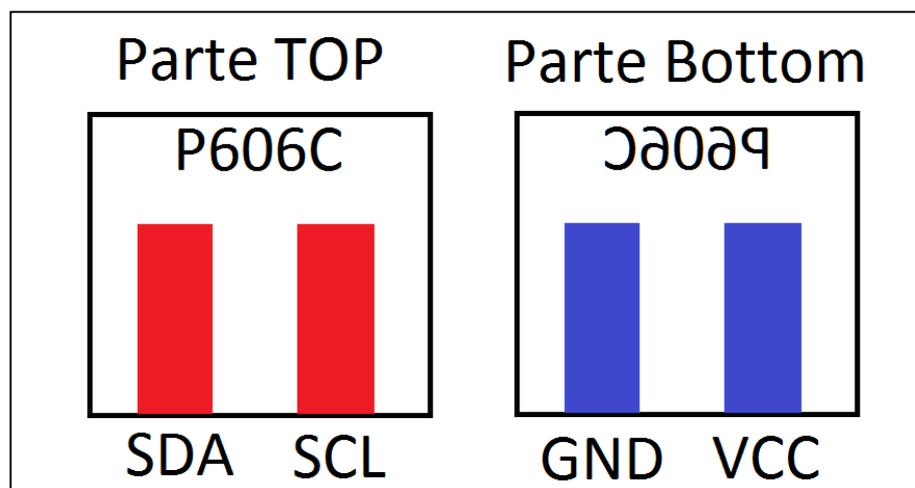


Fig 41. Disposición de los pines en la PCB para el conector P606C.

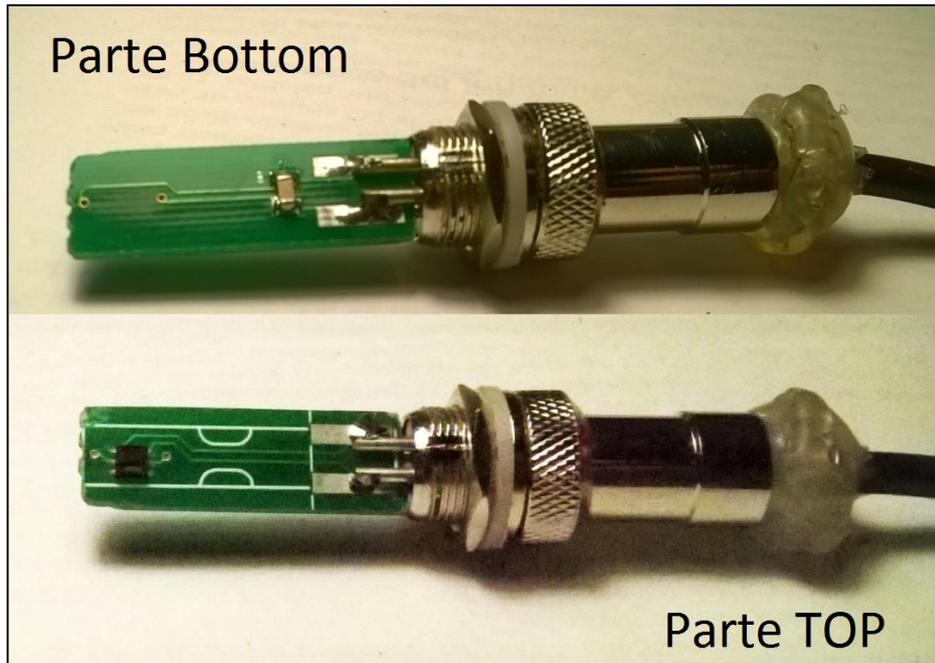


Fig 42. PCB del sensor SHT21 con el conector P606C.

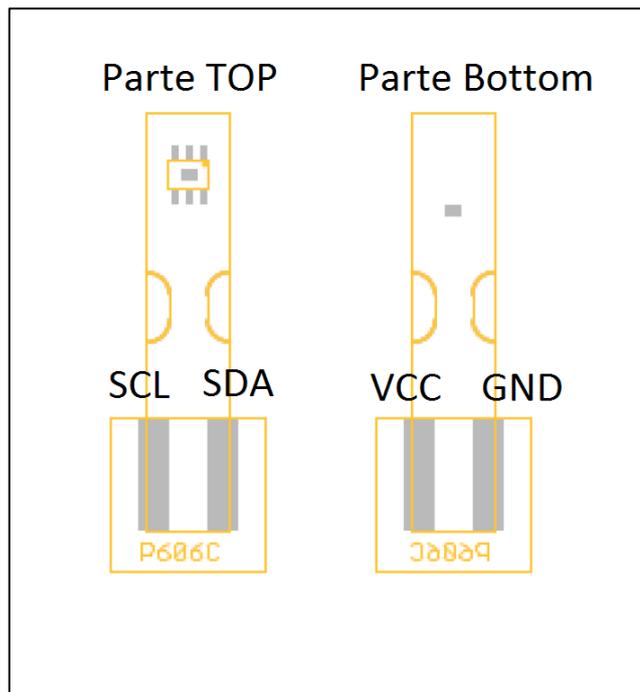


Fig 43. Configuración de pines del PCB del sensor.



Fig 44. Conexión conector hembra y macho P606C.

#### 7.10) NODO AD

En la Fig 45 se observa la parte superior del NODO AD y en la Fig 46 se observa la parte inferior. En la Fig 48 se muestra el nodo completo.

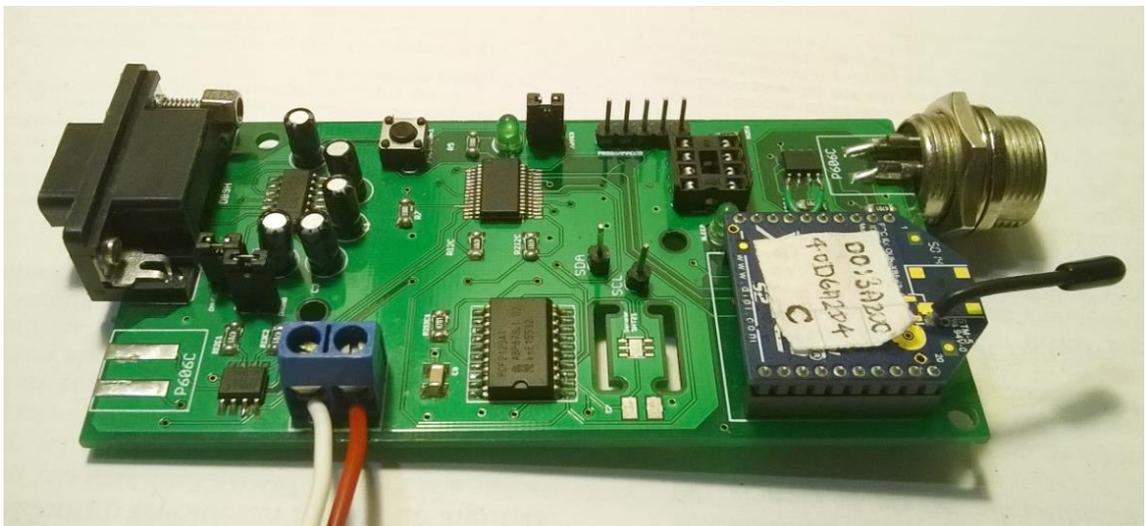


Fig 45. Parte superior del NODO AD.

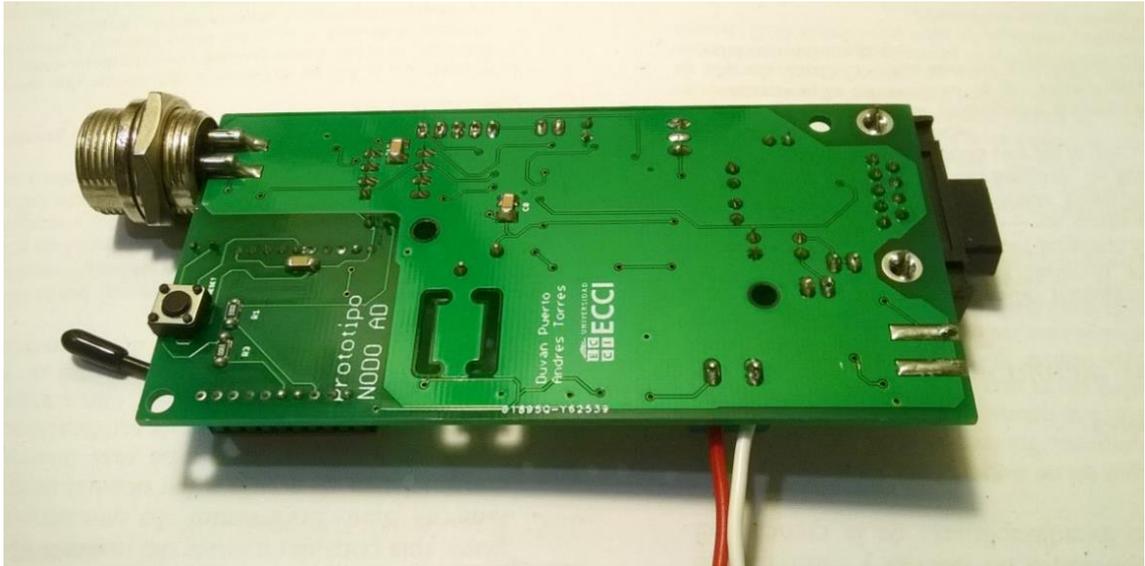


Fig 46. Parte Inferior del NODO AD.

En la Fig 47 se observa la fuente y las baterías usadas para los nodos.



Fig 47. Fuente y baterías para Nodos.

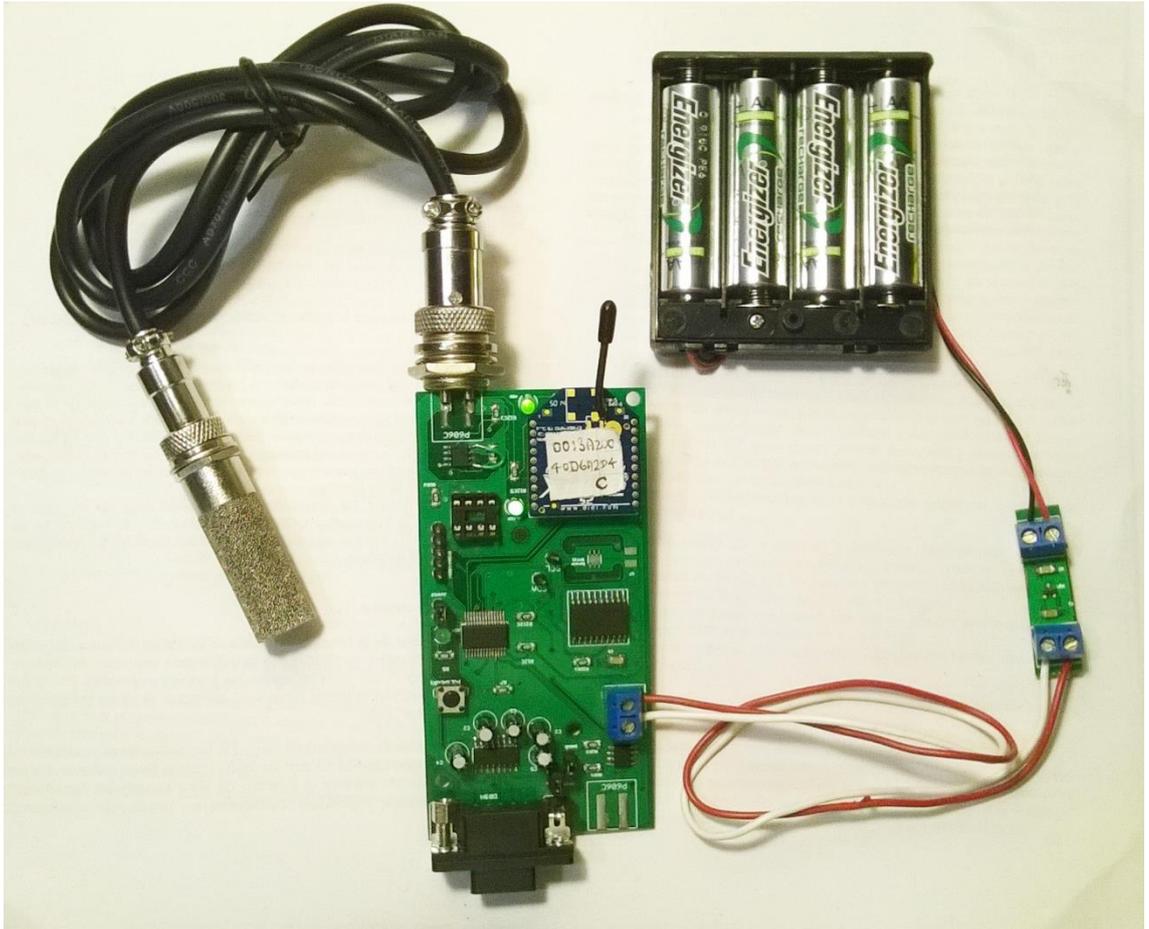


Fig 48. NODO AD con fuente de voltaje, Sensor SHT21 y baterías.

## 7.11 MEDIDAS

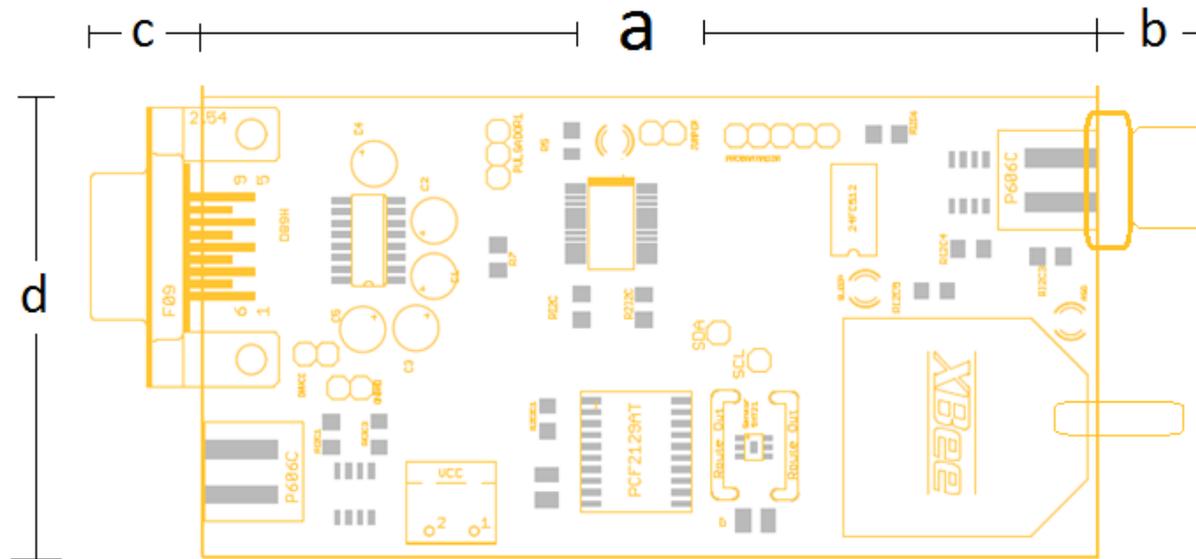


Fig 49. Nodo AD con sus medidas.

Letra	Medición	unidades
a	100	mm
b	18	mm
c	9	mm
d	50	mm

Tabla 8. Medidas del NODO AD. Todas las medidas están en Milímetros.

## 7.12) COSTOS

En la tabla 5 detalla el costo por cada componente que tiene el NODO AD

Componente	Total Dólares	Total Pesos colombianos
RTC	2,4	6928,8
Xbee	17	49079
micro	3,14	9065,18
Rs3232	1,44648424	4176
SHT21	7,66	22114,42
Fuente de voltaje	1,22	3522,14
Memoria	1,34	3868,58
Repetidor	2,46	7102,02
Conector P606C	3,81018358	11000
Cable y capsula hidrofóbica	14,89	42987,43
Sócalo 8 pines (Memoria)	0,03013509	87
Borneras	0,36162106	1044
Jumper	0,06546588	189
Regleta	0,14063041	406
Pulsador	0,2078282	600
Led	0,2078282	600
Componentes RC	1,66	4792,42
Baterías AA	36,6	105664,2
Porta pilas	2,08	6004,96
Fabricación PCB	2,19	6322,53
Soldadura	0,69276065	2000
<b>TOTAL</b>	<b>99,6029373</b>	<b>287.553,68</b>

Tabla 9. Costo total que requiere un NODO AD. La TMR que se utilizó para esta compra fue de dólar se hizo con un valor de 2887 pesos.

Aspectos a tener en cuenta:

- El costo total de construir un NODO AD equivale a 287,553 pesos colombianos.
- No se incluye el costo de importación de cada producto.
- No se incluye el costo de ingeniería.
- No está contemplado el cable rs232 que se usa para la comunicación con el PC. Este tiene un costo aproximado de 40.000 pesos.

## RESULTADOS

Con base a las pruebas de campos se obtuvieron los siguientes resultados:

- 1) El prototipo NODO AD funciona sin inconvenientes en un ambiente real.
- 2) El tiempo de respuesta del sensor es de aproximadamente 270ms. Esto es debido a la resolución de bits que tiene para las variables a medir (14 bits para temperatura y 12 bits para humedad). Para disminuir el tiempo de respuesta se debe reducir la resolución de las mediciones.
- 3) La capsula hidrofóbica funcionó correctamente pero altera la medición de las variables dependiendo de donde fue hecha (China y EEUU).
- 4) La duración de la prueba tuvo un intervalo de tiempo de 60 minutos, durante la cual no se activó el modo sleep y la transmisión fue continua a un intervalo de tiempo de 45 segundos aproximadamente. Una vez finalizada la prueba el voltaje de la batería presentó una caída de 1 mV.
- 5) Fue necesario usar una cubierta de silicona en las partes inferiores de las capsulas hidrofóbicas porque hay una abertura entre el cable y la carcasa lo que genera que el agua entre al circuito y lo dañe.
- 6) La capsula China afecta menos el nivel de temperatura que la estadounidense pero este desfase es de solo 1 °C.
- 7) La distancia máxima (línea de vista interrumpida por una pared de ladrillo de 20 cm de espesor) entre Nodos que garantiza un correcto funcionamiento de la comunicación entre sensores fue de 24m.
- 8) El programa Hyperterminal que se usó para la visualización de los datos en el PC, comienza a perder los datos después de 18 minutos.
- 9) Es necesario tener precaución con los nodos tipo routers pues estos pueden crear su propia red e invitar a otros Nodos a unirse a ella, dejando al coordinador sin red y sin comunicación con los nodos de la red.
- 10) Ocurrió un daño en un repetidor I2C cuando el voltaje del NODO AD cayo por debajo de los 3V razón por la cual se debe tener precaución con el suministro de voltaje.
- 11) Lo que más genera consumo en el microcontrolador son las salidas y entradas activas y no los periféricos (MSSP, USART, TIMER) como se pensaba.
- 12) El sensor SHT21 genera errores en las tramas I2C cuando trabaja a 400KHz. Por el contrario cuando trabaja a 100KHz funciona correctamente.
- 13) Cuando se configura alguna de las características del modo Sleep en el radio Xbee tipo Router, este deja de ser un Router y se convierte en un End Device.
- 14) Se puede Configurar los Radios Xbee directamente desde el puerto Db9 conectado al computador. Esta característica requiere reiniciar el NODO

COORDINADOR y mantener pulsado el Botón del Nodo AD durante 40 segundos y soltarlo. Solo permite una velocidad de Baudios de 9600 bps.

## CONCLUSIONES

Las siguientes son las conclusiones de este proyecto:

- 1) A partir de una revisión del estado del arte se determinó que las variables: Temperatura y Humedad presentes en un cultivo de invernadero de rosas son las de mayor importancia dado que variaciones drásticas en ellas pueden desencadenar enfermedades a la planta.
- 2) A su vez, se determinó durante el mismo estudio que la toma manual de datos, como es común en los cultivos departamentales, conlleva a errores inducidos por parte del operario que realiza la toma y posterior digitación de los datos. Al estar los datos errados los ingenieros encargados de la toma de decisiones en el cultivo pueden incurrir en errores.
- 3) Durante la prueba de campo que duró 60 minutos, se estableció para cada NODO AD una frecuencia de muestreo equivalente a una toma de datos cada 45 segundos y se constató que las variables seleccionadas no presentan cambios considerables entre una medición y la otra, inclusive modificando manualmente las condiciones ambientales del cultivo por medio de la inserción de 1 litro de agua.
- 4) Los radios Xbee serie 2 funcionan sobre la banda ISM en la frecuencia de 2.4GHz y soportan un ancho de banda de hasta 250kb/s. En las pruebas realizadas el ancho de banda utilizado fue de 150 bits cada 45 segundos lo que equivale a 3.3b/s.
- 5) Se usó el sensor SHT21 porque permite medir la temperatura del ambiente y la humedad relativa en un solo dispositivo, además, tiene una relación costo-beneficio superior respecto a la competencia. También se le dio importancia a la certificación internacional ISO/IEC 17025 de la ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation) que otorga estándares de calibración internacional a los productos de la fábrica suiza SENSIRION incluido el SHT21. [Anexo 1]
- 6) El Nodo AD es funcional y puede configurarse como Router, coordinador o End device, lo que se traduce en una reducción de costos, dado que el hardware es genérico para la construcción de cualquier elemento dentro de la red.
- 7) Los puertos P606C donde se comunican los sensores SHT21 son de carácter I2C, lo que los convierte en multifuncionales. Dicha característica permite conectar cualquier tipo de sensor que maneje I2C al NODO AD. Para adaptar un nuevo sensor u dispositivo que maneje este protocolo de comunicación, es necesario tener precaución con las direcciones de cada nuevo módulo y también se necesita modificar el código del microcontrolador, pero en cuanto a hardware no se requiere hacer ningún cambio.

- 8) El protocolo propio de enrutamiento que tiene el radio Xbee es insuficiente para la creación de una red concisa y estable, por esta razón es preferible crear un protocolo diferente usando los comandos AT y que sea controlado por el microprocesador como se explicó en la sección 7.3.3 “Solución alternativa”.

## TRABAJOS FUTUROS

1. Cambiar el sensor SHT21, dado que este integrado no permite cambiar la dirección del dispositivo dentro del bus de comunicación I2C, lo que implica que por cada sensor se debe tener un módulo MSSP independiente.
2. Se prevé cambiar la memoria EEPROM, pues esta tiene un límite de lecturas y escrituras, lo que la haría obsoleta una vez llegado el límite. Sería preferible usar otro tipo de memoria que sea más cómoda, con un mejor desempeño y con un consumo de energía menor, como por ejemplo una SD card.
3. Se propone cambiar el radio Xbee pues este consume mucha energía, ocupa mucho espacio, es costoso, tiene poco alcance y su direccionamiento tipo mesh no es fiable.
4. Se necesita crear una carcasa que resguarde al circuito del nodo de los factores ambientales, como la lluvia y el sol.
5. Se prevé para una versión mejorada del NODO AD, cambiar la comunicación serial con el computador por una comunicación USB, puesto que este tipo de transmisión de datos es más genérica y usada en la actualidad que la comunicación serial por DB9 (comunicación usada para el NODO AD), la cual necesita un cable conversor de protocolo USB-RS232.
6. En una futura versión se espera integrar dentro de la PCB del NODO la fuente de voltaje.

## GLOSARIO

- **Transceptor:** Un transceptor es un dispositivo que cuenta con un transmisor y un receptor que comparten parte de la circuitería o se encuentran dentro de la misma caja.
- **Translocación:** Es un cambio de localización. Generalmente se refiere a la genética, cuando parte de un cromosoma se transfiere a otro cromosoma. Los cromosomas son estructuras que portan genes, las unidades de nuestra información hereditaria.
- **Fotosintato:** se refiere a cualquier compuesto que es producto de la fotosíntesis.
- **Hortícola:** De la horticultura o relacionado con ella.
- **Horticultura:** cultivo en huertos.
- **RTC:** Hace referencia a un dispositivo que puede generar un sistema de reloj en tiempo real. Se le llama RTC por sus siglas en inglés "Real Time Clock".
- **PCB:** Hace referencia a la placa de circuito impreso que tienen los sistemas electrónicos. Estos conllevan un plano eléctrico y componentes electrónicos. Se le llama PCB por sus siglas en inglés "Printed Circuit Board".

## BIBLIOGRAFIA

- [1] ASOCOLFLORES, Publicaciones, “Colombia exporta 500.000 flores a 90 países en el mes de San Valentín.doc”, {En línea}, {2 de octubre de 2014}, Disponible en: [www.asocolflores.com](http://www.asocolflores.com)
- [2] ASOCOLFLORES, Publicaciones, “Boletín económico enero – Diciembre de 2013 trade map”, {En línea}, {2 de octubre de 2014}, Disponible en: [www.asocolflores.com](http://www.asocolflores.com)
- [3] MINISTERIO DE COMERCIO, INDUSTRIA Y TURISMO, “Gobierno mantiene defensa de arroz, maíz, alas y muslos de pollos”, {En línea}, {2 de octubre de 2014}, Disponible en: <http://www.mincit.gov.co/publicaciones.php?id=14053>
- [4] SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE SENA, “Caracterización ocupacional del sector de la floricultura” {En línea}, {2 de octubre de 2014}, Disponible en: <http://observatorio.sena.edu.co/mesas/01/FLORICULTURA.pdf>
- [5] EMBAJADA DE ECUADOR EN LOS PAISES BAJOS, “Las relaciones de comercio ecuador – países bajos” {En línea}, {2 de octubre de 2014}, Disponible en <http://www.embassyecuador.eu/site/images/descargas/studio-opportunidades-comerciales-ecuador-paises-bajos.pdf>
- [6] RIMACHE ARTICA, Mijail Floricultura Cultivo y Comercialización. Bogotá D.C. Ediciones de la U, 2011, 70p.
- [7] GARZON, C. A; RIVEROS, O.J, "Temperature, humidity and luminescence monitoring system using Wireless Sensor Networks (WSN) in flowers growing." ANDESCON, 2010 IEEE , vol., no., pp.1,4, 15-17 Sept. 2010. doi: 10.1109/ANDESCON.2010.
- [8] APARICIO, F. “Redes de Sensores Inalámbricos Aplicadas a Optimización en Agricultura de Precisión para Cultivos de Café en Colombia” Journal de Ciencia e ingeniería, 2013, vol.5, No1, Agosto de 2013, pp. 46-52.
- [9] LÓPEZ, J A. SOTO, F. TORRES, R. ALBALADEJO, C. SUARDIAZ, J. NAVARRO, H. “MEWIN: un nodo sensor inalámbrico multientorno. Validación en agricultura de precisión”, 2011, Universidad Politécnica de Cartagena.
- [10] Benchimol, Daniel. Microcontroladores. Buenos aires. 2011. V17, 192p

- [11] MICROCHIP, Documentaciones, "PIC18(L)F2X/4XK22". {En línea}. Disponible en: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41412F.pdf>
- [12] D. Grant and A. Al-Anbuky, "Wireless Microclimate Sensor," Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information, 2007. ISSNIP 2007. 3<sup>rd</sup> International Conference on, Melbourne, Qld., 2007, pp. 663-668.
- [13] NXP, Documentaciones, "2C-bus specification and user manual". {En línea}. Disponible en: [http://www.nxp.com/documents/user\\_manual/UM10204.pdf](http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf)
- [14] TEXAS INSTRUMENTS, Documentaciones, "Interface Circuits for TIA/EIA - 232-F". {En Línea}. Disponible en: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/an/slla037a/slla037a.pdf>
- [15] UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARTA. "Samir Kouro. Sensores de humedad". "Automatización Industrial". {En línea}. Disponible en: <http://ingeborda.com.ar/biblioteca/Biblioteca%20Internet/Articulos%20Tecnicos%20de%20Consulta/Instalaciones%20Electricas%20Industriales/Sensores%20de%20Humedad.pdf>
- [16] Paul G. Hewit. Física Conceptual. 10 e. México. Pearson Educación, 2007.
- [17] SENSIRION. Documentación. "Introduction to Humidity". {En Línea}. Disponible en: [https://www.sensirion.com/fileadmin/user\\_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity\\_Sensors/Sensirion\\_Humidity\\_Sensors\\_Introduction\\_to\\_Relative\\_Humidity\\_V2.pdf](https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity_Sensors/Sensirion_Humidity_Sensors_Introduction_to_Relative_Humidity_V2.pdf)
- [18] COLOMBIA. PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA. Constitución política de Colombia. 1991.
- [19] COLOMBIA. MINISTERIO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES DE COLOMBIA. Decreto número 1900 (19, Agosto, 1990). Por el cual se reforman las normas y estatutos que regulan las actividades y servicios de telecomunicaciones y afines. Decreto número 1900 de 1990. Bogotá D.C., 1990.
- [20] COLOMBIA. MINISTERIO DE COMUNICACIONES. Resolución 689 (21, Abril, 2004). Por la cual se atribuyen unas bandas de frecuencias para su libre utilización dentro del territorio nacional, mediante sistemas de acceso inalámbrico y redes inalámbricas de área local, que utilicen tecnologías de espectro ensanchado y modulación digital, de banda ancha y baja potencia, y se dictan otras disposiciones. RESOLUCION 689 DE 2004. Bogotá D.C., 2004.

[21] HOWSTUFFWORKS. Documentación. "How Motes Work" {En Línea}. Disponible en:

<http://www.cc.gatech.edu/~keith/classes/ubicomplexity/pdfs/infra/hsw-motes.pdf>

[22] C. A. L. Garzón and O. J. R. Riveros, "Temperature, humidity and luminescence monitoring system using Wireless Sensor Networks (WSN) in flowers growing," ANDESCON, 2010 IEEE, Bogota, 2010, pp. 1-4.

[23] DECAGON. Documentación. "Em50 Series Data Collection System" {En Línea}. Disponible en:

[http://manuals.decagon.com/Manuals/13453\\_Em50\\_Web.pdf](http://manuals.decagon.com/Manuals/13453_Em50_Web.pdf)

[24] ALIEXPRESS. "Em50R Data logger Digital Analog". {En Línea}. Disponible en: <http://es.aliexpress.com/item/Em50R-Data-Logger-Digital-Analog-SDI12-SDI-12-Decagon-EM50G-EM5B-EM50->

[Decagon/32376732198.html?spm=2114.43010508.4.7.wscDSY](http://Decagon/32376732198.html?spm=2114.43010508.4.7.wscDSY)

[25] EPSONDEVICE. Documentaciones. "Comparison of real time clock module products and discrete products" {En Línea}. Disponible en:

[http://www5.epsondevice.com/en/information/technical\\_info/pdf/wp\\_20140131e\\_rtc\\_discrete.pdf](http://www5.epsondevice.com/en/information/technical_info/pdf/wp_20140131e_rtc_discrete.pdf)

[26] MICROENSAMBLE. Descargas. "GENERACIÓN DE ARCHIVOS GERBER Y DE PERFORACIÓN PARA LA FABRICACIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS DE DOBLE CAPA EN EAGLE PCB LAYOUT" {En Línea}. Disponible en: <http://www.microensamble.com>

## ANEXOS

### 13.1 HOJAS DE ESPECIFICACIÓN

- Microcontrolador 18lf26k22
- Sensor SHT21
- MAX 3232
- Repetidor I2C PCA9515A
- Memoria EEPROM 24FC512
- Conector P606C
- Radio Xbee S2
- Fuente de Voltaje AS1360

### 13.2 OTROS DOCUMENTOS

- Certificado de calibración SHT21