

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED MESH BASADA EN  
TECNOLOGÍA *ZIGBEE* PARA CAPTURA DE PARÁMETROS AMBIENTALES  
EN EDIFICACIONES VERDES PARA EL NUEVO EDIFICIO DE LA E<sup>3</sup>T

MARÍA LIBIA ORTIZ MALAGÓN  
ROSYBELL RENTERÍA REYES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA

2014

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED MESH BASADA EN  
TECNOLOGIA *ZIGBEE* PARA CAPTURA DE PARÁMETROS AMBIENTALES  
EN EDIFICACIONES VERDES PARA EL NUEVO EDIFICIO DE LA E<sup>3</sup>T

MARÍA LIBIA ORTIZ MALAGÓN  
ROSYBELL RENTERIA REYES

Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Electrónico

Director  
JORGE HERNANDO RAMÓN SUARÉZ  
Ingeniero Electricista, MS.c

Co-Director  
RAUL HERNANDO CADENA CONTRERAS  
Ingeniero Electrónico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA

2014

## DEDICATORIA

A mis padres, las personas que siempre han creído en mí y me ha brindado todo su amor y apoyo incondicional. A mis hermanos Milena, Andrés y Alexander, por brindarme su ayuda en los momentos que más los he necesitado. A mi novio Eduardo, por estar conmigo viviendo cada sueño, cada logro, cada alegría. A mis amigas Nathalie y Lorena por cada momento compartido en este largo camino. A Rochy por enfrentar conmigo tantos fracasos pero sobretodo tantas victorias en cada nuevo reto que nos puso la vida. A mi mejor amigo y maestro Raúl, por cada enseñanza y por todo el tiempo dedicado a este desafío.

*Libia Ortiz*

Universidad  
Industrial de  
Santander

## DEDICATORIA

Le doy principalmente gracias a Dios por todas las bendiciones que me ha  
dado en mi vida.

A mi mamá por su apoyo, por darme la fuerza para seguir adelante, por todas  
esas llamadas para darme ánimos y enseñarme que de la mano de Dios todo  
es posible.

A mi papá que siempre me educó de la mejor manera.

A mi hermana que juntas hemos vivido los mejor momentos y hemos superado  
muchos obstáculos.

A mi hermano que es un ejemplo a seguir por su apoyo incondicional.

A mi novio que me enseñó a guerrear como nadie lo ha hecho y a levantarme  
ante los obstáculos que tuve en la UIS pero al final salí victoriosa.

A mi amiga Libia por su esfuerzo dedicación y paciencia porque juntas  
vencimos muchos obstáculos y nos apoyamos mutuamente.

A nuestro codirector Raul que fue paciente y dedicado en la realización de  
este proyecto.

A nuestro director Jorge por su confianza en nosotras y darnos la oportunidad  
de trabajar con él.

Y a todos mis compañeros de la carrera que me aportaron algo para mi  
desarrollo estudiantil y personal, los cuales compartí muchas alegrías y  
tristezas.

**ROSYBELL RENTERIA REYES**

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	21
1. DEFINICION DEL PROBLEMA .....	22
2. JUSTIFICACIÓN.....	24
3. OBJETIVOS.....	25
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	25
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
4.MARCO TEÓRICO .....	26
4.1. COMUNICACIONES INALÁMBRICAS .....	26
4.2. ¿QUÉ ES ZIGBEE? .....	27
4.2.1. Especificaciones .....	29
4.2.1.1. Especificación ZigBee.....	29
4.2.1.1.1. ZigBee Building Automation (Eficiencia comercial de espacios).....	31
4.2.1.1.2. ZigBee Health Care (Vigilancia de la salud).....	31
4.2.1.1.3. ZigBee Home Automation (Hogares inteligentes).....	31
4.2.1.1.4. ZigBee Light Link (Control de iluminación LED).....	32
4.2.1.1.5. ZigBee Smart Energy (Ahorro de energía en el hogar).....	32
4.2.1.1.6. ZigBee Telecom Services (Servicios de valor añadido).....	32
4.2.1.1.7. ZigBee Retail Services (Compras más inteligentes).....	33
4.2.1.2. Especificación ZigBee IP .....	33
4.2.1.2.1. Smart Energy Profile 2 (Gestión de la energía en el hogar).....	34
4.2.1.3. Especificación ZigBee RF4CE .....	34

4.2.1.3.1. ZigBee Remote Control (Control remoto avanzado).....	35
4.2.1.3.2. ZigBee Input Device.....	35
4.2.2. TOPOLOGÍAS DE RED.....	35
4.2.2.1. Topología de estrella.....	35
4.2.2.2. Topología de árbol.....	36
4.2.2.3. Topología de malla (mesh).....	36
4.2.3. TIPOS DE DISPOSITIVOS.....	37
4.2.3.1. Clasificación según su papel en la red.....	37
4.2.3.2. Clasificación según su funcionalidad.....	38
4.3. MÓDULOS XBEE.....	38
4.3.1. Modos de operación.....	39
4.3.1.1. Modo Recibir/Transmitir (Transmit mode/Receive mode).....	40
4.3.1.2. Modo de bajo consumo (Sleep Mode).....	41
4.3.1.3. Modo de comando (Command mode).....	41
4.3.1.4. Modo Idle (Idle mode).....	41
4.4. ¿QUÉ ES UN SENSOR?.....	42
4.4.1. Tipos de sensores.....	43
4.4.1.1. Temperatura.....	43
4.4.1.1.1. Sensores térmicos.....	44
4.4.1.2. Humedad.....	46
4.4.1.2.1. Sensores de humedad.....	47
4.5. ANTENAS.....	49
4.5.1. Tipos de antenas.....	49
4.5.1.1. Antenas “guía-onda”.....	52

4.5.1.2.	Antenna.....	52
4.5.2.	Parámetros de antenas.....	54
4.5.2.1.	Impedancia de entrada ( $Z_A$ ).....	54
4.5.2.2.	Coeficiente de reflexión ( $\Gamma$ ).....	54
4.5.2.3.	Relación de la onda estacionaria (ROE o VSWR).....	55
4.5.2.4.	Ancho de banda (BW).....	55
4.5.2.5.	Analizador de redes vectorial.....	56
4.5.2.6.	Tipos de diagramas.....	56
4.5.2.7.	Magnitudes medidas:.....	56
5.	ANTECEDENTES.....	59
6.	DESARROLLO DEL TRABAJO.....	62
6.1.	ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	62
6.2.	ETAPA 2: SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS ZIGBEE.....	62
6.3.	ETAPA 3: SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS DE SENSADO.....	66
6.3.1.	Sensor de temperatura.....	67
6.3.2.	Sensor de Humedad.....	69
6.4.	ETAPA 4: DISEÑO ELECTRÓNICO.....	70
6.4.1.	Etapa de administración de energía.....	70
6.4.2.	Humedad del aire: sensor HS1101.....	74
6.4.3.	Temperatura de contacto: sensor RTD PT100.....	77
6.5.	ETAPA 5: CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES.....	84
6.5.1.	Calibración del sensor de temperatura.....	84
6.5.2.	Calibración del sensor de humedad.....	88
6.6.	ETAPA 6: SISTEMA DE CONTROL.....	90

6.7.	ETAPA 7: CONFIGURACIÓN DE LOS MÓDULOS XBEE .....	92
6.7.1.	Configuración red mesh (XBEE XB24-DMWIT-250).....	93
6.7.2.	Configuración red punto a punto (Envío y recepción entre el edificio E <sup>3</sup> T UIS y el edificio de ingeniería civil UIS).....	99
6.7.3.	Pruebas de comunicación (punto a punto).....	101
6.7.4.	Prueba de conexión .....	106
6.7.5.	Pruebas de transmisión entre nodos en red mesh.....	107
6.8.	ETAPA 8: CONSTRUCCIÓN DE ANTENAS TIPO CANTENNA .....	107
6.8.1.	Proceso de construcción cantenna .....	107
6.8.2.	Análisis de parámetros (Analizador de espectros) .....	113
6.9.	ETAPA 9: IMPLEMENTACIÓN DEL SERVIDOR.....	117
6.10.	ETAPA 10: DESARROLLO DE LA INTERFAZ GRAFICA .....	121
6.11.	ETAPA 11: TRANSMISIÓN DE LOS DATOS.....	121
7.	CONCLUSIONES .....	123
	CITAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125
	BIBLIOGRAFIA.....	130
	ANEXOS.....	132

## LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1: Comparación protocolos inalámbricos comúnmente implementados	26
Tabla 2: Ventajas y desventajas de sensores térmicos: termocupla, RTD y termistor	44
Tabla 3: Comparativa entre los metales empleados en la construcción de RTD's	46
Tabla 4: Bandas de frecuencia	50
Tabla 5: Parámetros s	57
Tabla 6: Comparación módulos ZigBee	63
Tabla 7: Comparación módulos XBee	65
Tabla 8: Comparación de sensores de temperatura: termocupla, RTD, termistor e integrado de silicio	67
Tabla 9: Comparación RTD's	68
Tabla 10: Comparación sensores de humedad del aire (capacitivos)	70
Tabla 11: Comparación baterías	72
Tabla 12: Comparación Reguladores	73
Tabla 13: Comparación Oscilador	74
Tabla 14: Característica de frecuencia de salida en función de RH	76
Tabla 15: Valores sugeridos según el integrado 555 empleado	76
Tabla 16: Comparación de amplificadores Operacionales Microchip	77
Tabla 17: Comparación de amplificadores Operacionales STMicroelectronics	78
Tabla 18: Comparación amplificadores operacionales Texas Instruments	79
Tabla 19: Comparación fuentes de referencia	79
Tabla 20: Caracterización RTD's	87

Tabla 21: Caracterización HS1101 .....	89
Tabla 22: Comparación de microcontroladores de la familia MSP439f5X .....	92
Tabla 23: Exponente (n) para pérdidas en las líneas en diferentes ambientes .....	102
Tabla 24: Resultados teóricos de distancia vs potencia (edificio de oficinas, sin visión directa).....	102
Tabla 25: Resultados teóricos de distancia vs potencia (al aire libre).....	102
Tabla 26: Resultados experimentales de distancia vs potencia (puertas abiertas).....	103
Tabla 27: Distancia vs paquetes recibidos y perdidos (puertas abiertas) .....	103
Tabla 28: Resultados experimentales de distancia vs potencia (puertas cerradas).....	104
Tabla 29: Distancia vs paquetes recibidos y perdidos (puertas cerradas) .....	104
Tabla 30: Resultados experimentales distancia vs potencia (al aire libre con línea de vista).....	105
Tabla 31: Distancia vs paquetes recibidos y perdidos (al aire libre con línea de vista) .....	106
Tabla 32: Conexión vs distancia entre nodos .....	107
Tabla 33: Características tarjetas de desarrollo.....	120
Tabla 34: Especificaciones técnicas XBee/XBee-PRO 2.4 DigiMesh .....	144

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Diagrama de bloques funcional del modelo propuesto .....	23
Figura 2. Topología de red para la especificación ZigBee .....	30
Figura 3. Topología de red para la especificación ZigBee IP .....	33
Figura 4. Topología de red para la especificación ZigBee RF4CE .....	34
Figura 5: Topologías de conexión dispositivos ZigBee .....	36
Figura 6. Red de dispositivos ZigBee .....	38
Figura 7. Conexiones mínimas requeridas por el módulo XBee .....	39
Figura 8. Modos de operación permitidos por los módulos XBee .....	40
Figura 9. Sensores empleados en domótica.....	42
Figura 10: Clasificación general de sensores .....	43
Figura 11. Diagrama de radiación: antena omnidireccional, bidireccional y direccional.....	51
Figura 12. Antena “guía-onda” tipo cantenna. ....	52
Figura 13. Onda estacionaria.....	52
Figura 14. Red de dos puertos.....	57
Figura 15. Parámetros de impedancia .....	58
Figura 16. Circuito administrador de energía .....	73
Figura 17. Circuito acondicionador de humedad.....	75
Figura 18. Circuito acondicionador de temperatura .....	81
Figura 19. Circuito excitador de corriente .....	81

Figura 20. Circuito corrector de <b>R<sub>w</sub></b> .....	83
Figura 21. Filtro pasa-bajas .....	84
Figura 22. Psicrómetro digital .....	85
Figura 23. Visualización lecturas de voltaje a la salida de las RTD's (Multímetros).....	86
Figura 24: Visualización lectura de voltaje a la salida de las RTD's (Hyperterminal) .....	87
Figura 25: NODO 1 Visualización de humedad 66,1 %RH (psicrómetro) .....	89
Figura 26: NODO 1 Frecuencia HS1101 a 66,1 % RH .....	89
Figura 27. Vista pestaña PC Settings del programa XCTU .....	93
Figura 28. Respuesta positiva de verificación del puerto módulo concentrador	94
Figura 29. Configuración módulo concentrador .....	96
Figura 30. Respuesta positiva de verificación del puerto módulo router .....	97
Figura 31. Configuración módulo router.....	99
Figura 32. Configuración módulos router XBP24-DMSIT-250 .....	100
Figura 33. Porcentajes de paquetes recibidos y perdidos (puertas abiertas) .	104
Figura 34. Porcentajes de paquetes recibidos y perdidos (puertas cerradas)	105
Figura 35. Porcentajes de paquetes recibidos y perdidos (al aire libre con línea de vista) .....	106
Figura 36. Medición del diámetro de la lata .....	109
Figura 37. Dimensión y posición del elemento activo .....	110
Figura 38. Marcación altura de la lata y ubicación del dipolo.....	111
Figura 39. Dipolo.....	111
Figura 40. Vista lateral cantenna .....	112
Figura 41. Vista frontal cantenna .....	112
Figura 42. Medición cable coaxial.....	112

Figura 43. Conector N-macho CP454.....	112
Figura 44. Pigtail .....	113
Figura 45. Diagrama polar (cantenna emisora).....	114
Figura 46. Diagrama polar (cantenna receptora) .....	114
Figura 47. Carta de Smith (cantenna emisora) .....	115
Figura 48. Carta de Smith (cantenna receptora).....	115
Figura 49. SWR (cantenna receptora) .....	116
Figura 50. SWR (cantenna emisora).....	116
Figura 51. Tarjeta arduino UNO.....	118
Figura 52. Tarjeta Raspberry Pi .....	118
Figura 53. Tarjeta BeagleBoard .....	119
Figura 54: Visualización página web para el nodo 1 .....	122
Figura 55. Circuito acondicionador de humedad (Esquemático) .....	132
Figura 56. Circuito acondicionador de temperatura (Esquemático) .....	133
Figura 57. CPU NODO (Esquemático) .....	134
Figura 58. Módulo repetidor Xbee-Xbee (Esquemático) .....	135
Figura 59. Xbee-Beagle (Esquemático) .....	136
Figura 60. Layout circuito acondicionador de humedad (Top-rojo/Bottom-azul) .....	137
Figura 61. Layout Circuito acondicionador de temperatura (Top-rojo/Bottom-azul) .....	138
Figura 62. Layout módulo repetidor Xbee-Xbee (Top-rojo/Bottom-azul).....	138
Figura 63. Xbee-Beagle (Top-rojo/Bottom-azul) .....	139

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Esquemáticos y negativos de las tarjetas.....	132
Anexo B. Código fuente microcontrolador .....	140
Anexo C. ESpecificaciones técnicas XBEE/XBEE-PRO 2.4 DIGIMESH .....	144
Anexo D. Código fuente para la creación de la base de datos .....	145
Anexo E. Código fuente interfaz gráfica.....	152



Universidad  
Industrial de  
Santander

## RESUMEN

TITULO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED MESH BASADA EN TECNOLOGIA ZIGBEE PARA CAPTURA DE PARÁMETROS AMBIENTALES EN EDIFICACIONES VERDES PARA EL NUEVO EDIFICIO DE LA E<sup>3</sup>T\*

AUTOR: MARÍA LIBIA ORTIZ MALAGON\*\*  
ROSYBELL RENTERIA REYES\*\*

PALABRAS CLAVE: Antena, Comunicaciones, Concentrador, Coordinador, Módulo, Router, Sensor, ZigBee.

DESCRIPCIÓN: Las comunicaciones inalámbricas se han convertido en una de las principales herramientas de desarrollo a nivel mundial, se encuentran profundamente ligadas a la tecnología y facilitan el desenvolvimiento social, laboral y personal de millones de usuarios. La integración de sistemas inalámbricos dentro del entorno doméstico e industrial, reduce costos y maximiza la autonomía de los consumidores. En este trabajo se presenta el proceso de diseño e implementación de una red *mesh* basada en tecnología *ZigBee* para captura de parámetros ambientales. La topología *mesh* facilita la conexión de todos los dispositivos de la red en modo *router*, lo cual les permite establecer una ruta óptima para la recepción y transmisión de la información sin necesidad de un coordinador que les asigne el camino a seguir. El módulo encargado de recibir los datos se denomina concentrador y está facultado para interactuar también como *router* con todos los dispositivos de la red. En cuanto al diseño electrónico, cada nodo está integrado por un microcontrolador, un módulo *XBee*, un sensor de temperatura y un sensor de humedad. Los sensores de temperatura y humedad cuentan con un circuito que convierte los cambios de resistencia y capacitancia en señales de voltaje y frecuencia respectivamente. Para el envío y recepción de la información entre Edificio de la E<sup>3</sup>T y el edificio de ingeniería civil, se emplearon dos antenas guía onda tipo “*cantenna*” y dos módulos *XBee PRO*. La función principal de las “*cantennas*” es la de direccionar y centrar la potencia de transmisión de los módulos, para así hacer posible la conexión entre los dos edificios. Finalmente, mediante una interfaz gráfica amigable se permite a los usuarios el acceso a la información de manera rápida y confiable.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director MSc. Jorge Hernando Ramón Suárez. Co-Director Ing. Raúl Hernando Cadena Contreras.

## ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A MESH NETWORK BASED ON *ZIGBEE* TECHNOLOGY FOR CAPTURE OF ENVIRONMENTAL PARAMETERS IN GREEN BUILDINGS FOR NEW BUILDING E<sup>3</sup>T\*

AUTOR: MARÍA LIBIA ORTIZ MALAGON\*\*  
ROSYBELL RENTERIA REYES\*\*

KEYWORDS: Antenna, Communications, Concentrator, Coordinator, Module, Router, Sensor, ZigBee.

DESCRIPTION: Wireless communications have become one of the major development tools globally, they are deeply linked to the technology and they facilitate the social, professional and personal upgrowth of millions of users. The integration of wireless systems within the home and industrial setting, reduces the costs and maximizes the autonomy of the consumers.

This paper presents the design and implementation process of a mesh network based on ZigBee technology in order to capture environmental parameters. The mesh topology allows the connection of all devices on the network in router mode, which makes it possible to establish an optimal pathway for the receipt and transmission of information without the need for a coordinator that shows them how to proceed. The module responsible for receiving data is called a concentrator and it is empowered to interact also as a router with all of the network devices.

Regarding the electronic design, each node consists of a microcontroller, an XBee module, a temperature sensor and a humidity sensor. The temperature and the humidity sensors are equipped with a circuit that converts the resistance changes and capacitance in voltage signals and frequency respectively.

Two waveguide antennas of the "cantenna" type, and two XBee PRO modules were employed to send and to receive information between the E<sup>3</sup>T building and the civil engineering building. The main function of the "cantennas" is to address and to focus the power transmission of the modules, so that the connection between the two buildings can be possible. Finally, through a user-friendly graphical interface, costumers are able to access to information in a quickly and reliably manner.

---

\* Final Graduate Project investigation modality

\*\* Physical-Mechanical Faculty. Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering School. Director MSc. Jorge Hernando Ramón Suárez. Co-Director Ing. Raúl Hernando Cadena Contreras.

## INTRODUCCIÓN

El mundo de las comunicaciones se ha ido desarrollando a pasos agigantados durante el último siglo, el ser humano en su afán de controlar el entorno que lo rodea se ha puesto en la tarea de hacer que el envío y recepción de información se logre de manera eficiente y en el menor tiempo posible. Partiendo de aquí es de suponer que la carrera por lograr el control de la comunicación a nivel global es cada vez más competitiva y se vuelve estrictamente necesario cumplir a cabalidad los estándares que la sociedad de hoy requiere.

Es de vital importancia recalcar que el costo que conlleva el manejo y control de las comunicaciones a nivel mundial es considerablemente elevado, es por ello que pensando en una notable mejora en el área se creó *ZigBee Alliance*, una asociación abierta sin ánimo de lucro conformada por más de 450 organizaciones a nivel mundial, todas ellas líderes en el desarrollo de nuevas tecnologías, entre las cuales destacan: *Invensys*, *Mitsubishi*, *Honeywell*, *Philips*, *Motorola*, entre otras. Su objetivo principal es el desarrollo e implementación de tecnología inalámbrica de bajo costo, que conecta una amplia gama de dispositivos electrónicos utilizados en entornos industriales, médicos y sobre todo, domóticos.

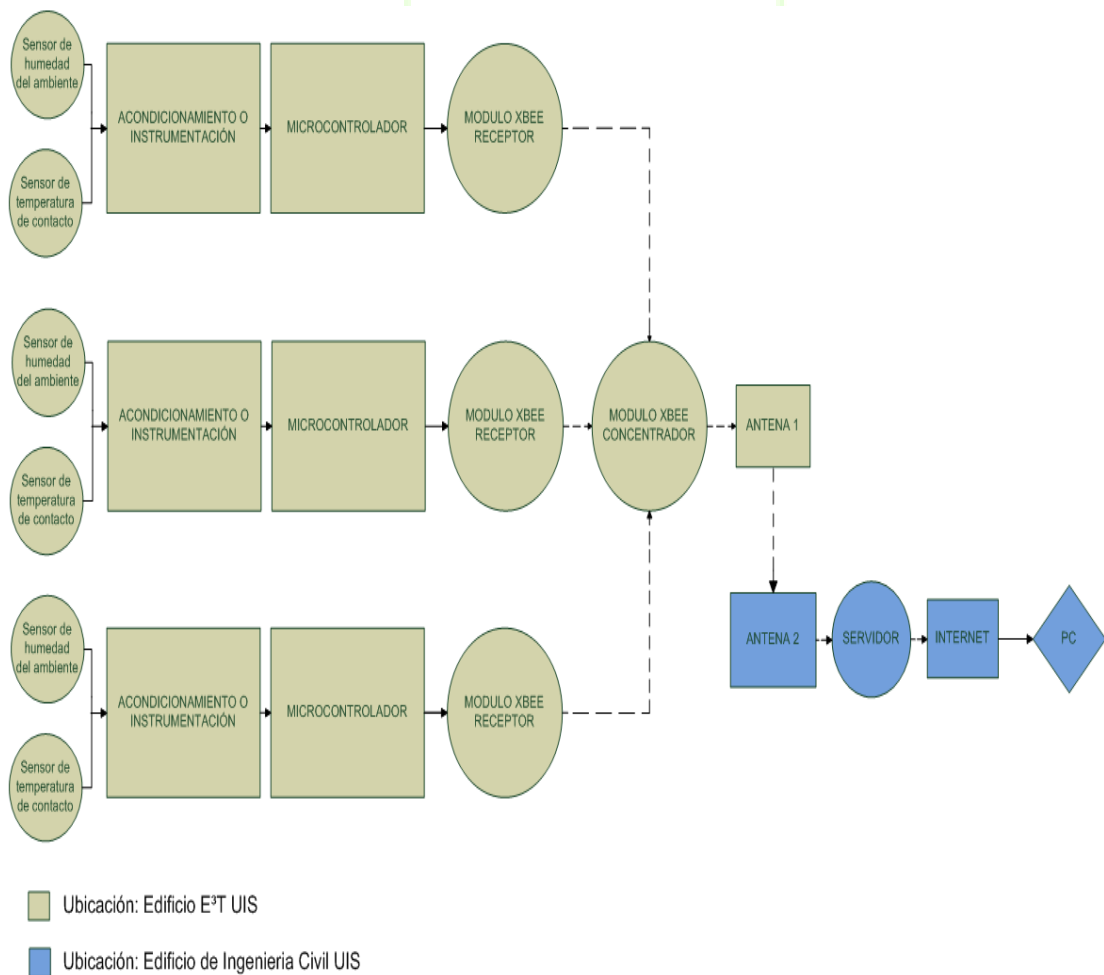
En este proyecto se busca implementar una red de tipo *mesh* basada en el protocolo *ZigBee* que permita la transmisión de datos (parámetros ambientales: temperatura de contacto y humedad del aire), en el edificio de la E<sup>3</sup>T para ser posteriormente visualizados, con el fin monitorear los cambios que se presenten en el medio ambiente y así llevar un control diario de las variaciones observadas para su posterior estudio.

## 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente se observa que la responsabilidad del ser humano se ha encaminado a la búsqueda y contribución en la minimización del daño severo que le ocasiona al medio ambiente. Es notable la existencia de edificaciones artificiales dotadas de tecnología de punta pero que además cuentan con recursos naturales que permiten al ser humano vivir confortablemente y en armonía con la naturaleza, un ejemplo claro es el edificio de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander (E<sup>3</sup>T). Hoy en día, dentro de la edificación se han venido desarrollando proyectos de grado enfocados en el uso de energías verdes y con el objetivo claro de reducir el consumo de potencia eléctrica y utilizar los recursos ambientales con los que se cuenta. Se ha podido evidenciar la falta de monitorización y control de parámetros ambientales (temperatura de contacto y humedad del aire) en el área y a partir de este vacío se ha decidido desarrollar el presente trabajo de grado. Se requiere puntualmente la implementación de un sistema de sensado, lectura e interpretación de datos que permita su posterior envío y recepción mediante una red de comunicación tipo *mesh*. Esta propuesta pretende mostrar por medio de una plataforma parámetros tales como temperatura de contacto y humedad del aire, posibilitando al usuario la observación de lo que está ocurriendo en tiempo real con estas variables y la toma de futuras decisiones. Además se pretende lograr un bajo impacto ambiental en el entorno y el aprovechamiento de los recursos que el mismo edificio provee. A causa de las diversas opciones que existen actualmente en el área de las tecnologías de la información se decidió implementar una solución que hizo posible disponer de la información de parámetros ambientales tales como temperatura de contacto y humedad del aire, en tiempo real. A partir de la monitorización de dichos parámetros es posible tomar decisiones frente a un evento no planeado o imprevisto.

Debido a esto, en este trabajo se diseñó e implementó una red de sensado, encargada de la toma de los parámetros deseados, los cuales fueron captados y transmitidos inalámbricamente mediante dispositivos *ZigBee*, configurados en una red de tres (3) nodos, para ser posteriormente visualizados en un dispositivo electrónico. La Figura 1. muestra el diagrama de bloques del modelo propuesto.

**Figura 1.** Diagrama de bloques funcional del modelo propuesto



## 2. JUSTIFICACIÓN

La mayor parte nuestras vidas se desarrolla dentro de edificaciones, esto hace que se consuma gran cantidad de energía por todas las labores que se realizan diariamente, ocasionando un enorme impacto directo e indirecto sobre el medio ambiente. Los edificios han venido cambiando en su forma de construcción debido a la gran contaminación que ocasiona la construcción de los mismos, es así como las edificaciones verdes tienen impacto positivo en el medio ambiente, presentando un rendimiento energético mucho mayor que los edificios antiguos, reduciendo los costos de operación y ayudando a crear una comunidad sostenible .

La necesidad de medición de parámetros ambientales en este tipo de construcciones lleva a la realización de este proyecto, ya que la nueva estructura del edificio de E<sup>3</sup>T se basa en la minimización del consumo energético.



Universidad  
Industrial de  
Santander

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar una red *mesh* mediante dispositivos *ZigBee* para la toma de parámetros ambientales: temperatura de contacto y humedad del aire.

#### 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Hacer una preselección de los módulos ZigBee que permiten la conexión en topología Mesh.
- Realizar la selección de los sensores que serán empleados para la medición de temperatura de contacto y humedad del aire.
- Implementar tres (3) nodos ZigBee.
- Diseñar un interfaz que permita visualizar los parámetros obtenidos (temperatura de contacto y humedad del aire).
- Elaborar dos (2) antenas “guía-onda” tipo cantenna, encargadas del envío y recepción de los datos entre el edificio de la E<sup>3</sup>T y el edificio de ingeniería civil.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. COMUNICACIONES INALÁMBRICAS

Las redes inalámbricas permiten el acceso remoto a múltiples dispositivos eliminando la estructura cableada y facilitando la instalación de un gran número de elementos en lugares difícilmente accesibles. Conociendo los requisitos de ancho de banda y accesibilidad, es posible la selección de una tecnología específica, acorde a cada necesidad [1]. A continuación se presenta una tabla comparativa de algunas de las tecnologías inalámbricas existentes en la actualidad.

**Tabla 1:** Comparación protocolos inalámbricos comúnmente implementados

	Topología	Consumo energético	Velocidad	Distancia	Aplicaciones	Costo
<b>NFC</b>	P2P	Muy bajo	400 Kbps	<10 cm	Trazabilidad	Bajo
<b>RFID</b>	P2P	Muy bajo	400 Kbps	<3 m	Trazabilidad	Bajo
<b>Bluetooth</b>	P2P	Bajo	700 Kbps	<30 m	Teclados, micrófonos	Bajo
<b>Bluetooth LE</b>	P2P	Muy bajo	1 Mbps	5-10 m	Dispositivos de salud	Bajo
<b>Wifi</b>	Estrella	Medio	11-100 Mbps	4-20 m	Internet	Medio
<b>Z-Wave</b>	Mesh	Muy bajo	40 Kbps	30 m	Sensores hogareños	Bajo
<b>ZigBee</b>	Mesh, estrella, árbol	Muy Bajo	250 Kbps	10-300m	Sensores industriales, sensores hogareños	Medio

Dentro de las tecnologías conocidas, el protocolo *NFC* (*Near Field Communication*), se caracteriza por trabajar como una extensión de *RFID* (*Radio Frequency IDentification*), limitando su rango de alcance a 10 cm. *RFID* soluciona las necesidades de corto alcance entre dispositivos, asegurando un muy bajo consumo eléctrico. Mediante ondas de radio frecuencia, el lector

*RFID* produce corriente eléctrica que permite a los dispositivos cercanos recibirla, activarse e iniciar el envío de información. A pesar de estar limitada debido al consumo energético empleado para establecer una comunicación, es gracias a su alta capacidad de transmisión de datos que la tecnología *Wi-Fi* domina las redes de mediana distancia. Por su parte la antigua “*Bluetooth* clásica” que demanda 2 mW, ha evolucionado en *Bluetooth Low Energy (BLE)*, la cual evita el permanente estado activo de sus dispositivos logrando disminuir radicalmente el consumo eléctrico. Desarrollado con la finalidad de ser empleado en aplicaciones de baja latencia, el protocolo *Z-Wave* fue desarrollado para el ámbito hogareño como apoyo en el control y acceso remoto de iluminación, seguridad, control del clima, apertura de puertas, entre otros. Los requerimientos de baja velocidad y reducido ancho de banda, emplean los protocolos *GSM/GPRS/EDGE*, a pesar de esto, el desarrollo de innovadoras tecnologías como *WCDMA*, *HSPA* o *Long-Term Evolution (LTE)*, permiten el uso de aplicaciones que requieren alta velocidad.

Conociendo algunas de las características generales de los diversos protocolos existentes, es notable la innovación y alto impacto del protocolo *ZigBee*, el cual permite diversas topologías de red, generando una gran ventaja a la hora de implementar soluciones a nivel industrial y del hogar. Además su bajo consumo energético asegura a los usuarios la prolongación en la vida de sus baterías.

#### **4.2. ¿QUÉ ES ZIGBEE?**

*ZigBee* se define como un protocolo de comunicación inalámbrica fundamentado en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (*Wireless personal area network, WPAN*). Utiliza la banda de radiofrecuencia electromagnética *ISM (Industrial, Scientific and Medical)* reservada para usos industriales, científicos y médicos, definida en las

siguientes frecuencias: 2,4 GHz a nivel Mundial (por ser de uso libre no licenciada), 868 MHz en Europa y 915 MHz en Estados Unidos. Debido a la gran cantidad de miembros a nivel mundial con los que cuenta *ZigBee Alliance*, el uso de 2,4 GHz permite ofrecer a los usuarios una diversidad de normas seguras y asequibles en cualquier parte del mundo[2]. Su objetivo son las aplicaciones para redes inalámbricas (*wireless*), que requieran de comunicaciones fiables con baja tasa de envíos de datos y maximización de la vida útil de sus baterías.

Sus velocidades de transmisión son de 20Kbs a 868Mhz (1 canal), 40Kbs a 915Mhz (10 canales) y 250Kbs a 2,4 GHz (16 canales) y permite rangos de alcance desde 10 [m] hasta 1.600 [m] dependiendo de la potencia de transmisión y del entorno. Los dispositivos *ZigBee* cuentan con una dirección única de 64 bits que viene asignada de fábrica y un direccionamiento corto opcional de 16 bits. Debido a esto el número máximo teórico de elementos que puede soportar una red *ZigBee* es de  $2^{16} = 65535$  nodos, que es el número máximo de dirección de red que se pueden asignar, haciendo que sea posible formar redes con miles de dispositivos comunicándose entre sí[3]. Innovando con funciones inteligentes que optimizan la eficiencia, seguridad y comodidad, *ZigBee* ofrece a sus usuarios fiabilidad y confianza a través de una extensa diversidad de productos. Siendo fundamental el control de los entornos en los que se desempeñan diariamente, cada producto tiene como finalidad principal mantener un bajo costo y un menor consumo de energía. Es así como día a día los estándares *ZigBee* han tomado mayor auge en el mercado, llegando a gobiernos, empresas y usuarios industriales. Buscando el seguimiento y control eficaz y sólido de sistemas comerciales, *ZigBee* proporciona productos interoperables dentro de un estándar global, además el sistema le asegura a cada usuario ahorro de energía, menor costo e instalación sencilla de todos sus componentes. [4]

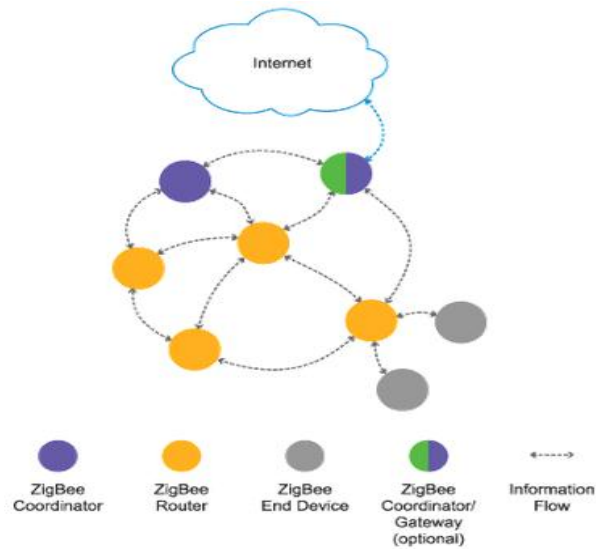
Algunas de las principales características que el protocolo ofrece a los usuarios son:

- Estándares inalámbricos abiertos a nivel global enfocados en el uso de aplicaciones de control, monitoreo y sensado.
- Bajo consumo de potencia, el cual permite que la vida útil de sus baterías se prolongue por varios años, otorgando la característica a sus dispositivos más amabilidad con el medio ambiente.
- Faculta a los usuarios el manejo de un nivel de control más alto mediante la conexión de diferentes tipos de dispositivos en una sola red.
- Hace posible la interconexión de dispositivos mediante una variedad de funciones inteligentes, garantizando su comunicación en cualquier ambiente.

**4.2.1. Especificaciones.** Apoyado por una cadena de suministro profesional y potente, ZigBee Alliance ofrece tres especificaciones en el mercado actual que facilitan la interoperabilidad de sus dispositivos con el ánimo de lograr que cualquier usuario pueda agregar ZigBee a sus productos. [\[5\]](#)

**4.2.1.1. Especificación ZigBee.** Esta especificación se distingue por ser auto-configurable, de bajo costo y mínimo consumo de potencia, incluso admite el uso de baterías portátiles que permiten al dispositivo una particular flexibilidad y movilidad. La especificación ZigBee define una configuración de redes tipo malla (mesh) que garantizan mayor rentabilidad y eficiencia energética.

**Figura 2.** Topología de red para la especificación ZigBee



Fuente: ZigBee Specification Network Topology. Disponible a Septiembre-26-2014 en: <http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBee/NetworkTopology.aspx>

Dos clases de opciones de implementación se establecen en ésta especificación: *ZigBee* (el cual apoya redes más pequeñas con cientos de dispositivos en una sola red) y *ZigBee PRO* (el cual da soporte avanzado a redes más grandes que se componen de miles de dispositivos).

Dentro de los estándares que permite ésta especificación se encuentran:

- *ZigBee Building Automation*
- *ZigBee Health Care*
- *ZigBee Home Automation*
- *ZigBee Light Link*
- *ZigBee Smart Energy*
- *ZigBee Telecom Services*
- Y próximamente *ZigBee Retail Services*.

**4.2.1.1.1. ZigBee Building Automation (Eficiencia comercial de espacios).** Debido a la consolidación de *ZigBee Alliance* y *BACnet (Building Automation and Control Networks)*, a través de redes *ZigBee Building Automation*, se busca transformar los sistemas *BACnet* cableados a sistemas inalámbricos automatizados mediante un único protocolo de comunicación estándar aprobado para lograr la comunicación de dispositivos en red tipo malla (*mesh*). Es así como el control de edificios mediante ésta tecnología hace posible la eliminación del cableado empleado en la conexión de los dispositivos, enlazandolos de forma inalámbrica con el fin de llegar a cualquier área o habitación dentro de la edificación de manera remota, estructurada, innovadora y segura.

**4.2.1.1.2. ZigBee Health Care (Vigilancia de la salud).** *ZigBee Health Care* ofrece enlaces innovadores que permiten mantener una comunicación constante entre los profesionales de la salud y sus pacientes, incluso desde la comodidad de su hogar. Su principal objetivo es el de mantener un registro y control de la salud, brindando mayor independencia a pacientes con enfermedades crónicas y de edad avanzada. Mediante el estándar se pretende ofrecer mayor independencia. Con el fin de controlar y automatizar la entrega y uso de datos de salud, el estándar también establece una interconexión global entre proveedores de servicio, proveedores de cuidado, pagadores y fabricantes de productos médicos.

**4.2.1.1.3. ZigBee Home Automation (Hogares inteligentes).** Buscando optimizar la comodidad, seguridad y gestión de la energía *ZigBee Home Automation* implementa soluciones a nivel global para el manejo de sus productos dentro del hogar, simplificando la instalación y mantenimiento de sus dispositivos. Mediante éstas características se asegura una reducción en los costos de operación y un mejoramiento en la calidad del servicio. Este estándar

permite a los usuarios y sus familias el uso de energía más segura y un entorno más inteligente y eficiente.

**4.2.1.1.4. ZigBee Light Link (Control de iluminación LED).** Mediante conexión inalámbrica *ZigBee Light Link* permite al usuario tener el control de toda la iluminación *LED*, bombillos de luz e interruptores dentro del hogar y la industria. Gracias a este estándar es una realidad el manejo remoto del alumbrado, dando la libertad al usuario desde cambiar la intensidad de la iluminación hasta la gestión del consumo energético. La coordinación de la red para este tipo de estándar no necesita dispositivos especiales, lo cual hace que su uso sea muy sencillo para los consumidores. Su interoperabilidad permite que las redes sean compatibles con otros productos que operan bajo estándares como *ZigBee Home Automation*, *ZigBee Input Device Control remoto ZigBee* y *ZigBee Health Care*.

**4.2.1.1.5. ZigBee Smart Energy (Ahorro de energía en el hogar).** La monitorización, control y automatización en el uso y entrega de energía eléctrica y del agua, se han convertido en procesos ampliamente manejados en el estándar *ZigBee Smart Energy*. Su principal objetivo es el de brindar a los consumidores la mayor cantidad de información posible, la cual permita un mejor manejo de los recursos energéticos con los que se cuenta actualmente en el hogar. Además pretende facilitarle a las empresas de servicios públicos como a los gobiernos la implementación de redes inteligentes seguras, fáciles de instalar y beneficiosas para los usuarios.

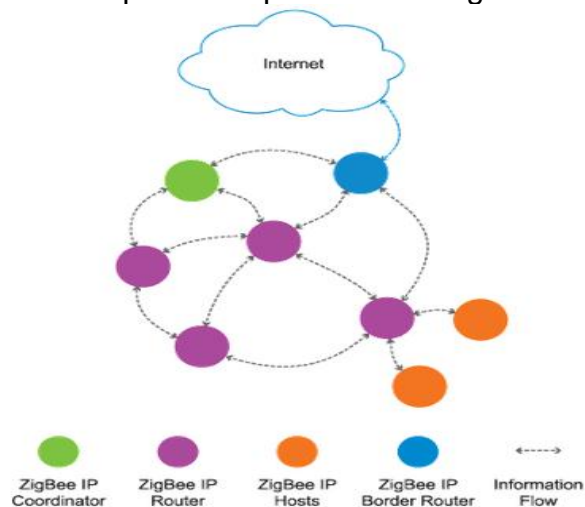
**4.2.1.1.6. ZigBee Telecom Services (Servicios de valor añadido).** *ZigBee Telecom Services* ofrece a operadores de telefonía móvil, minoristas, empresas y gobiernos un estándar global que entrega a los usuarios múltiples funcionalidades como juegos móviles, pagos, publicidad, facturación, control de

acceso a oficinas móviles, servicios de intercambio de datos, entre otros; para ser manejadas desde su teléfono móvil u otros dispositivos electrónicos portátiles.

**4.2.1.1.7. ZigBee Retail Services (Compras más inteligentes).** Debido a la implementación de *ZigBee Retail Services*, los minoristas obtienen una reducción de costos, aumento en la eficiencia y obtención de la información suficiente para conocer los requerimientos de los clientes con el fin de mejorar los servicios que ofrecen. Por otro lado, desde la perspectiva del cliente, el estándar ofrece una mejora en la experiencia de compra en cuanto al control y ahorro de su tiempo y dinero.

**4.2.1.2. Especificación ZigBee IP.** Esta especificación tiene el fin de apoyar el estándar *ZigBee Smart Energy 2. ZigBee IP*, se caracteriza por ser la primera especificación basada en el protocolo IPv6, permitiendo configuraciones de red inalámbrica tipo malla (*mesh*) con docenas de dispositivos conectados en una misma red, con conexiones directas a internet, bajo costo y menor consumo de potencia.

**Figura 3.** Topología de red para la especificación ZigBee IP



Fuente: ZigBee IP Specification Network Topology . Disponible a Septiembre-26-2014 en: <http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBeeIP/NetworkTopology.aspx>

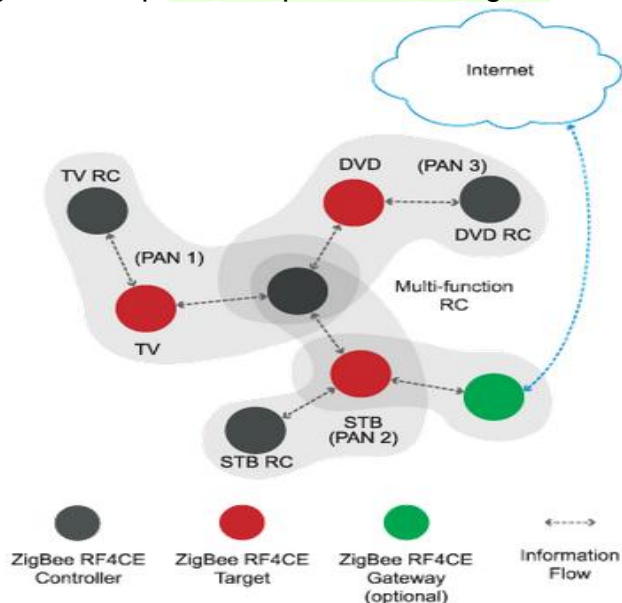
#### 4.2.1.2.1. Smart Energy Profile 2 (Gestión de la energía en el hogar).

Debido al auge en el uso adecuado y gestión de la energía, se presenta *Smart Energy Profile 2*, ofreciendo un estándar de control por IP inalámbrico y cableado. Dentro de las nuevas capacidades que presenta están el control de vehículos eléctricos, de viviendas colectivas y soporte para múltiples interfaces de servicios de energía. *Smart Energy Profile 2* no reemplaza a *ZigBee Smart Energy*, su fin es el de ofrecer una nueva elección para los usuarios en la creación de redes de área local.

#### 4.2.1.3. Especificación ZigBee RF4CE. Mediante topología de red punto a punto

*ZigBee RF4CE* permite el enlace de dispositivo a dispositivo mediante funcionalidades reducidas, requerimientos de tamaño de memoria inferior, bajo costo, implementación sencilla y compatibilidad con estándares empleados por múltiples proveedores de electrónica, ampliando la interoperabilidad de sus productos. Dentro de los estándares permitidos en ésta especificación se encuentran *ZigBee Remote Control* y *ZigBee Input Device*, diseñados con el fin de controlar un gran número de productos para uso dentro del hogar.

**Figura 4.** Topología de red para la especificación ZigBee RF4CE



Fuente: ZigBee RF4CE Network Topology. Disponible a Septiembre-30-2014 en: <http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBeeRF4CE/NetworkTopology.aspx>

**4.2.1.3.1. ZigBee Remote Control (Control remoto avanzado).** Innovando en el área del control remoto RF, *ZigBee Remote Control* ofrece un estándar global que permite el envío y recepción de la información mediante topología de red punto a punto sustituyendo la tecnología infrarroja, eliminando las restricciones de línea de vista, proporcionando un rango de alcance muy superior y un menor consumo de energía. Al ser interoperable, permite su implementación en un gran número de equipos electrónicos como televisión de última tecnología, teatros en casa, decodificadores, entre otros.

**4.2.1.3.2. ZigBee Input Device (Fácil uso de pantallas táctiles, mice y teclados).** Creado para ampliar sus funciones especiales, mejorar su rendimiento y facilitar el uso de ratones, teclados, pantallas táctiles y otros dispositivos de entrada que usan los computadores y diferentes dispositivos de electrónica de consumo, *ZigBee Input Device* sobresale en el mercado como un estándar global innovador, que da mayor libertad al usuario al ampliar el rango de operación de sus dispositivos.

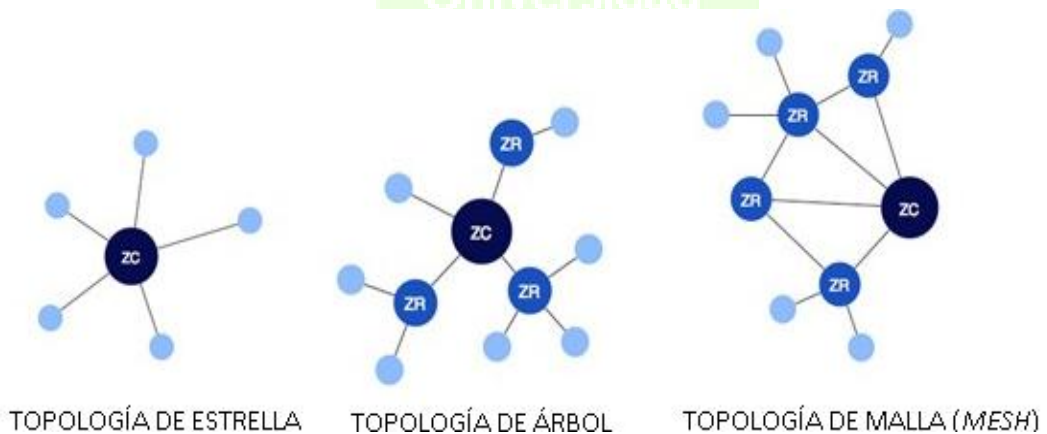
**4.2.2. TOPOLOGÍAS DE RED.** *ZigBee* permite la conexión de dispositivos en tres tipos de topologías: estrella, árbol y malla (*mesh*). En cualquier caso debe existir un nodo de red que desempeña el papel de coordinador central (*ZigBee coordinator, ZC*).

**4.2.2.1. Topología de estrella.** Un dispositivo toma el papel de coordinador de red (*ZigBee coordinator, ZC*) y se asocia con uno o múltiples nodos hijos (*ZigBee end Device, ZED*). Esta topología es de fácil configuración pero tiene un rango de la red limitado por el rango de transmisión del coordinador. [\[6\]](#)

**4.2.2.2. Topología de árbol.** En este tipo topología el coordinador de la red (*ZigBee coordinator, ZC*) establece la red inicial y mantiene los dispositivos en la red, los *routers ZigBee (ZigBee Router, ZR)* se encargan de la formación de las ramas y de la transmisión de los mensajes. Finalmente los dispositivos finales (*ZigBee end Device, ZED*) reciben y envían información directamente de los nodos padre actuando como hojas del árbol sin participar en el enrutamiento de los mensajes.

**4.2.2.3. Topología de malla (mesh).** Topología que permite la interconexión de hasta 65.535 nodos en una sola red. A diferencia de la topología de árbol, en este tipo de conexiones los *routers ZigBee (ZigBee Router, ZR)* pueden comunicarse entre sí y mediante un algoritmo de enrutamiento utilizan un protocolo de pregunta-respuesta (*request-response*) el cual hace posible la eliminación de rutas no óptimas para la propagación de la información.

**Figura 5:** Topologías de conexión dispositivos ZigBee



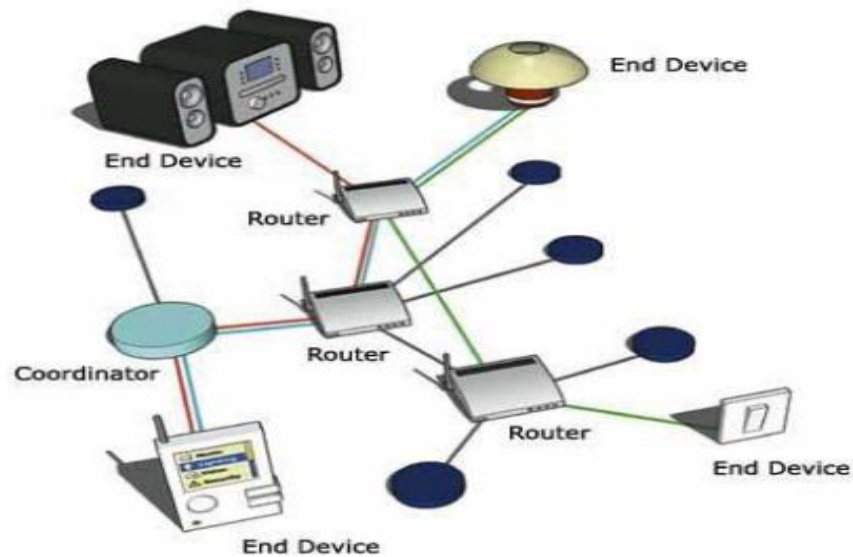
Fuente: National Instruments. Zigbee, Dic-03-2013. Disponible a Ene-30-2014 en: <http://www.ni.com/white-paper/7118/en/>

**4.2.3. TIPOS DE DISPOSITIVOS.** Como resultado de las múltiples aplicaciones en las que se emplea el protocolo, se definen dos diferentes tipos de clasificación de dispositivos: según su papel en la red y según su funcionalidad.

#### **4.2.3.1. Clasificación según su papel en la red**

- ✓ *Coordinador ZigBee (ZigBee coordinator, ZC):* Es el responsable de almacenar la información que transita por la red, actúa como centro de confianza encargado de distribuir claves de cifrado y del control de la red asignando los caminos que debe seguir cada dispositivo para enlazarse entre ellos. Este tipo de dispositivo es el más completo e importante dentro del sistema y se hace indispensable que exista uno por cada red.
- ✓ *Router ZigBee (ZigBee Router, ZR):* Se encarga de la interconexión de dispositivos en la red que se encuentran condicionados en la topología debido a su rango, también brinda un nivel de aplicación para la ejecución de código de usuario.
- ✓ *Dispositivo Final (ZigBee end Device, ZED):* Este dispositivo se comunica solo con el coordinador ZigBee o con el *router* pero no envía datos a otros dispositivos. Dentro de las ventajas que posee se destaca el requerimiento mínimo de memoria que lo hace el dispositivo más económico de la red y debido a que puede estar inactivo la mayor parte del tiempo la vida media de sus baterías se hace más prolongada.

**Figura 6.** Red de dispositivos ZigBee



Fuente: Ignacio Vidri Salgado. ZigBee y sus aplicaciones, 05 de Mayo de 2011. Disponible a Ene-30-2014 en: <http://www.dea.icaei.upco.es/sadot/Comunicaciones/avanzadas/Zigbee%20y%20sus%20aplicaciones.pdf>

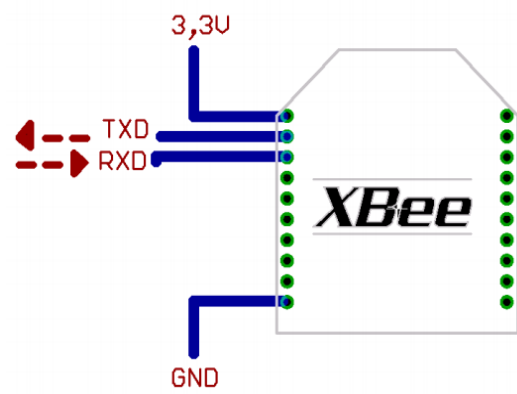
#### 4.2.3.2. Clasificación según su funcionalidad

- ✓ Dispositivo de funcionalidad completa (*Full Function Device, FFD*) : Este tipo de dispositivo no tiene limitaciones de topología, se puede comunicar con cualquier otro dispositivo dentro de la red y posee además memoria adicional y capacidad de computo lo cual le permite funcionar como coordinador o *router ZigBee*. [7]
  
- ✓ Dispositivo de funcionalidad reducida (*Reduced Function Device, RFD*): Este tipo de dispositivo posee limitaciones de topología, capacidad y funcionalidad, no puede actuar como coordinador y sólo puede comunicarse con un coordinador *ZigBee* dentro de la red.

**4.3. MÓDULOS XBEE.** Los módulos XBee son dispositivos que se comunican de forma inalámbrica y permiten la interconexión de miles de

elementos en una sola red, creados por *Digi International* (empresa líder en conectividad), emplean el protocolo de red *ZigBee* (IEEE 802.15.4) [8]. Cada dispositivo debe ser configurado en el modo de operación deseado, sin embargo, las conexiones mínimas que requiere cada módulo para funcionar, se muestran a continuación.

**Figura 7.** Conexiones mínimas requeridas por el módulo XBee

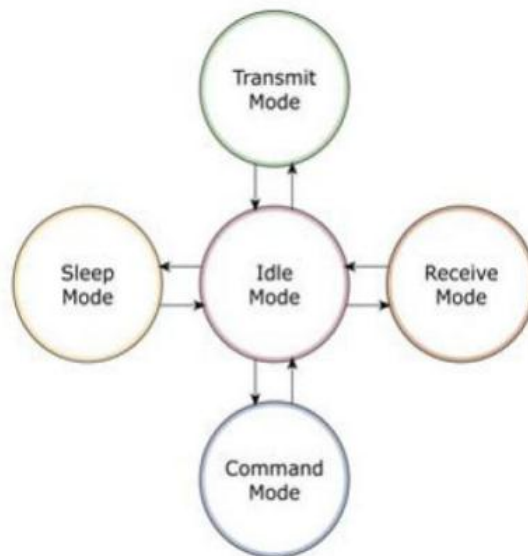


Fuente: Guía del usuario: XBEE Series 1. Disponible a Sep-26-2014 en: [http://www.olimex.cl/pdf/Wireless/ZigBee/XBee-Guia\\_Usuario.pdf](http://www.olimex.cl/pdf/Wireless/ZigBee/XBee-Guia_Usuario.pdf)

La alimentación requerida para su correcta operación está comprendida entre 2,8 [V] y 3,4 [V], es necesaria la conexión a tierra (*GND*) y mediante dos líneas de transmisión de datos por medio del UART (*TXD* y *RXD*) el dispositivo puede comunicarse con un microcontrolador o a través de un convertor de niveles de voltaje adecuado por medio del puerto serial.

**4.3.1. Modos de operación.** Como resultado de su multifuncionalidad, cada módulo *XBee* permite cinco modos de operación:

**Figura 8.** Modos de operación permitidos por los módulos XBee



Fuente: Guía del usuario: XBEE Series 1. Disponible a Sep-26-2014 en: [http://www.olimex.cl/pdf/Wireless/ZigBee/XBee-Guia\\_Usuario.pdf](http://www.olimex.cl/pdf/Wireless/ZigBee/XBee-Guia_Usuario.pdf)

**4.3.1.1. Modo Recibir/Transmitir (Transmit mode/Receive mode).** *En el momento en que al pin 3 (UART Data in) se envía información serial para ser posteriormente transmitida, se activa el modo transmitir (Transmit mode) y cuando el módulo recibe algún paquete RF (Radio frequency) a través de su antena, se activa automáticamente el modo recibir (Receive mode). Si el módulo se encuentra en modo de transmisión (transmit mode), se posibilita al usuario para que la información pueda ser enviada directamente (se envía directamente a la dirección destino) o indirectamente (se retiene un tiempo y se envía cuando es solicitada por la dirección destino). Además en este modo el dispositivo permite dos configuraciones más:*

- *Unicast.* Permite la confirmación en la recepción de la información mediante el envío de un *ACK (acknowledgement, acuse de recibo o asentimiento)* a la dirección de origen. Si la dirección de origen no recibe el código, envía el paquete de datos hasta 3 veces más o hasta recibir la confirmación de recibido.

- *Broadcast*: No existe confirmación en la recepción de datos, un nodo se comunica con todos los nodos de la red.

**4.3.1.2. Modo de bajo consumo (Sleep Mode).** Cuando el dispositivo se encuentra inactivo ingresa a modo de bajo consumo o modo sueño. Para activar este modo el dispositivo debe cumplir alguna de las siguientes condiciones: modo sleep mode ( $SM=1, 2, 3, 4$  o  $5$ ) activado o mediante la activación del pin 9 (*Sleep\_RQ*). Generalmente este modo se encuentra deshabilitado en cada dispositivo ( $SM=0$ ), permitiendo que permanezca en un estado de reposo/recepción en el que se está preparado para responder a un comando por el puerto serial o por la interfaz RF.

**4.3.1.3. Modo de comando (Command mode).** En este modo es posible el ajuste de parámetros como la dirección propia o la dirección destino, la configuración de su modo de operación y la modificación de otros parámetros por medio de comandos *AT*. Es necesario el uso de *Hyperterminal* de *Windows*, algún microcontrolador que maneje *UART* o el programa *X-CTU* para poder ingresar los comandos *AT* al módulo.

**4.3.1.4. Modo Idle (Idle mode).** El dispositivo se encuentra en modo ocioso o modo *IDLE* cuando no se encuentra en ninguno de los modos anteriormente mencionados. En otras palabras, si el módulo no se encuentra transmitiendo, recibiendo, en ahorro de energía o en el modo de comandos, entonces se dice que se encuentra en modo *Idle*.

#### 4.4. ¿QUÉ ES UN SENSOR?

Se le llama sensor a un dispositivo eléctrico o mecánico capacitado para detectar de manera automática variaciones en magnitudes físicas o químicas (temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, movimiento, entre otras), y transformarlas en otras magnitudes, normalmente eléctricas (resistencia, tensión, corriente, frecuencia, entre otras) fáciles de operar, medir y emplear en sistemas de medida o control [9]. A nivel mundial el uso de sensores se ha hecho indispensable en todo tipo de entornos, destacándose su utilización en innumerables procesos industriales. En un escenario más cercano se ha podido observar su uso en la automatización de viviendas, lo cual ha permitido la gestión energética, seguridad, bienestar y comunicación dentro de los hogares de millones de usuarios.

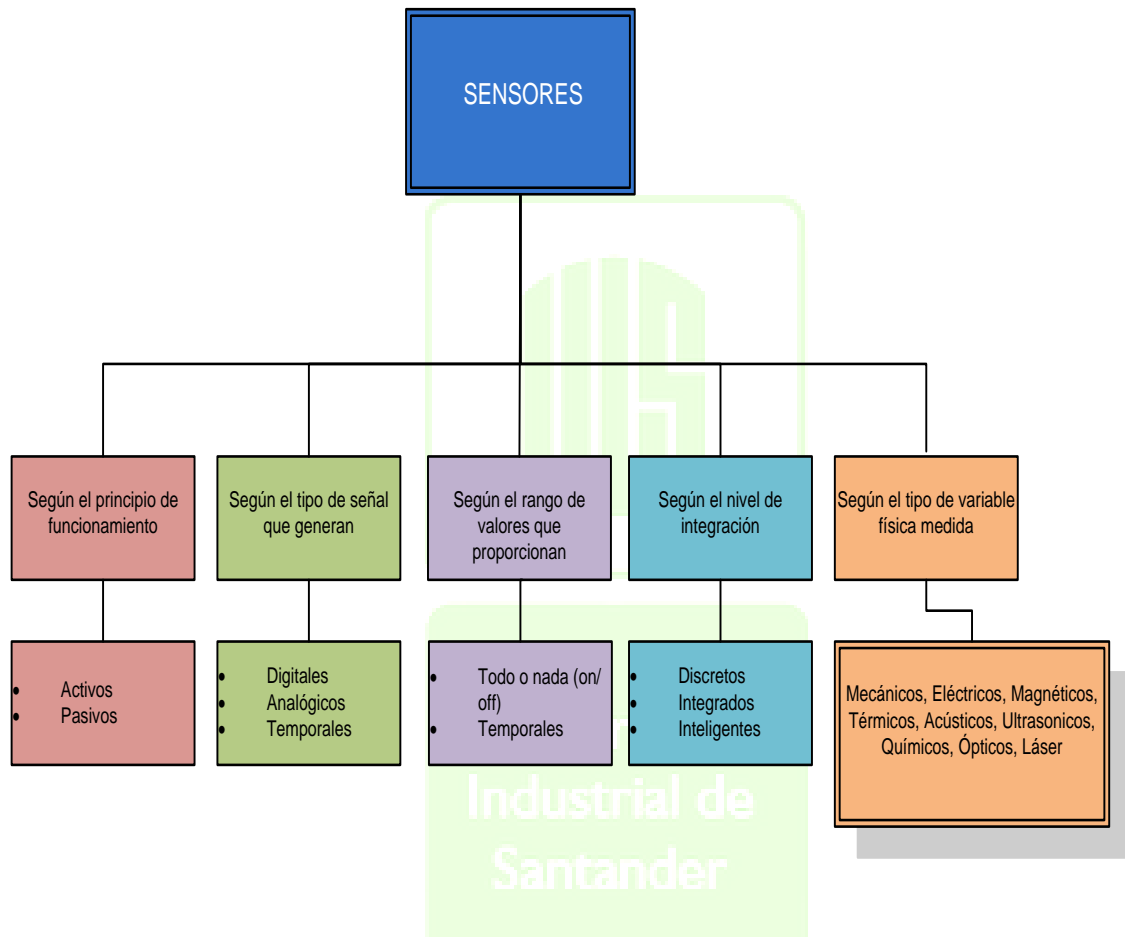
**Figura 9.** Sensores empleados en domótica



Fuente: Sensores en domótica. Disponible a Enero-30-2014 en: <http://www.livemodern.org/teoria-de-la-domotica/sensores-en-domotica/>

**4.4.1. Tipos de sensores.** La gran cantidad de sensores existentes en la actualidad hace complicado realizar una clasificación única en esta clase de dispositivos, a continuación se presenta una agrupación general:

**Figura 10:** Clasificación general de sensores



**4.4.1.1. Temperatura.** La temperatura es una medida de lo caliente y fría que este cierta sustancia[10]. La temperatura define el comportamiento de los objetos en el medio ambiente normal, o en un medio controlado o acondicionado para un resultado específico. El monitoreo de la temperatura es esencial en varios campos de la ingeniería, en procesos industriales y en la mayoría de las actividades diarias que desarrolla el ser humano, ya que muchas propiedades de los materiales dependen directamente de la temperatura a la que se encuentran para conservar su estado natural.

**4.4.1.1.1. Sensores térmicos.** Son dispositivos que transforman los cambios de temperatura en señales eléctricas, son utilizados a la hora de medir la temperatura del aire o la temperatura superficial de líquidos y sólidos. En la actualidad existen tres tipos de sensores térmicos de uso frecuente en la industria: termistores, RTD's y termocuplas [11].

**Tabla 2:** Ventajas y desventajas de sensores térmicos: termocupla, RTD y termistor

Sensor	Ventajas	Desventajas
<b>Termocupla</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No presenta problemas con la resistencia eléctrica del cable conductor</li> <li>• Respuesta rápida</li> <li>• Bajo precio</li> <li>• Opera a altas temperaturas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No lineal</li> <li>• Bajo voltaje</li> <li>• Baja estabilidad</li> <li>• Poca sensibilidad</li> </ul>
<b>RTD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Más estable y precisa</li> <li>• Relación entre temperatura y resistencia más lineal</li> <li>• Margen de temperatura amplio</li> <li>• Alta resistividad</li> <li>• Velocidad de respuesta alta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto costo</li> <li>• Requiere fuentes de alimentación</li> <li>• Tiempo de respuesta lento</li> <li>• Baja sensibilidad para pequeños cambios de temperatura</li> </ul>
<b>Termistor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto rendimiento</li> <li>• Elevada sensibilidad a variaciones de temperatura</li> <li>• Resistencia elevada</li> <li>• Conexión bifilar</li> <li>• Velocidad de respuesta alta</li> <li>• Alta precisión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No lineal</li> <li>• Rango limitado</li> <li>• Frágil</li> <li>• Requiere fuentes de alimentación</li> <li>• Baja estabilidad</li> <li>• Baja exactitud</li> </ul>

Fuente: Medidas prácticas de temperatura. Disponible a Octubre 04-2014 en: <http://lcr.uns.edu.ar/electronica/eya/2008/Medidas%20pr%C3%A1cticas%20de%20temperatura.pdf>

- **Termistores:** Es un resistor sensible térmicamente, es decir, su resistencia terminal se encuentra relacionada con el cambio de temperatura de su cuerpo. Los termistores son semiconductores electrónicos con un coeficiente de temperatura positivo denominado *PTC* (*Positive Temperature Coefficient*), por el contrario, si es negativo se denominan *NTC* (*Negative Temperature Coefficient*), son fabricados con óxidos de níquel, magnesio y hierro. Existen lineales y no lineales, los primeros varían por cada grado de cambio de temperatura, los otros tienen distintos rangos de temperatura y operan con corriente directa [12].

- **Termocuplas:** Su funcionamiento se basa en la generación de una corriente eléctrica producida por un par de alambres de distinto material unidos en un extremo.

- **Detectores de temperatura resistivos (RTD's):** La resistencia eléctrica que presentan varios materiales cambia con la temperatura, este es el fundamento de las RTD: la variación de la resistencia a cambios de temperatura del medio. Los detectores más comunes son los de cobre, níquel o platino. El platino es muy utilizado en la construcción de las RTD ya que es un elemento preciso, lineal y estable que presenta mejores variaciones a altas temperaturas. En la siguiente tabla se muestran algunas características de los materiales que son utilizados en la construcción de los sensores RTD.

**Tabla 3:** Comparativa entre los metales empleados en la construcción de RTD's

Metal	Resistividad [ $\mu\Omega/cm$ ]	Coefficiente de $t^2$	Intervalo útil de temperatura [ $^{\circ}C$ ]	Resistencia a $0^{\circ}C$ [ $\Omega$ ]	Precisión [ $^{\circ}C$ ]	Ventajas	Desventajas
Platino	9,83	0,0003850	-200 a 950	25-100-130	0,010	Mayor intervalo mejor estabilidad y buena linealidad	Costo
Cobre	1,56	0,00425	-200 a 120	10	0,10	Buena Linealidad	Baja resistividad
Níquel	6,38	0,0063 a 0,0066	-15 a 300	100	0,50	Bajo costo, alta sensibilidad	Falta de linealidad, variaciones coeficiente de resistencia

Fuente: Pallas Ramón (2005) Sensores Acondicionadores de señal 4<sup>a</sup> edición, pág. 70.

**4.4.1.2. Humedad.** El término humedad hace referencia a la cantidad de agua que contiene un cuerpo o al vapor existente en la atmósfera [13].

- **Humedad Del Aire:** Es la cantidad de vapor de agua en el aire. La humedad es un fenómeno natural, que se presenta a nivel molecular; el aire tiene la capacidad para absorber vapor de agua; dicho vapor de agua se debe a la evaporación que se produce sobre las extensiones de agua y sobre la superficie de la tierra. Esta humedad se puede medir de forma absoluta o de forma relativa:

✓ **Humedad Relativa:** Es la cantidad de agua que contiene un gas expresado en un porcentaje de la cantidad que el gas tendría en estado de saturación, a la misma temperatura y presión absoluta [14].

✓ **Humedad Absoluta:** Es la cantidad de vapor de agua presente en el aire. La cantidad de agua que el aire contendrá depende de la temperatura que tenga el aire. El aire a temperatura superior puede almacenar más humedad que a temperatura inferior.

**4.4.1.2.1. Sensores de humedad.** Se caracterizan por ser dispositivos encargados de medir directamente el contenido de agua presente en gases o sólidos en un área determinada. La detección de humedad es muy importante en un sistema si este debe desenvolverse en entornos desconocidos y que podrían ocasionar el daño de los circuitos electrónicos e influir en el funcionamiento de procesos industriales, agrícolas etc [15]. En una clasificación general se definen dos tipos de sensores de humedad: digitales y analógicos.

- **Sensor digital de humedad:** Su operación se basa en el uso de un micro sensor que se referencia a la humedad de la zona dada. Presenta un sistema a base de electrodos con polímeros que reemplazan la capacitancia del sensor.
- **Sensor analógico de humedad:** Determina la humedad relativa usando un sistema basado en un condensador. Está fabricado con una película de vidrio o cerámica, el material aislante que absorbe el agua está constituido por un polímero que toma y libera el agua teniendo como

punto de referencia la humedad relativa de la zona dada, lo que produce un cambio en el nivel de carga del condensador.

Para medir cambios de humedad y obtener información de la misma existen diversos tipos de sensores, entre los que se encuentran: sensores capacitivos, sensores por conductividad, sensores resistivos. Todos estos sensores emplean un principio de medición, el cual se basa en el cambio de alguna característica física de los materiales [\[16\]](#).

- **Sensores resistivos:** Están compuestos sobre una delgada tableta de resina (polímero), capaz de absorber agua y sobre la cual se han impreso dos contactos entrelazados de material conductor metálico o de carbón. Es apropiado para intervalos altos de humedad.

- **Sensores de humedad por conductividad:** Estos sensores basan su funcionamiento en medir la humedad absoluta cuantificando la diferencia entre la conductividad en un material seco y un material que contiene vapor de agua del aire. Estos sensores son poco robustos y requieren mantenimiento frecuente para limpiar los materiales implicados en la medición y así evitar mediciones imprecisas.

- **Sensores capacitivos:** Son los más difundidos en la industria y en el área meteorológica pues son de fácil producción, bajo costo y alta fidelidad. Los sensores de humedad capacitivos están formados por un substrato en el cual una fina capa de polímero u óxido de metal se deposita entre dos electrodos conductores. La superficie sensible es cubierta con un electrodo poroso metálico para protegerlo de la contaminación que existe en el ambiente que se encuentra. El substrato puede ser de cristal, cerámico o de silicio. El

cambio de la constante dieléctrica del sensor de humedad capacitivo es directamente proporcional a la humedad relativa del ambiente en que se encuentra. Las principales ventajas de los sensores de humedad capacitivos son su aproximación lineal, su amplio espectro de medida y su estabilidad a largo plazo.

#### 4.5. ANTENAS

Según el *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) una antena es “aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas” (IEEE Std. 145-1983) [\[17\]](#). También puede definirse como un circuito eléctrico especial diseñado para transmitir o recibir energía electromagnética en el espacio. Las antenas se caracterizan por ser un medio de transición que permite que ondas electromagnéticas se conviertan en ondas en el espacio libre o que ondas en el espacio libre se conviertan en ondas electromagnéticas. Su alcance depende de la potencia de transmisión del dispositivo así como también del tipo de antena.

**4.5.1. Tipos de antenas.** Las principales características de toda onda son su frecuencia ( $f$ ) y su longitud de onda ( $\lambda$ ), las cuales se relacionan con la velocidad de propagación en el medio, que en antenas posee propiedades de vacío ( $c=3*10^8$  m/s) y se define como  $c = \lambda f$ . La banda de frecuencia con que se trabaja define las características y el tipo de antena, dando origen a la gran variedad de antenas existentes en la actualidad.

**Tabla 4:** Bandas de frecuencia

BANDA	FRECUENCIA (f)	LONGITUD DE ONDA ( $\lambda$ )	DENOMINACIÓN	SERVICIOS
ELF	< 3 kHz	< > 100 km	Extremely Low Frequency	Conducción de electricidad
VLF	3 – 30 kHz	100 – 10 km	Very Low Frequency	
LF	30 – 300 kHz	10 – 1 km	Low Frequency	Conducción de electricidad, navegación marítima, control de tráfico aéreo
MF	0,3 – 3 MHz	1000 – 100 m	Medium Frequency	Radio AM
HF	3 – 30 MHz	100 – 10 m	High Frequency	Radio SW
VHF	30 -300 MHz	10 – 1 m	Very High Frequency	Radio FM, TV, radio dos vías
UHF	0,3 – 3 GHz	100 – 10 cm	Ultra High Frequency	TV UHF, telefonía celular, WLL (Wireless Local Loop), comunicaciones móviles
SHF	3 – 30 GHz	10 – 1 cm	Super High Frequency	Servicios por satélite y microondas, MMDS (Multichannel Multipoint Distribution Services), LMDS (Local Multipoint Distribution Service)
EHF	30 – 300 GHz	1 – 0,1 cm	Extremely High Frequency	Radio-astronomía, sistemas de radar de alta resolución

Fuente: Teoría de antenas. Disponible a Octubre 16-2014 en: [http://www.salleurl.edu/semipresencial/ebooks/ebooks/ebook\\_teoría\\_antenas.pdf](http://www.salleurl.edu/semipresencial/ebooks/ebooks/ebook_teoría_antenas.pdf)

A partir de su patrón de radiación las antenas se pueden clasificar como: direccionales, bidireccionales u omnidireccionales.

- **Antenas omnidireccionales:** son antenas que irradian en todas las direcciones del plano de manera uniforme haciendo posible el envío de la información independientemente del punto en el que se encuentre el receptor ya que envían la información teóricamente en 360 grados. Dentro de este tipo de antenas se encuentran:

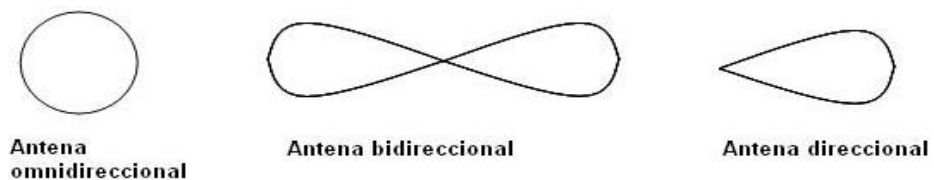
- ✓ Monopolo vertical
- ✓ Dipolo

- **Antenas bidireccionales y direccionales:** se caracterizan por concentrar la mayor parte de la energía radiada de manera localizada, son las mejores en una conexión Punto-a-Punto. Dentro de este tipo de antenas se encuentran:

- ✓ Yagi
- ✓ Parabólica
- ✓ Infrarroja
- ✓ Antena de panel
- ✓ Helicoidal
- ✓ Guía-onda



**Figura 11.** Diagrama de radiación: antena omnidireccional, bidireccional y direccional



Fuente: FLICKENGER Rob, Wireless networking in the developing world, February 2013

**4.5.1.1. Antenas “guía-onda”.** Una antena “guía-onda” es un tipo de línea de transmisión formada generalmente por un tubo metálico conductor, a través del cual se propaga energía electromagnética mediante un solo conductor [18]. Existen antenas de sección rectangular, circular, elípticas y flexibles en las que la energía electromagnética viaja a través de la guía y es limitada por sus fronteras.

**4.5.1.2. Cantenna.** Antena unidireccional de sencilla y rápida construcción. Mediante este tipo de antena es posible transmitir y recibir señales presentes en una frecuencia específica para la cual se diseñan [19].

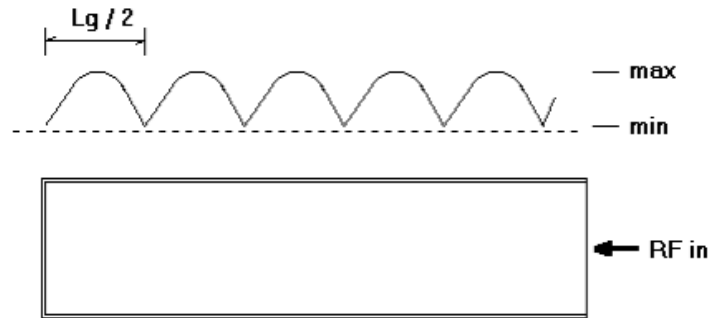
**Figura 12.** Antena “guía-onda” tipo cantenna.



Fuente: Guía de onda USB. Disponible a Enero-30-2014 en: [http://www.zero13wireless.net/foro/showthread.php?2581-Guia-de-Onda-USB-\(-Tarjeta-USB-Tubo-Tipo-Pringles-\).](http://www.zero13wireless.net/foro/showthread.php?2581-Guia-de-Onda-USB-(-Tarjeta-USB-Tubo-Tipo-Pringles-).)

Su principio de funcionamiento se basa en la concentración de señales dentro de un tubo metálico, el cual tiene un extremo sellado. La señal entra en el tubo, se refleja en el fondo, la intersección de las señales entrantes y salientes forman una onda conocida como "onda estacionaria" [20].

**Figura 13.** Onda estacionaria



Fuente: Atis Tirma. Brico wifi I, Antena Pringles (Cantena), Julio 17 2001. Disponible a Mayo-12-2014 en: [http://www.zero13wireless.net/wireless/Antenas/Antena\\_Pringles\\_Cantenna/Manual\\_paso\\_a\\_paso\\_Antena\\_Pringles.pdf](http://www.zero13wireless.net/wireless/Antenas/Antena_Pringles_Cantenna/Manual_paso_a_paso_Antena_Pringles.pdf).

### Notas preliminares [\[21\]](#)

En primer lugar ha de aclararse que dentro de la lata que funciona como guía de ondas se diferenciarán tres tipos de ondas:

- **$L_c$** : Longitud de onda del extremo más bajo de la frecuencia, que depende del diámetro de la lata guía.

$$L_c = 1.706 * D \quad (1)$$

- **$L_o$** : Longitud de onda en el vacío ( $c=300.000$  km/s)

$$L_o = \frac{c}{f} \quad (2)$$

- **$L_g$** : Longitud de onda de la onda estacionaria dentro de la lata, la cual depende de  $L_c$  y  $L_o$ .

La onda que se propaga a lo largo de la lata posee unos valores máximos y mínimos cada cierto intervalo. Cuando la onda choca con el fondo de la lata, el valor de su mínimo se hace 0 (lo cual ocurre cada  $L_g/2$ ), y alcanza su primer máximo a  $L_g/4$  del fondo (ésta es la posición ideal para ubicar el elemento

activo), la altura de la lata se determina a partir del próximo máximo que alcanza la onda, el cual estará distanciado  $3/4Lg$  del fondo [22].

Es de vital importancia aclarar que la lata limita la longitud de onda  $Lc$  actuando como un filtro pasa-alto (*High Pass*). Los inversos de  $Lo$ ,  $Lc$  y  $Lg$  forman un triángulo-rectángulo al cual se le aplica el teorema de Pitágoras:

$$\left(\frac{1}{Lo}\right)^2 = \left(\frac{1}{Lc}\right)^2 + \left(\frac{1}{Lg}\right)^2 \quad (3)$$

**4.5.2. Parámetros de antenas.** Los sistemas de comunicaciones utilizan antenas para intercambiar información entre sí sin necesidad de cables para transmitir. Los parámetros de la antena permiten establecer el funcionamiento de la misma, a continuación se presentan algunos de los parámetros primordiales para establecer el compartimiento de una antena [23].

**4.5.2.1. Impedancia de entrada ( $Z_A$ ).** En antenas, la impedancia se refiere a la tensión y la corriente presente en el puerto de entrada de la misma. Se expresa en números complejos, con una parte real que equivale a la resistencia de entrada y una parte compleja que equivale a la reactancia de entrada. Las antenas y sus líneas de transmisión generalmente están diseñadas para una impedancia de 50  $[\Omega]$ .

$$Z_A = R_{(w)} + jX_{(w)} \quad (4)$$

**4.5.2.2. Coeficiente de reflexión ( $\Gamma$ ).** Determina la relación entre la señal de la onda incidente y la señal de la onda reflejada y su cociente varía entre -1 y +1. Si este cociente coincide con la línea de transmisión en circuito abierto su valor es 1, si coincide con la línea de transmisión en corto circuito su valor es -1 y si no existe reflexión alguna su valor es 0 (lo cual sucede en condiciones óptimas)

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (5)$$

Magnitud  $\rho = |\Gamma|$  (6)

Donde:

$Z_L$ = impedancia de carga al final de la línea.

$Z_0$ = impedancia característica de la línea de transmisión.

**4.5.2.3. Relación de la onda estacionaria (ROE o VSWR).** Es un índice que compara la potencia enviada por la antena y la potencia que es devuelta por la misma. Se expresa como el cociente entre el voltaje máximo de la onda estacionaria sobre el voltaje mínimo.

$$ROE = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{i}n}} = \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \quad (7)$$

Si las ondas incidentes y las reflejadas están en fase, se presentan máximos de voltaje ( $V_{m\acute{a}x}$ ); si por el contrario las ondas incidentes y las ondas reflejadas se encuentran desfasadas 180°, se presentan mínimos de voltaje ( $V_{m\acute{i}n}$ ).

**4.5.2.4. Ancho de banda (BW).** El ancho de banda se encuentra determinado por el rango de frecuencias en los que una antena opera correctamente. Es posible determinar un ancho de banda de acuerdo a la ganancia, la impedancia, la polarización u otros parámetros. Si una antena se encuentra diseñada para operar a una frecuencia determinada, es posible que pueda también pueda operar transmitiendo y recibiendo señales en otras frecuencias.

$$BW = \frac{f_{m\acute{a}x} - f_{m\acute{i}n}}{f_0} \quad (8)$$

**4.5.2.5. Analizador de redes vectorial.** Un analizador de redes es un instrumento capaz de analizar y caracterizar las propiedades de las redes eléctricas, concretamente aquellas relacionadas a la reflexión y transmisión, las cuales son conocidas como parámetros de dispersión (*Scattering Parameters*) [\[24\]](#).

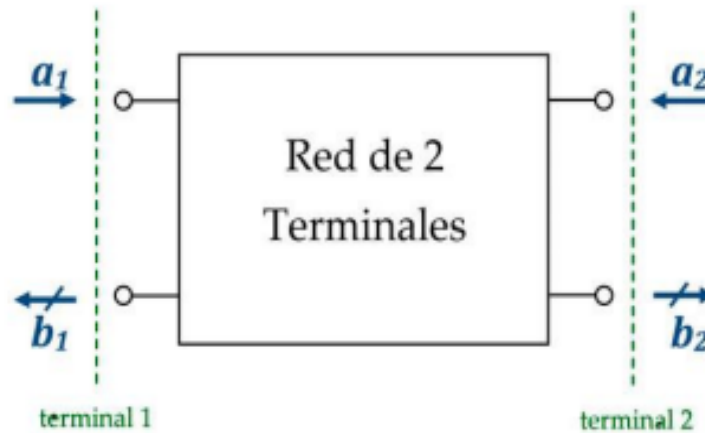
**4.5.2.6. Tipos de diagramas.** Dentro del formato de visualización, el analizador de redes ofrece los siguientes tipos de diagramas:

- Diagramas cartesianos (rectangulares)
- Diagramas polares
- Diagrama de Smith
- Diagrama invertido de Smith

**4.5.2.7. Magnitudes medidas.** Dentro de las magnitudes medidas, el analizador de redes ofrece la caracterización de los siguientes parámetros:

- **Parámetros de dispersión:** Los parámetros de dispersión o parámetros S son las magnitudes de medida básicas del analizador. Son usadas para representar redes de dos puertos en términos de voltajes y corrientes en los puertos de entrada y de salida, describiendo cómo el dispositivo bajo test (*DUT*) modifica la señal que se transmite o se refleja y viceversa. Estos parámetros se basan en los niveles de potencia que se perciben en los terminales de una red de dos puertos y pueden ser utilizados para frecuencias altas y bajas. Una de las ventajas de los parámetros S es que pueden ser planteados para redes de dos o más de dos puertos.

**Figura 14.** Red de dos puertos



Fuente: Diseño de antenas de bocina sobre SIW. Disponible a sept-29-2014 en: <http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20140925LuisRubioMejia.pdf>

A partir de la siguiente ecuación lineal, es posible establecer la matriz de distribución que conecta las ondas incidentes  $a_1$  y  $a_2$  con las ondas de salida  $b_1$  y  $b_2$ :

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Los cuatro parámetros S, para redes de dos puertos se describen de la siguiente manera:

**Tabla 5:** Parámetros s

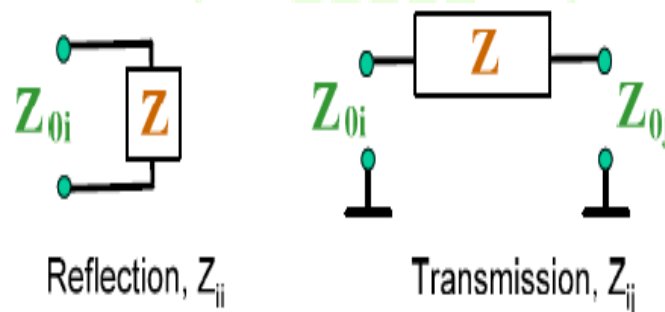
Parámetros S	Nombre	Descripción	Formula
$S_{11}$	Reflexión a la entrada	Potencia que se refleja en el terminal 1(T1) cuando se genera una onda incidente en T1	$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big _{a_2 = 0}$
$S_{12}$	Transmisión o ganancia inversa	Potencia que llega al T1 cuando se alimenta la red por el terminal 2 (T2)	$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \Big _{a_1 = 0}$
$S_{21}$	Transmisión o ganancia directa	Potencia que llega al T2 cuando se alimenta la red por el terminal (T1)	$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \Big _{a_2 = 0}$

<b>S<sub>22</sub></b>	Reflexión a la salida	Potencia que se refleja en el terminal T2 cuando se genera una onda incidente en T2	$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right _{a_1 = 0}$

Fuente: Diseño de antenas de bocina sobre SIW: Disponible a sept-29-2014 en: <http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20140925LuisRubioMejia.pdf>

- **Parámetros de Impedancia:** el valor resultante del cociente complejo entre el voltaje y la corriente determina la impedancia.

Figura 15. Parámetros de impedancia



Fuente: Diseño de antenas de bocina sobre SIW. Disponible a sept-29-2014 en: <http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20140925LuisRubioMejia.pdf>

El analizador de redes vectorial convierte el parámetro-S medido, para hallar la respectiva impedancia convertida. Las impedancias convertidas ( $Z_{ii}$ ) se determinan a partir de los parámetros-S de reflexión ( $S_{ii}$ ) de la siguiente manera:

$$Z_{ii} = Z_{0i} \frac{1 + S_{ii}}{1 - S_{ii}} \quad (10)$$

Los parámetros de transmisión se determinan de acuerdo a:

$$Z_{ij} = 2 \frac{\sqrt{Z_{0i} Z_{0j}}}{S_{ij}} - (Z_{0i} + Z_{0j}), \quad i \neq j \quad (11)$$

- **Parámetros de Admitancia:** Es el cociente complejo de la corriente sobre el voltaje. Cada parámetro de admitancia se obtiene a partir de un parámetro-S.

El analizador convierte un parámetro-S medido para calcular la respectiva admitancia. Los parámetros-Y convertidos no describen redes de puertos generados por n terminales. Las admitancias convertidas ( $Y_{ii}$ ) se calculan a partir de los parámetros-S de reflexión ( $S_{ii}$ ):

$$Y_{ii} = \frac{1}{Z_{0i}} \frac{1 - S_{ii}}{1 + S_{ii}} = 1/Z_{ii} \quad (12)$$

Donde i es el número de puerto del analizador. Por otra parte, los parámetros de transmisión se deducen a partir de:

$$Y_{ij} = \frac{S_{ij}}{2\sqrt{Z_{0i}Z_{0j}} - S_{ij}(Z_{0i} + Z_{0j})} = 1/Z_{ij} \quad i \neq j, \quad i, j = 1, \dots, 99 \quad (13)$$

## 5. ANTECEDENTES

La necesidad creciente de monitorizar variables de procesos industriales y de manejar procesos remotos juega un papel importante en la electrónica moderna; en los siguientes trabajos de investigación se buscó cumplir dicha función a través de la tecnología *ZigBee*.

A continuación se presenta un resumen de tres (3) proyectos de grado desarrollados en la Universidad Industrial de Santander enfocados en el uso de protocolos *ZigBee*:

- Se desarrolló un sistema cliente-servidor que toma las señales sensadas por el Sun Spot (el cual utiliza la tecnología *ZigBee* según la normativa IEEE 802.15.4) para ser transmitidos a un servidor a través de internet donde se relaciona con un GIS (sistema de información geográfica) y así se obtiene información georeferenciada en un chip GPS. Además se desarrolló una versión alternativa constituida por las aplicaciones ASASBEE y CSASBEE con el fin de acceder a la información de los sensores del SUN SPOT y la información de posicionamiento del dispositivo GPS desde cualquier computadora [\[25\]](#).
- Se diseñó un sistema de captura, almacenamiento y análisis de datos obtenidos de una red de sensores mediante tecnología *ZigBee* implementada en un galpón para medir variables de temperatura, radiación solar, intensidad luminosa y humedad relativa. La aplicación cuenta con un interfaz web que permite al usuario acceder a la información capturada desde cualquier lugar a través de internet, la cual utiliza herramientas de libre distribución como MySQL, Php, Ajax y Java [\[26\]](#).
- Se hizo una serie de pruebas de propagación en campo abierto para condiciones de línea de vista sin obstáculos y potencia de transmisión máxima donde se determinó la distancia máxima de transmisión entre dos nodos mediante módulos XBee serie 2 XB24-B. Además se ajustaron los modelos de propagación de Lee, Espacio Libre y Okumura-Hata y se concluyó que el modelo de espacio libre es adecuado para una red de sensores inalámbricos de micro celdas a pesar de no tener en cuenta pérdidas por multitrayectoria [\[27\]](#).

De manera independiente a nivel mundial se han venido desarrollando diversas investigaciones dentro del campo de las comunicaciones inalámbricas, lo cual ha llevado al auge de las aplicaciones que emplean tecnología *ZigBee* en áreas como la domótica, medicina, entre otras. A continuación se presentan algunos proyectos desarrollados en estos entornos:

- El trabajo de investigación realizado por el Centro de Neurociencias de Cuba apuntó a encontrar una forma de sustituir el sistema de medición cableado para el monitoreo de algunos parámetros fisiológicos introduciendo un sistema de red inalámbrica para mejorar la movilidad del paciente y la del personal médico. La transmisión por aire se realiza a través de la tecnología inalámbrica *ZigBee*, la información es recibida por una laptop o PDA en la que se procesan, se visualizan datos y se realizan pruebas de alcance de radio, mediciones de demora de transmisión de paquete y eficiencia en la transmisión [\[28\]](#).
- En la Universidad Autónoma de San Luis en México se realizó un proyecto de grado el cual fue enfocado en el control y análisis de procesos inalámbricos por medio de radio frecuencia. El desarrollo se basa en el protocolo *ZigBee* empleado para el control de nivel de líquidos con un sistema de bombeo, además se realizó un monitoreo y análisis de la presión e impacto en la planta del pie. Estas dos aplicaciones pretenden minimizar la existencia de cables, aumentar la flexibilidad para el usuario y permite trabajar con un menor consumo de energía respecto a la mayoría de los equipos inalámbricos existente en el mercado [\[29\]](#).
- En Perú se desarrolló la tesis de grado “Diseño de un sistema de seguridad basado en una red actuador-sensor *ZigBee* con soporte en la

wlan de un edificio de departamento”, la cual está enfocada a un sistema de seguridad para viviendas usando el protocolo *ZigBee* en la comunicación inalámbrica de los sensores de detección de movimiento, humo y alarmas contra incendios, a su vez estos dispositivos son controlados desde la red local dando como resultado un sistema flexible y escalable, el cual puede ser monitoreado desde un centro de vigilancia [\[30\]](#).

## 6. DESARROLLO DEL TRABAJO

Se propuso desarrollar el trabajo en once (11) etapas, las cuales se llevaron a cabo en determinado orden con el fin de alcanzar los objetivos propuestos inicialmente dentro de los tiempos establecidos.

### 6.1. ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta etapa se realizó la recopilación de información relacionada con protocolos *ZigBee*, dispositivos *XBee*, comunicaciones inalámbricas, tipos de antenas, antenas guía onda, sensores de temperatura y humedad, la cual fue consignada en el marco teórico del presente documento.

### 6.2. ETAPA 2: SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS ZIGBEE

Al momento de diseñar sistemas inalámbricos, nacen diversas opciones para tener en cuenta en lo que respecta al envío y recepción de la información proveniente de la red de sensado. En el pasado la única manera económica

existente era la construcción y calibración de circuitos transmisores y receptores, lo cual implicaba una gran pérdida de tiempo. Hoy en día en el mercado se dispone de una gran variedad de módulos de RF, transmisores y receptores a costos accesibles y facultados para funcionar con otros componentes del sistema. A continuación se presenta una tabla comparativa de algunos de los diferentes módulos disponibles en el mercado y sus principales características:

**Tabla 6:** Comparación módulos ZigBee

Fabricante	MCU	Módulo	Tipo de Antena	en modo de bajo	Corriente TX /RX	Potencia Tx	Sensibilidad	Topología de red	Precio unitario (Dólares)
Anaren	✓	A2530R24A	Chip	1 $\mu$ A	34 mA/25 mA	4 dBm	-90 dBm	Punto a punto, punto a punto, multi punto, mesh	23,1
	✓	A2530R24C	U.FL		130 mA/28 mA	15 dBm	-95 dBm		
	✓	A2530E24A	PCB		106/28 mA	13 dBm	-95 dBm		
	✓	A2530E24C	U.FL						
Atmel	✓	ZigBit 2.4 GHz (ATZB-24-B0)	Chip	< 6 $\mu$ A	18 mA/19 mA	3 dBm	-101 dBm	mesh	72,5
	✓	ZigBit 2.4 GHz (ATZB-24-A2)							
Digi International	✓	Serie 1 XBEE	Chip, PCB, U.FL, RPS MA, Wire	10 $\mu$ A, 50 $\mu$ A	45 mA/50 mA	0 dBm	-92 dBm	Punto a punto, punto a punto, multi punto, estrella, mesh	20,0 - 34,0
	✓	Serie 1 XBEE-PRO			250 mA/55 mA, 340 mA/55 mA, 180 mA/55 mA	18 dBm, 10 dBm	-100 dBm		
	✓	Serie 2 XBEE ZB			40 mA/40 mA	3 dBm	-96 dBm		







	✓	Serie 2 <i>XBEE-PRO</i> <i>ZB</i>		3,5 $\mu$ A	295 mA/45 mA	18 dB m	- 102 dB m	, punto - multi punto , estrel la	
<b>FlexiPanel</b> -	X	EMB- TRX169PA, 169 MHz	U.FL	< 1 $\mu$ A	400mA/ 27mA	27 dB m	- 122 dB m	----- ---	18



FlexiPanel ofrece un módulo RF que no cuenta con un microprocesador, lo cual hace los dispositivos más económicos pero a la vez limitados a la hora de construir una red de comunicaciones, por este motivo se descartó su uso. Anaren por su parte ofrece módulos que pueden operar consumiendo bajas corrientes pero la sensibilidad de sus dispositivos es baja, lo cual limita su capacidad de captar señales a bajas potencias. Con una excelente relación entre corriente consumida y sensibilidad, los módulos ofrecidos por Atmel se presentaron como una buena opción pero su alto precio y baja potencia de transmisión, eliminó la posibilidad de utilizarlos. Finalmente se decidió optar por los módulos ofrecidos por Digi International, los cuales poseen una buena relación entre potencia de transmisión, corriente, sensibilidad y precio. Así mismo permiten diferentes topologías de red en sus dispositivos, lo cual amplía la variedad de aplicaciones en las cuales pueden ser empleados.

Adicionalmente se seleccionaron los dispositivos *XBee* adecuados que permitieran implementar una red de comunicación inalámbrica tipo *mesh* de manera óptima y a un bajo costo [31].

Debido a que *MaxStream* diseña y fabrica un gran número de módulos *XBee* con diferentes tipos de antenas, potencia y capacidades, se decidió evaluar ocho (8) de los dispositivos más populares y preferidos por los usuarios a nivel mundial en la línea *XBee & XBee-PRO DigiMesh 2.4 Embedded RF Modules*.

**Tabla 7:** Comparación módulos XBee

XBee	Tipo de Antena	Banda de frecuencia	Rango (Línea de vista)	Velocidad de transmisión de datos	Sensibilidad	Potencia de salida	Interfaz	Precio unitario (Dólares)
 XB24-DMUIT-250	U.FL	2,4 GHz	300ft (100m)	250 kbps	-92 dBm (6,3 * 10 <sup>-10</sup> mW)	+0 dBm (1 mW)	UART	20,00
 XB24-DMSIT-250	RPSMA	2,4 GHz	300ft (100m)	250 kbps	-92 dBm (6,3 * 10 <sup>-10</sup> mW)	+0 dBm (1 mW)	UART	21,00
 XB24-DMWIT-250	Wire	2,4 GHz	300ft (100m)	250 kbps	-92 dBm (6,3 * 10 <sup>-10</sup> mW)	+0 dBm (1 mW)	UART	19,00
 XB24-DMPIT-250	PCB	2,4 GHz	300ft (100m)	250 kbps	-92 dBm (6,3 * 10 <sup>-10</sup> mW)	+0 dBm (1 mW)	UART	20,00
 XBP24-DMUIT-250	U.FL	2,4 GHz	1 milla (1600 m)	250 kbps	-100 dBm (1 * 10 <sup>-10</sup> mW)	+18 dBm (63 mW)	UART	32,00
 XBP24-DMSIT-250	RPSMA	2,4 GHz	1 milla (1600 m)	250 kbps		+18 dBm (63 mW)	UART	34,00

XBP24-DMSIT-250					-100 dBm (1 * 10 <sup>-10</sup> mW)			
 XBP24-DMWIT-250	Wire	2,4 GHz	1 milla (1600 m)	250 kbps	-100 dBm (1 * 10 <sup>-10</sup> mW)	+18 dBm (63 mW)	UART	32.00
	PCB	2,4 GHz	1 milla (1600 m)	250 kbps	-100 dBm (1 * 10 <sup>-10</sup> mW)	+18 dBm (63 mW)	UART	32.00

Fuente: Instruments. Zigbee, Dic-03-2013. Disponible a Ene-30-2014 en: <http://www.ni.com/white-paper/7118/en/>

Debido a que la red de sensado sería implementada en un espacio abierto (edificio E<sup>3</sup>T) y la distancia entre cada módulo sería inferior a 30 mts, se decidió seleccionar el módulo *XB24-DMWIT-250*, el cual ofreció un precio inferior y rango y velocidad de transmisión de datos apropiados.

En el envío y recepción de datos entre los puntos de enlace (Edificio de la E<sup>3</sup>T UIS y el edificio de Ingeniería Civil UIS) la distancia entre módulos es superior a 30 mts, así que se decidió optar por el módulo *XBP24-DMSIT-250* debido a que el tipo de antena (*RPSMA*) permite un mejor acople entre los módulos y las antenas construidas (*Cantennas*) para este fin, además la potencia de transmisión es muy superior a pesar de que el precio sea mayor en comparación con otros módulos de la línea *XBee-PRO DigiMesh*.

### 6.3. ETAPA 3: SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS DE SENSADO

En esta etapa se escogieron los sensores encargados de capturar los parámetros deseados, a partir de la sensibilidad y el costo de los dispositivos.

**6.3.1. Sensor de temperatura.** La medición en los cambios producidos en la temperatura se realiza con diferentes instrumentos como termopares, circuitos integrados, termo-resistencias (RTD); debido a la gran variedad de sensores de temperatura existentes se deben tener un criterio de selección de acuerdo a la aplicación en la que se va a utilizar. Estos factores son analizados a continuación en una tabla comparativa de algunos de los diferentes tipos de sensores de temperatura existentes.



**Tabla 8:** Comparación de sensores de temperatura: termocupla, RTD, termistor e integrado de silicio

Características	Termocupla	RTD	Termistor	Integrado de silicio
Rango de Temperatura(°C)	-270 a 1800	-250 a 900	-100 a 450	-55 a 150
Sensibilidad	10s de $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0.00385 $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$	Varios $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$	-2mV / ° C
Exactitud	$\pm 0.5$	$\pm 0.01$	$\pm 0.1$	$\pm 1$
Linealidad	Moderada	Lineal	No es lineal	Moderada
Generalidades	Los alambres largos hace que este sensor sea robusto	Son susceptible a los daños como consecuencia de las vibraciones.	No se ven afectados por las vibraciones. Vienen en variedad de formas.	Muy resistentes
Estabilidad	Mala	Excelente	Moderada	Moderada
Forma de salida	Voltaje	Resistencia	Resistencia	Voltaje, corriente o digital
Excitación	No requiere	Fuente de corriente	Fuente de voltaje	Voltaje de alimentación
Precio unitario	1 - 50	5 - 1000	2 - 10	1 -10

(Dólares)

Fuente: Microchip, Tecnología en la detección de temperatura. Disponible a Septiembre 04-2014 <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00679a.pdf>

- La termocupla posee un intervalo de medición muy grande para procesos de intervalos pequeños, lo cual provoca que las mediciones se vuelvan burdas.
- El Termistor presenta como principal inconveniente la no linealidad.
- Los integrados de silicio consumen mucha corriente y su linealidad y estabilidad son moderadas.
- La RTD presenta mayor estabilidad y linealidad, lo cual constituye una de las principales razones de selección para la medición de temperatura.

Dentro de los materiales con los que se fabrican las RTD's se encuentran el cobre, el níquel y el platino, siendo éste último el que presenta mayor resistividad, lo cual permite que tenga una sonda de valor óhmico suficientemente alto para permitir el empleo de hilos de conexión largos y a la vez poca masa que le permite tener una respuesta térmica rápida [32].

**Tabla 9:** Comparación RTD's.

Referencia	Marca	Rango de medición de temperatura	Autocalentamiento	Corriente (mA)	Precio Unitario (Dólares)
<b>PT100 WZP-02</b>	Feilong Shanghai	-200°C a 450 °C	15 mW/°C	1	6,7
<b>HRTS-5760-B-U-1-12</b>	Honeywell	-200°C a 260°C	<0,3 mW/°C	1	36,29
<b>M1020 Pt 100 ClassB</b>	Heraeus Sensor Technology	-70°C a 500°C	<0,2 mW/°C	1	7,14
<b>TD4A</b>	Honeywell	- 40 C a	3.5 mW/°C	1	31,12

		+ 150 C			
--	--	---------	--	--	--

La PT100 es uno de los sensores más utilizados en ambientes industriales, es una RTD que consta de un alambre de platino que opera bajo el principio del cambio de la resistencia eléctrica como función de la temperatura.

Este sensor se seleccionó debido que presentaba un mayor margen de medición de temperatura, menor precio y por ser uno de los sensores más comunes.

**6.3.2. Sensor de Humedad.** Para determinar el tipo de sensor de humedad del aire se estudiaron las diferentes características de tres sensores de humedad: Resistivos, Conductivos y Capacitivos.

- Los sensores resistivos de humedad presentan el inconveniente de entregar una respuesta no lineal frente a cambios de humedad relativa, además requieren de circuitos adicionales para su linealización, aumentando el costo y tamaño de la pcb.
- Los sensores conductivos no resultan los más adecuados para este proyecto debido a que su medición se ve afectada por el estado de los materiales además requieren de mantenimiento constante.
- Las principales ventajas de los sensores de humedad capacitivos son su aproximación casi lineal en un margen de humedades (0-100%), su amplio espectro de medida y su estabilidad a largo plazo, estas características lo hicieron llamativo al momento de su pre-selección [\[33\]](#)

**Tabla 10:** Comparación sensores de humedad del aire (capacitivos)

<b>Sensores</b>	<b>Rango Medida (RH)</b>	<b>Tiempo de respuesta [s]</b>	<b>Precisión (RH)</b>	<b>Precio unitario (Dólares)</b>
<b>HS1101</b>	1% - 99%	5	2%	6,84
<b>CHS-MSS</b>	20% - 85 %	60	5 %	24,40
<b>HIH-4000</b>	0 % - 100 %	50	3.5%	27,73
<b>HIH-4602-C</b>	0% - 100%	50	3.5%	76,78
<b>HIH6131-021-001</b>	0 % - 100%	10	4 %	25,17
<b>HIH-5030-01</b>	11% - 89 %	5	4%	7,88

El sensor que se escogió fue el sensor capacitivo HS1101 elaborado por la compañía HUMIREL, con un rango de medida de humedad 1%- 99% RH, tiempo de respuesta rápido (5 segundos) , alta fiabilidad, bajo precio y amplio uso en el entorno industrial.

#### **6.4. ETAPA 4: DISEÑO ELECTRÓNICO**

Se diseñaron la etapa de administración de energía y las etapas de instrumentación de cada sensor encargadas de convertir las señales a voltaje y frecuencia correspondiente, de manera que fuesen fácilmente procesadas por el microcontrolador. Además se desarrollaron los diseños de los circuitos impresos de cada etapa sensora, del módulo principal encargado de interconectar dichas etapas al microcontrolador y la XBee XB24-DMWIT-250, y del módulo de conexión entre la *cantenna* y la XBee XBP24-DMSIT-250, la cual permitirá el envío y recepción de información entre el edificio de la E<sup>3</sup>T UIS y el de ingeniería civil UIS. (Para observar los diseños y esquemáticos de las tarjetas ver anexo A)

**6.4.1. Etapa de administración de energía.** Las baterías son un dispositivo que puede convertir la energía química almacenada en electricidad, que consiste en una celda o más celdas electroquímicas. Existen dos tipos de

baterías: las no recargables, llamadas primarias y las secundarias que se caracterizan por ser recargables. El número de ciclos descarga que una pila puede soportar depende del tipo y tamaño de la pila y de las condiciones de funcionamiento.

- **Batería de Plomo (Pb):** Es un tipo de batería acumuladora, está constituida por electrodos de plomo, fue la primera batería recargable para uso comercial, su desventaja es el tiempo de carga habitual dura de 8 horas a 16 horas. [\[34\]](#)

- **Batería de Níquel-Cadmio (Ni-Cd):** Es una batería recargable de uso doméstico e industrial, caracterizadas por su larga vida en funcionamiento cíclico, sus buenos resultados a bajas temperatura, su solidez y seguridad. Su principal desventaja es el uso de Cadmio, el cual es un metal con características tóxicas para el ser humano.

- **Batería de Polímero de Litio (Li-Po):** Las baterías de litio son baterías recargables, con mayor capacidad de carga respecto a las baterías de Plomo (Pb) y Níquel-Cadmio (Ni-Ca) y se encuentran en dispositivos electrónicos del entorno doméstico e industrial. Las baterías LiPo consisten en una delgada membrana de litio, un electrolítico de polímero y un electrodo de membrana positivo compuesto por óxido de vanadio [\[35\]](#). Vienen generalmente de 1S a 4S lo que significa:

Li-PO 1S: una celda, 3,7 V.

Li-PO 2S: dos celdas, 7,4 V.

Li-PO 3S: tres celdas, 11,1 V.

Li-PO 4S: cuatro celdas, 14,8 V.

**Tabla 11:** Comparación baterías

Tipo	Energía/Peso	Tension por elemento(v)	Duracion Numero de recargas	Tiempo de carga(horas)	Auto-descarga.
<b>Plomo</b>	30-50	2	1000	8-16	5%
<b>Ni-Cd</b>	48-80	1,25	500	10-14	30%
<b>Ni-Mh</b>	60-120	1,25	1000	2-4	20%
<b>Li-Ion</b>	110-160	3,16	4000	2-4	25%
<b>Li-Po</b>	100-130	3,7	5000	1-1,5	10%

Fuente: Tecnología de las baterías, Disponible Septiembre 18-2014 en: <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/PresentacionBaterias.pdf>

Se seleccionó una batería Li-Po debido a que ofrece múltiples ventajas, entre las que se resaltan:

- Mayor energía en relación con su peso.
- Mayor tensión, resultando útil para circuitos integrados con alimentación de 3.3 V.
- Poco tiempo de carga, siendo útil para dispositivos portátiles.
- Poco porcentaje de autodescarga.

De acuerdo con lo anterior, la alimentación del sistema se hizo por medio de una batería de polímero de litio (LiPo 1S), conectada en serie a un regulador positivo de 3,3 [V] (esto con el fin de mantener un nivel de voltaje regulado).

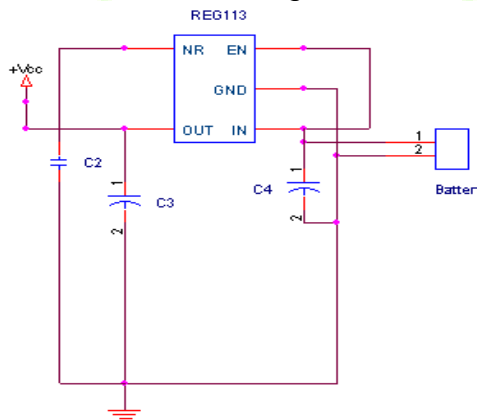
- **Regulador.** Para la selección del regulador se tuvo en cuenta la tensión de salida, la cual alimentará el microcontrolador 3,3[V]. La siguiente tabla muestra una comparación de reguladores.

**Tabla 12:** Comparación Reguladores

	SC630A	Tc126331	REG113-3
<b>I<sub>out</sub> [mA]</b>	300	800	400
<b>V<sub>in</sub>(min) [V]</b>	3,2	3	1,8
<b>V<sub>in</sub> (máx.) [V]</b>	3,4	—	10
<b>V<sub>out</sub> [V]</b>	3,3	3,3	3,3
<b>Precio unitario (Dólares)</b>	1,262	1,450	1,15

El regulador que se seleccionó es el REG113-3 por su precio, su corriente de salida y porque se ajusta a los requerimientos necesarios que en este caso es mantener un nivel de voltaje en 3,3 [V].

**Figura 16.** Circuito administrador de energía



Los valores de los capacitores  $C_2$ ,  $C_3$  y  $C_4$  son de 0,01uF, 47uF y 10uF respectivamente y están determinados por el fabricante en la hoja de datos del regulador REG113NA-3.3/3K [36].

**6.4.2. Humedad del aire: sensor HS1101.** Para esta etapa de instrumentación se tuvo en cuenta la selección de los siguientes componentes:

- **Oscilador.** Es un circuito electrónico que produce una señal eléctrica repetitiva a un rango determinado de frecuencias, la cual puede ser cuadrada, triangular, sinusoidal dentro de sus aplicaciones se destacan:
  - ✓ Divisores de frecuencia.
  - ✓ Moduladores de frecuencia.
  - ✓ Temporizadores.
  - ✓ Generadores de señales triangulares.
  - ✓ Transformar cambios de capacitancia a frecuencia.

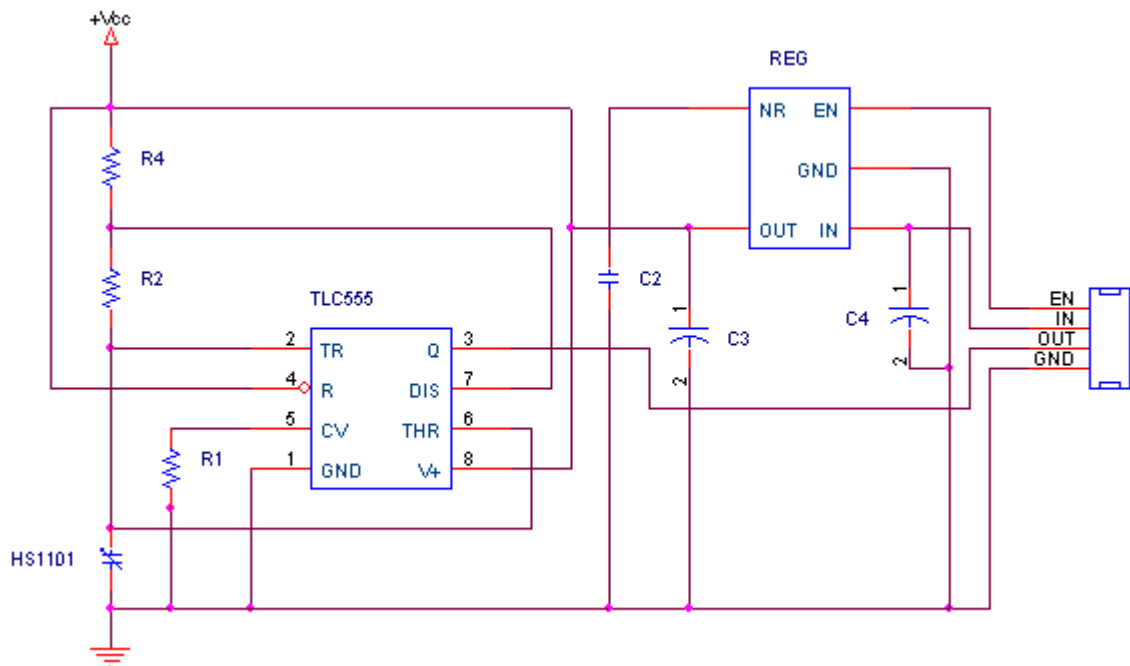
**Tabla 13:** Comparación Oscilador.

	<b>TLC555-Q1</b>	<b>LM555</b>	<b>LMC555</b>	<b>TLC556</b>
<b>Frecuencia(max)[MHz]</b>	2,1	0,1	3	2,1
<b>VCC(min) [V]</b>	2	4,5	1,5	2
<b>VCC(max) [V]</b>	15	16	15	15
<b>Iq(Typ) [uA]</b>	170	3000	50	250
<b>Rango de temperatura</b>	-40 a -125	0 a 70	-40 a 125	0 a 70
<b>Precio unitario (Dólares)</b>	0,33	0,344	0,37	0,44

Se escogió el TLC555-Q1 debido a que su consumo de energía es bajo en toda la gama de voltaje de la fuente de alimentación, alimentación única, operación de 2 [V] a 15 [V], un rango de operación amplio (-40 a -125), bajo precio y reduce en gran medida los picos de suministro de corriente durante las transiciones de salida.

**Acondicionamiento de señal:** El circuito a usar es el típicamente propuesto para un multivibrador astable 555, el cual se encuentra en la hoja de datos del sensor HS1101[37]. El circuito integrado *TLC555QDRQ1*[38] esencialmente se encarga de relacionar de forma periódica y estable las variaciones de capacitancia en el sensor HS1101, con un rango de frecuencias determinadas.

**Figura 17.** Circuito acondicionador de humedad



El sensor HS1101 actúa como un capacitor variable. La conexión del pin 2 (*trigger*) y el pin 6 (*threshold*) del *timer* a las resistencias  $R_2$  y  $R_4$ , permite la carga del sensor capacitivo y su descarga ser realiza a través de la resistencia  $R_4$  cuando se cortocircuita a tierra a través del pin 7 (*discharge*), mediante el nivel de activación.  $R_1$  disequilibra el sistema de compensación de temperatura interna del integrado 555 con el fin de introducir un coeficiente de temperatura que coincida con el coeficiente de temperatura del sensor HS1101. Debido a que la compensación interna de temperatura del 555 cambia de una marca a otra, el valor de  $R_1$  se debe adaptar al integrado específico. Para mantener la frecuencia nominal de 6660Hz a 55% de HR,  $R_2$  debe ser ligeramente ajustada como se sugiere en la tabla 15. La frecuencia de oscilación viene dada por la siguiente fórmula:

$$t_{high} = 0,693 * (R_4 + R_2) * C \quad (14)$$

$$t_{low} = 0,693 * R_2 * C \quad (15)$$

$$f = \frac{1}{(t_{high} + t_{low})} \quad (16)$$

$$f = \frac{1,44}{(R_1 + 2 * R_2) * C} \quad (17)$$

El ciclo de trabajo depende de los valores de  $R_1$  y  $R_2$  y puede ser ajustado seleccionando diferentes resistencias, dado que  $C$  se carga a través de  $R_1 + R_2$  y se descarga únicamente a través de  $R_1$ , se puede conseguir ciclos de trabajo de un mínimo del 50% aproximadamente, si  $R_2 \gg R_1$ , de forma que los tiempos de carga y descarga sean aproximadamente iguales.

**Tabla 14:** Característica de frecuencia de salida en función de RH

RH	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Frequency	7351	7224	7100	6976	6853	6728	6600	6468	6330	6186	6033

Fuente: HUMIRIEL, Relative humidity sensor. Disponible a Sept-09-2014 en: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/humirel/HS1100.pdf>

Los valores de  $R_1$  y  $R_2$  sugeridos en la hoja de datos del sensor HS1101 son de 909 k $\Omega$  y 576 k $\Omega$  respectivamente. El valor de frecuencia será determinado por el sensor HS1101 que actúa como un capacitor variable.

**Tabla 15:** Valores sugeridos según el integrado 555 empleado

555 Type	R1	R2
TLC555 (Texas)	909k $\Omega$	576k $\Omega$
TS555 (STM)	100nF capacitor	523k $\Omega$
7555 (Harris)	1732k $\Omega$	549k $\Omega$
LMC555 (National)	1238k $\Omega$	562k $\Omega$

Fuente: HUMIRIEL, Relative humidity sensor. Disponible a Sept-09-2014 en: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/humirel/HS1100.pdf>

Cabe resaltar que para el integrado *TLC555* de *Texas Instruments*, el punto de referencia es a 6660 Hz para 55%Rh/25°C.

**6.4.3. Temperatura de contacto: sensor RTD PT100.** En esta etapa de acondicionamiento, primero se seleccionaron el opam y la fuente de referencia a utilizar.

- **Opamp (Amplificador operacional):** Se realizó una comparación de los dispositivos ofrecidos por *Microchip*, *STMicroelectronics* y *Texas Instruments*.
  - **Microchip** ofrece diferentes familias de amplificadores operacionales (*opamps*) que soportan un amplio rango de aplicaciones, a continuación se presenta una tabla de las referencias *Rail to Rail* que presentan *bajo offset*, se observa que el menor offset lo presentan las referencias MCPXXX presentan un valor de 250 [uV].

**Tabla 16:** Comparación de amplificadores Operacionales Microchip

Producto	Vos[uV]	GBWP[kHz]	Iq Typ. [uA]	Features
MCP606	250	155	19	Rail-to-Rail output
MCP607	250	155	19	Rail-to-Rail output
MCP08	250	155	19	Chip select, Rail-to-Rail output
MCP09	250	155	19	Rail-to-Rail output

Fuente: Microchip, Operational Amplifiers(Op Amps). Disponible Septiembre 10-2014 en: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21691c.pdf>

- **STMicroelectronics:** ofrece diferentes referencias de amplificadores operacionales *Rail to Rail* y con diferente *offset*, tal como se observa en la siguiente tabla:

**Tabla 17:** Comparación de amplificadores Operacionales STMicroelectronics

Micropower amplifiers	Descripción	Voltaje de operación (V)	I <sub>q</sub> MAX()	GBW (MHZ)	V <sub>os</sub> (mV)
TS941ILT	10v micropower CMOS op-amp	2,5 to 10	1,85	0,01	10
TSV611AILT	Low-voltage Rail-to Rail CMOS op-omp	1,5 to 5,5	12	0,12	0,8
TS932BIDT	10v micropower CMOS op-amp	2,5 to 10	33	0,1	2
TSV521AICT	High merit factor Rail-to-Rail CMOS op-omp	2,7 to 5,5	60	1,15	0,6
TSV632AILT	Low-voltage Rail-to Rail CMOS op-omp	1,5 to 5,5	69	0,88	0,5
TSV854AIPT	Low-power Rail-to Rail CMOS op-omp	2,3 to 5,5	180	1,3	0,8
LMV321LILT	Low-power Rail-to Rail output CMOS op-omp	2,7 to 6	350	1	2

Fuente: stmicroelectronics, Micropower- op-amp. Disponible Septiembre 10-2014 en: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/cn/resource/sales\\_and\\_marketing/promotional\\_material/flyer/flopamp1212.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/cn/resource/sales_and_marketing/promotional_material/flyer/flopamp1212.pdf)

Se resalta la referencia TSV521AICT, debido a que presenta un  $i_q=60\mu A$  y  $V_{offset}=600\mu V$  y la referencia TSV632AILT, debido a que presenta un  $i_q=69\mu A$  y  $V_{offset}=500\mu V$ , además son estas referencias presentan menor  $V_{offset}$ .

- **Texas Instruments** se caracteriza por tener variedad de productos. La siguiente tabla muestra una comparación de los *opamp's* ofrecidos por la empresa *Texas instruments*.

**Tabla 18:** Comparación amplificadores operacionales Texas Instruments

	Opa2363	Opa4243	Opa4251
<b>Número de canales</b>	2	4	4
<b>Voltaje de suministro (Min)</b>	1,8	2,2	2,7
<b>Voltaje de suministro (Max)</b>	5,5	36	36
<b>GBW [MHz]</b>	0,43	0,43	0,035
<b>V<sub>os</sub> (offset Voltage)</b>	1,5	5	0,25
<b>Slew Rate [v/μs]</b>	5	0,1	0,01
<b>CMRR [dB]</b>	74	82	100
<b>Iq por canal [mA]</b>	0,75	0,06	0,038
<b>Precio unitario (Dólares)</b>	0,92	2,00	2,10

El *opamp* que más se ajusta a los criterios de selección fue el OPA4251, debido a su bajo V<sub>os</sub> (offset Voltage) de 0,035 [V], su bajo consumo de corriente por canal de 0,038 [mA] y el número de canales que ofrece (4). Se resalta la referencia OPA4521 con V<sub>offset</sub>=250uV, e i<sub>q</sub>=38uA. La referencia OPA4521 brinda mejores características respecto a las referencias de STMicroelectronics.

- **Fuente de referencia:** Las fuentes de referencia son utilizadas en circuitos que requieren de un voltaje preciso, adecuado para suministrar una tensión estable frente a cambios en la tensión de entrada, temperatura o en otros factores de influencia ambiental.

Los principales requerimientos de una fuente de referencia de tensión son la precisión y la estabilidad [39].

**Tabla 19:** Comparación fuentes de referencia

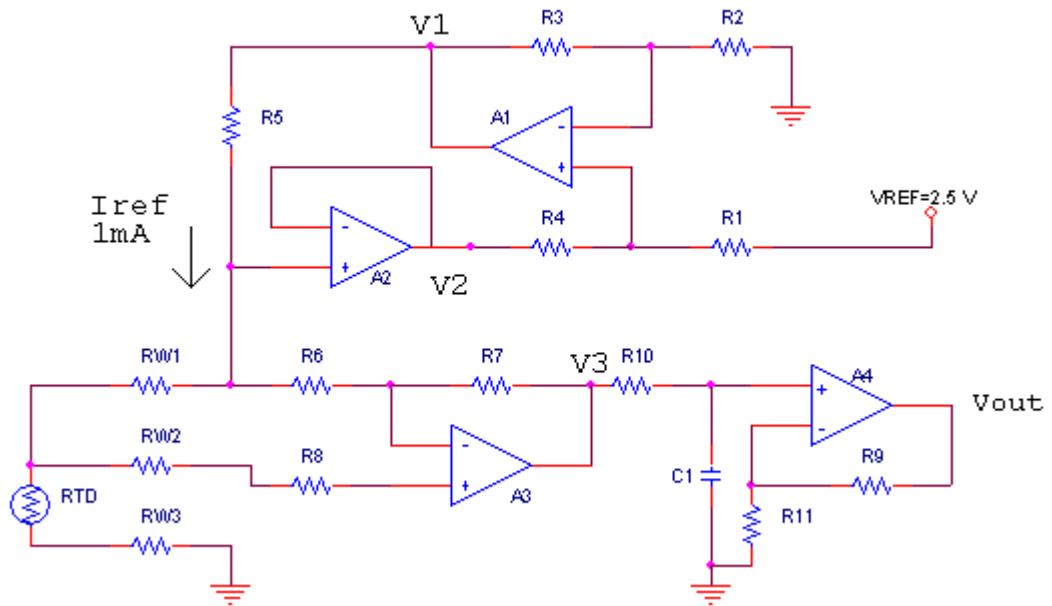
<b>Características</b>	<b>LM4125</b>	<b>LM4132</b>	<b>LM4121</b>	<b>LM4120</b>
<b>V<sub>o</sub>[v]</b>	2,048	1,8	1,25	2,5

<b>Temp coef (Typ) (°C)</b>	14	-	14	14
<b>Tem coef (máx.) (°C)</b>	50	30	50	50
<b>Exactitud 25/deg C [%]</b>	0,2	0,05	0,2	0,2
<b>0.1-10Hz ruido(max)[uVpp]</b>	20	350	20	20
<b>Iq (Typ) [uA]</b>	150	60	160	160
<b>Iq (max) [uA]</b>	290	100	275	275
<b>Vin (min) [V]</b>	2	2,2	1,8	2
<b>Vin (max) [V]</b>	6	5,5	12	12
<b>Precio unitario (Dólares)</b>	0,65	0,78	0,65	0,70

Se seleccionó la fuente LM4125 porque operara a un valor pequeño de tensión (3,3 [V]), además su poca disipación de potencia lo hace eficiente y útil para aplicaciones portables.

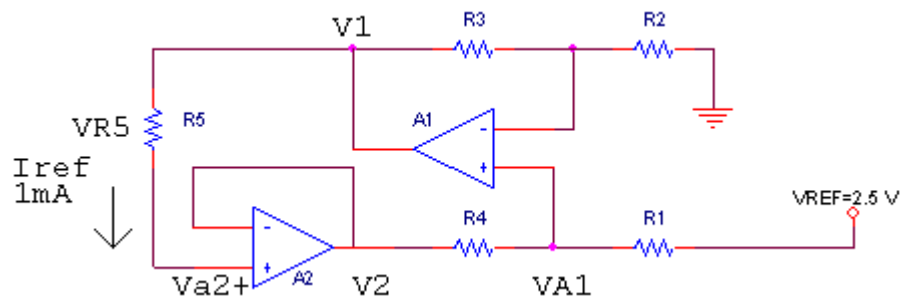
**Acondicionamiento de señal:** El circuito a usar es el propuesto en el la hoja de datos (*Precision Temperature-Sensing With RTD Circuits*) [40]. Se implementará un circuito excitador de corriente, mediante el cual se asegure que una corriente inferior a 1 mA se utiliza para excitar la RTD, debido a que si ésta corriente de excitación es muy alta, el elemento de potencia empezará a disipar calor auto-calentándose. Además se acoplará un circuito corrector de  $R_w$  (*Resistance wire*), encargado de eliminar la resistencias parasitas correspondientes a cada hilo de la RTD y que afectan el valor real de la resistencia de la capsula de sensado. Finalmente mediante un filtro pasa-bajas se filtrará la señal con el fin de disminuir el ruido y obtener un rango de lecturas a la salida eficiente para ser leído por el microcontrolador

**Figura 18.** Circuito acondicionador de temperatura



- **CIRCUITO EXCITADOR DE CORRIENTE**

**Figura 19.** Circuito excitador de corriente



Con el fin de lograr una mejor linealidad en la corriente requerida para la excitación del elemento sensor, se implementa una fuente corriente basada en una fuente de referencia de voltaje, dos amplificadores operacionales y un juego de resistencias que aseguren que la corriente sea lo más cercana posible a 1 mA. El amplificador  $A_1$  y las resistencias  $R_3$  y  $R_2$  forman un amplificador de diferencia con ganancia diferencial de  $1V/V$

$$V_1 = V_{A1} * \left( \frac{R_3}{R_2} + 1 \right) \quad (18)$$

Sabiendo que  $R_2 = R_3 = 24\text{k}\Omega$ , se obtiene:

$$V_1 = V_{A1} * 2 \quad (19)$$

Para el amplificador  $A_2$  se parte del supuesto de un potencial de 0 V en  $V_{a2}$ , este amplificador junto a  $R_4$  y  $R_1$ , forman un seguidor no inversor, para el cual su voltaje de salida ( $V_2$ ) está definido por la siguiente ecuación:

$$V_2 = 0V$$

$$R_4 = R_1$$

$$V_{A1} = \left( \frac{V_{ref}}{2} \right) \quad (20)$$

Así finalmente reemplazando (10) en (9), se obtiene:

$$V_1 = \left( \frac{V_{ref}}{2} \right) * \left( \frac{R_3}{R_2} + 1 \right) \quad (21)$$

Sabiendo que  $R_2 = R_3 = 24\text{k}\Omega$ , se obtiene:

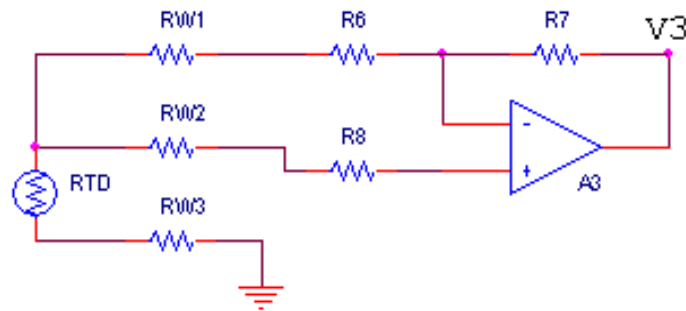
$$V_1 = \left( \frac{V_{ref}}{2} \right) * \left( \frac{24\text{k}\Omega}{24\text{k}\Omega} + 1 \right)$$

$$V_1 = V_{ref} \quad (22)$$

Finalmente se deduce que para cada iteración, la resistencia  $R_5$  presentará un nivel de voltaje  $V_{R5}$  diferente, generando una corriente  $I_{ref}$  variable, la cual se mantendrá constante y cercana a 1 [mA] mediante el circuito propuesto.

- **CIRCUITO CORRECTOR DE  $R_w$  (RESISTANCE WIRE)**

**Figura 20.** Circuito corrector de  $R_w$



Debido a que la RTD seleccionada (PT100) maneja una resistencia interna de  $100\Omega$  a  $0^\circ\text{C}$ , y la temperatura que puede sensor está en el rango de  $-200^\circ\text{C}$  a  $450^\circ\text{C}$ , la resistencia producida por la RTD estaría nominalmente entre  $18.5\Omega$  y  $313.7\Omega$ , proporcionando un voltaje a través de la RTD entre  $18,5\text{ mV}$  y  $313,7\text{ mV}$ . Las resistencias del cable ( $R_{w1}$  y  $R_{w2}$ ) cambian continuamente con la temperatura aportando un voltaje “parásito” que puede afectar significativamente los voltajes entregados por el elemento sensor. Debido a esto se emplea el amplificador operacional  $A_3$  con el fin de eliminar los errores aportados por las resistencias del alambre.

En esta configuración  $R_6$  y  $R_7$  son iguales y relativamente altas. La función de transferencia de esta etapa es:

$$V_3 = \left[ (V_{in} - V_{w1}) * \left( 1 + \frac{R_7}{R_6} \right) - V_{in} * \left( \frac{R_7}{R_6} \right) \right] \quad (23)$$

Además se tiene que:

$$V_{in} = (V_{RTD} + V_{w1} + V_{w3}) \quad (24)$$

Y sabiendo que:

$$R_6 = R_7$$

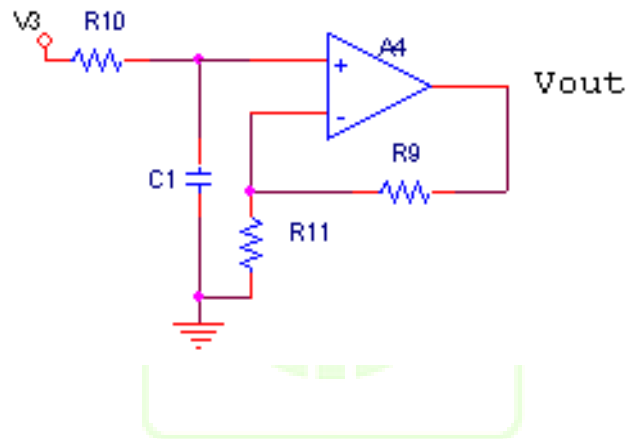
$$R_{w1} = R_{w2}$$

Reemplazando se obtiene:

$$V_3 = V_{RTD} \quad (25)$$

- **FILTRO PASA-BAJAS**

**Figura 21.** Filtro pasa-bajas



Finalmente la señal de tensión ( $V_3$ ) en la salida de A3 se filtra con un filtro pasa-bajas de primer orden, frecuencia de corte de 10 Hz e implementado a partir de  $A_4$ ,  $R_{10}$  y  $C_1$ . Además la señal es amplificada a través de  $R_9$  y  $R_{11}$ . El valor de  $R_{10}$  se calcula fijando el valor de  $C_1$  ( $\leq 1\mu\text{F}$ ) y de la frecuencia de corte (10 Hz):

$$f = \frac{1}{2 * \pi * R_{10} * C_1} \quad (26)$$

Los valores de  $R_9$  y  $R_{11}$  se seleccionan de acuerdo a la ganancia deseada.

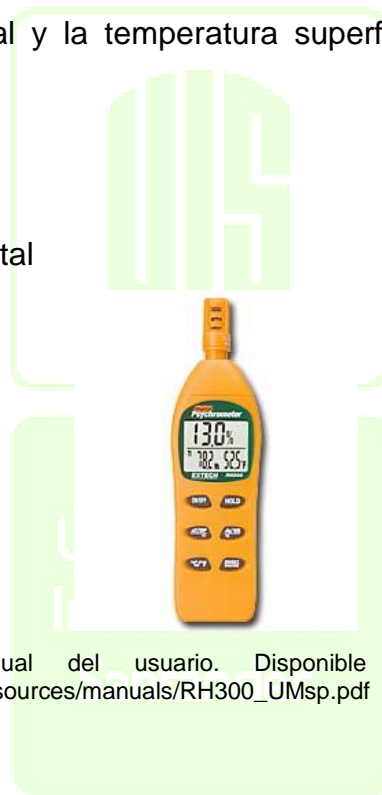
## 6.5. ETAPA 5: CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES

**6.5.1. Calibración del sensor de temperatura.** Debido a que los componentes de cada etapa de instrumentación no son exactamente los mismos, cada nodo presenta diferentes lecturas de voltaje a su salida, por lo

tanto el proceso de calibración debió realizarse para cada uno de los nodos. A continuación se presenta el procedimiento realizado a cada uno de los elementos:

- En primer lugar se estableció la necesidad de emplear un elemento electrónico de medida de temperatura que ya estuviera calibrado y mediante el cual se pudiera realizar la asociación de los registros en los cambios de temperatura en el instrumento y los cambios de voltaje en los elementos a calibrar. El instrumento empleado fue un psicrómetro, el cual es un aparato utilizado para medir la humedad relativa, la temperatura ambiental y la temperatura superficial por medio de una sonda externa.

**Figura 22.** Psicrómetro digital



Fuente: Sirómetro Digital: Manual del usuario. Disponible a Octubre 13-2014 en: [http://www.extech.com/instruments/resources/manuals/RH300\\_UMsp.pdf](http://www.extech.com/instruments/resources/manuals/RH300_UMsp.pdf)

- Posteriormente, se procedió a conectar la sonda al psicrómetro, la cual junto a las puntas de las RTD's fue sometida a diferentes temperaturas, para así poder obtener una mejor relación entre voltajes y temperatura. Además, con ayuda de un multímetro se realizó la lectura de los cambios de voltaje a la salida y a través de *Hyperterminal* (Visualizador de puerto serial) se capturaron las lecturas realizadas por el microcontrolador. Las figuras 23 y 24 muestran el procedimiento realizado para una temperatura de 10,5°C. Cabe aclarar que las

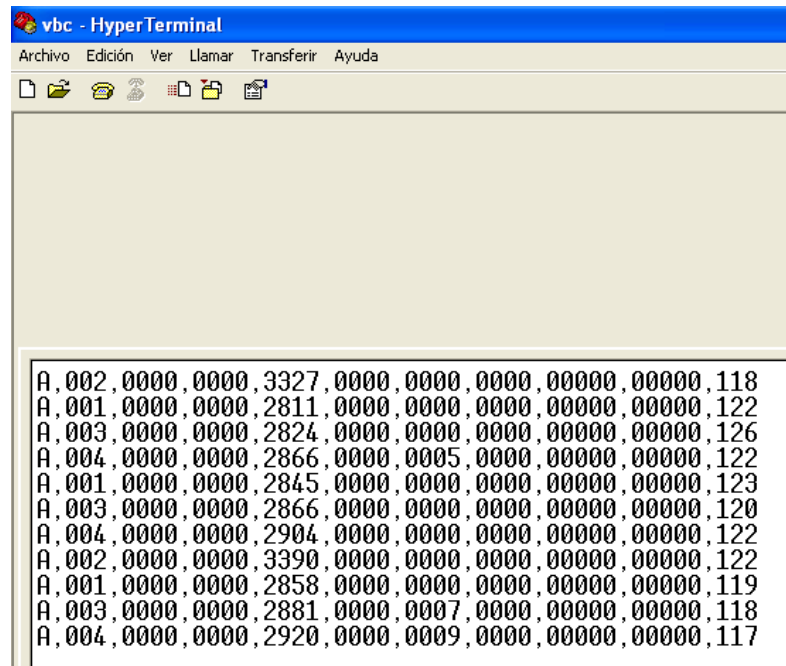
lecturas que entrega el microcontrolador están comprendidas en el rango de 0 a 4096 ( $2^{12}$  bits, el cual es la resolución del micro) correspondientes a valores de voltaje comprendidos entre 0 [V] y 3,3 [V]. Este voltaje varía directamente en función de la temperatura.

**Figura 23.** Visualización lecturas de voltaje a la salida de las RTD's (Multímetros)



Industrial de  
Santander

**Figura 24:** Visualización lectura de voltaje a la salida de las RTD's (Hyperterminal)



Fuente: software Hyper-Terminal

A continuación se presenta una tabla con los resultados obtenidos:

**Tabla 20:** Caracterización RTD's

Temperatura (Psicrometro)	Nodo 1		Nodo 2		Nodo 3		Nodo 4	
	Lectura proveniente del micro	Multímetro	Lectura proveniente del micro	Multímetro	Lectura proveniente del micro	Multímetro	Lectura proveniente del micro	Multímetro
2,4	2767	2,22	3293	2,66	2767	2,23	2818	2,27
10,5	2845	2,29	3390	2,73	2866	2,31	2904	2,34
19,5	2958	2,38	3874	3,13	2963	2,38	3017	2,42
37,1	3182	2,57	3702	3,01	3211	2,60	3280	2,66
58,3	3389	2,73	3892	3,14	3384	2,73	3434	2,76

- Con la obtención de estos datos y sabiendo que el comportamiento de las RTD's es lineal, se procedió a establecer la ecuación general que representa la recta de cada nodo.

$$y = mx + b \quad (27)$$

Se utilizó la fórmula de la ecuación canónica de la recta:

$$\frac{x - x_a}{x_b - x_a} = \frac{y - y_a}{y_b - y_a}$$

Luego se seleccionaron dos puntos de cada recta obteniendo para cada nodo la ecuación correspondiente:

	Ecuación	
NODO 1	$y = 0,0836x - 228,96$	(28)
NODO 2	$y = 0,0848x - 233,98$	(29)
NODO 3	$y = 0,078x - 213,849$	(30)
NODO 4	$y = 0,075x - 238,25$	(31)

**6.5.2. Calibración del sensor de humedad.** Debido a que los componentes de cada etapa de instrumentación no son exactamente los mismos, cada nodo presenta diferentes lecturas de frecuencia a su salida, por lo tanto el proceso de calibración debió realizarse para cada uno de los nodos. A continuación se presenta el procedimiento realizado a cada uno de los elementos:

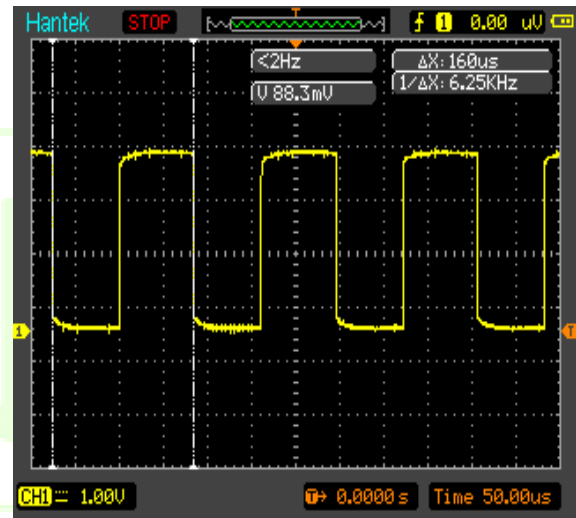
- En primer lugar se estableció la necesidad de emplear un elemento electrónico de medida de humedad que ya estuviera calibrado y mediante el cual se pudiera realizar la asociación de los registros en los cambios de humedad en el instrumento y los cambios de frecuencia en los elementos a calibrar. El instrumento empleado fue un psicrómetro (Figura 22), el cual es un aparato utilizado para medir la humedad relativa, la temperatura ambiental y la temperatura superficial por medio de una sonda externa.

- Posteriormente, se procedió a registrar los cambios de humedad del psicrómetro y los cambios de frecuencia del elemento a calibrar con la ayuda del osciloscopio.

**Figura 25:** NODO 1 Visualización de humedad 66,1 %RH (medidor de temperatura y humedad)



**Figura 26:** NODO 1 Frecuencia HS1101 a 66,1 % RH



A continuación se presenta una tabla con los resultados obtenidos:

**Tabla 21:** Caracterización HS1101

Humedad (Psicrómetro) %RH	Nodo 1 Frecuencia (kHz)	Humedad (Psicrómetro) %RH	Nodo 2 Frecuencia (kHz)	Humedad (Psicrómetro) %RH	Nodo 3 Frecuencia (kHz)	Humedad (Psicrómetro) %RH	Nodo 4 Frecuencia (kHz)
52,2	6,41	53,5	6,41	52,1	7,46	45	6,41
59,8	6,32	61,2	6,32	58,7	7,35	61,4	6,32
66,1	6,25	87,9	6,09	87,8	7,14	77,7	6,25
78,8	5,90	90	6,02	94,2	7,04	85,2	6,09

- Con la obtención de estos datos y sabiendo que el comportamiento de los sensores de humedad es lineal, se procedió a establecer la ecuación general que representa la recta de cada nodo.

$$y = mx + b \quad (32)$$

Se utilizó la fórmula de la ecuación canónica de la recta:

$$\frac{x - x_a}{x_b - x_a} = \frac{y - y_a}{y_b - y_a}$$

Luego se seleccionaron dos puntos de cada recta obteniendo para cada nodo la ecuación correspondiente:

	Ecuación	
NODO 1	$y = -0,0532x + 397,13$	(33)
NODO 2	$y = -0,0969x + 676,07$	(34)
NODO 3	$y = -0,1002x + 829,87$	(35)
NODO 4	$y = -0,1256x + 853,55$	(36)

## 6.6. ETAPA 6: SISTEMA DE CONTROL

Para el control de procesos, se estableció el gran número de posibilidades existentes en el mercado, entre las que se destacan las *FPGAs*, *CPLDs* y demás, hasta los microcontroladores. Después de una análisis se decidió usar un microcontrolador, debido a su relación costo/beneficio y a que dentro de sus funcionalidades, pueden cumplir con los requisitos mínimos del sistema.

Cada vez son más los tipos de microcontroladores existentes en el mercado se decide hacer una selección de los fabricantes más conocidos por la cantidad de proyectos desarrollados en diferentes áreas de la ingeniería, por la amplia literatura que se encuentra en la Web los cuales son: *MICROCHIP* con sus micros *PIC*, *FREESCALE* con sus micros *HCS08* y *TEXAS INSTRUMENTS* con la familia de micros *MSP430F5*.

- **Microcontrolador PIC** las herramientas de software de desarrollo que se presentan son de libre distribución y pueden conseguirse fácilmente sin costo. Una de las desventajas es que cuando el proyecto sea complejo se necesita llamar a muchas instrucciones para realizar una tarea en particular.
- **Freescale:** Los microcontroladores se encuentran catalogados en la gran mayoría de aplicaciones en control, industriales y comunicaciones, la inmunidad al ruido y otros factores hacen muy llamativos a la hora de elección.
- **Texas instruments:** La familia de microcontroladores MSP430F5 ofrece un bajo consumo de potencia. Estos dispositivos de 16 bits ofrecen periféricos USB, además de velocidades de CPU más altas y mayor memoria.

Después de haber estudiado los anteriores microcontroladores se hace una pre-selección y se decide usar el microcontroladores MSP430F5 por su facilidad de desarrollo y su asequibilidad que ofrece esta compañía (*Texas Instruments*) al momento de su compra. En la tabla 22 se observa características de diferentes microcontroladores de la familia MSP430F5 y se resalta el tamaño de memoria FLASH y SRAM del microcontrolador MSP430F5529, particularmente posee bajo consumo, con USB 2.0 integrado, cuatro temporizadores de 16 bits, convertidor analógico digital (ADC) de 12 bits de alto desempeño, dos interfaces de comunicación serie universal, multiplicador de hardware, módulo de reloj en tiempo real con funciones de alarma y 63 pines de entrada y salida [\[41\]](#).

**Tabla 22:** Comparación de microcontroladores de la familia MSP439f5X

	<b>MSP430F5529</b>	<b>MSP430F5514</b>	<b>MPSP430F5515</b>
<b>Frecuencia (MHz)</b>	25	25	25
<b>Flash (kB)</b>	128	64	64
<b>GPIO</b>	63	47	63
<b>USB</b>	1	1	1
<b>SRAM (kB)</b>	8	4	4
<b>USB</b>	USB	USB	USB

El microcontrolador msp430f5529 estuvo encargado de leer el puerto analógico enlazado a la salida de la etapa de instrumentación del sensor de temperatura, el puerto digital enlazado a la salida de la etapa de instrumentación del sensor de humedad, los pines provenientes del *dipswicht* que identifica el nodo que se encuentra transmitiendo la información. La programación que permite realizar las lecturas de los parámetros se realizó mediante el programa *Energia*, con licencia gratuita y de fácil desarrollo. (Para observar el código de programación del microcontrolador ver anexo B)

## **6.7. ETAPA 7: CONFIGURACIÓN DE LOS MÓDULOS XBEE**

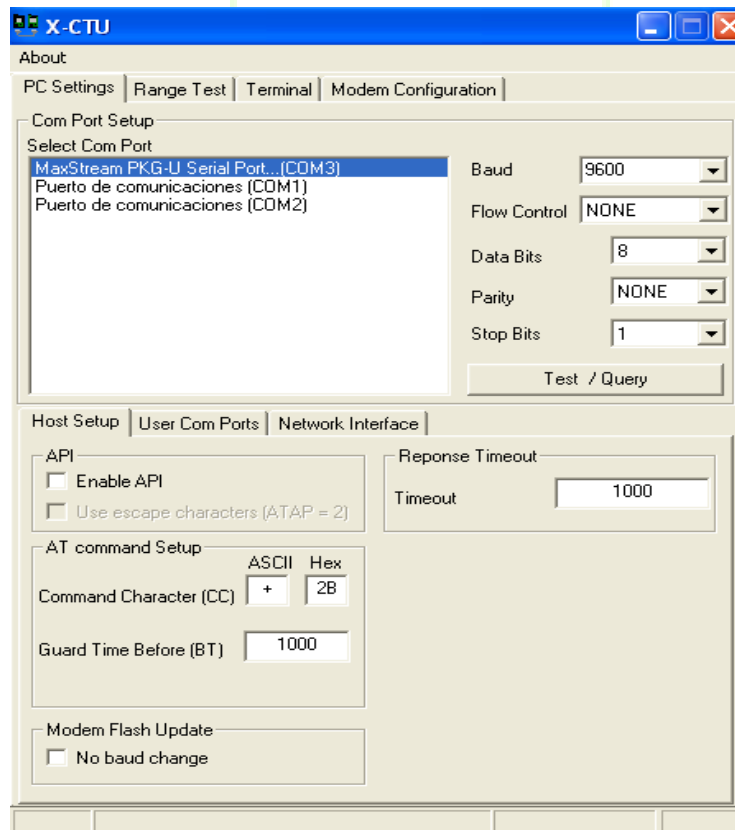
En esta etapa se configuró la red tipo *mesh*, definiendo el papel de cada dispositivo dentro de ella. La configuración de cada módulo se realizó mediante el software de configuración *XCTU* de la empresa *Digi International*. En primer lugar, se configuró el módulo concentrador y los módulos *router* pertenecientes a la red *mesh*. Posteriormente se configuraron los módulos *router*, encargados del envío y recepción de la información entre el edificio E<sup>3</sup>T UIS y el edificio de ingeniería civil UIS. Finalmente se hicieron pruebas de comunicación punto a punto, a partir de un dispositivo configurado como concentrador y otro configurado como *router*, esto con el fin de verificar las distancias a las cuales los módulos pueden transmitir información dentro de la red *mesh*.

### 6.7.1. Configuración red mesh (XBEE XB24-DMWIT-250)

- **Módulo Concentrador**

a) Se ingresó al programa XCTU, en la pestaña *PC Settings* se verificó la conexión del módulo en el puerto correcto, se comprobó que las configuraciones de *Baud*, *Flow Control*, *Data Bits*, *Parity* y *Stop Bits* se hallaran en la configuración predeterminada por el fabricante.

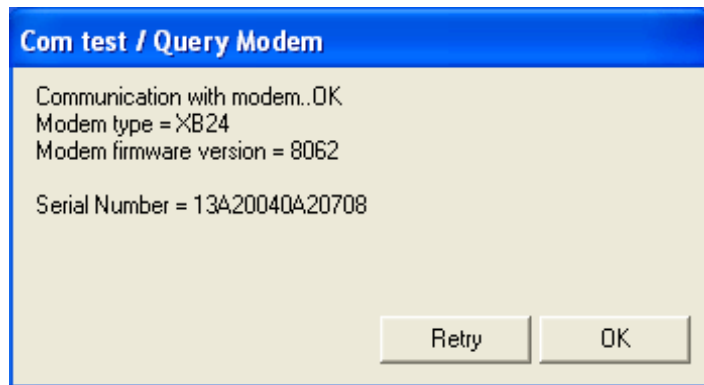
**Figura 27.** Vista pestaña PC Settings del programa XCTU



Fuente: software X-CTU

b) Se seleccionó el puerto COM apropiado (MaxStream PKG-U Serial Port COM3) y se pulsó “Test / Query” (Figura 27) con el fin de verificar que el módulo se encuentra conectado en el puerto indicado. Al estar seleccionado el puerto apropiado, el mensaje resultante es el siguiente:

**Figura 28.** Respuesta positiva de verificación del puerto módulo concentrador



Fuente: software X-CTU

Si este mensaje no aparece, se verifica el puerto seleccionado y se repite la acción anterior.

c) En la pestaña *Modem Configuration* se procedió a leer la configuración del módulo conectado, se restauró la configuración de fábrica y se procedió a configurar el módulo con los parámetros deseados de la siguiente manera:

- ✓ ID-Modem VID = (ABC): Ésta es la red a la cual se asoció el módulo (Todos los módulos deben estar conectados a una misma red)
- ✓ MR-Mesh Retries = (4): Éste es el número de iteraciones (camino) que podrá realizar cada módulo para transmitir la información los demás módulos asociados a la red. (El número de iteraciones depende directamente del número de módulos asociados a la red)

- ✓ DH-Destination Address High = (0)  
DL-Destination Address Low = (FFFF)

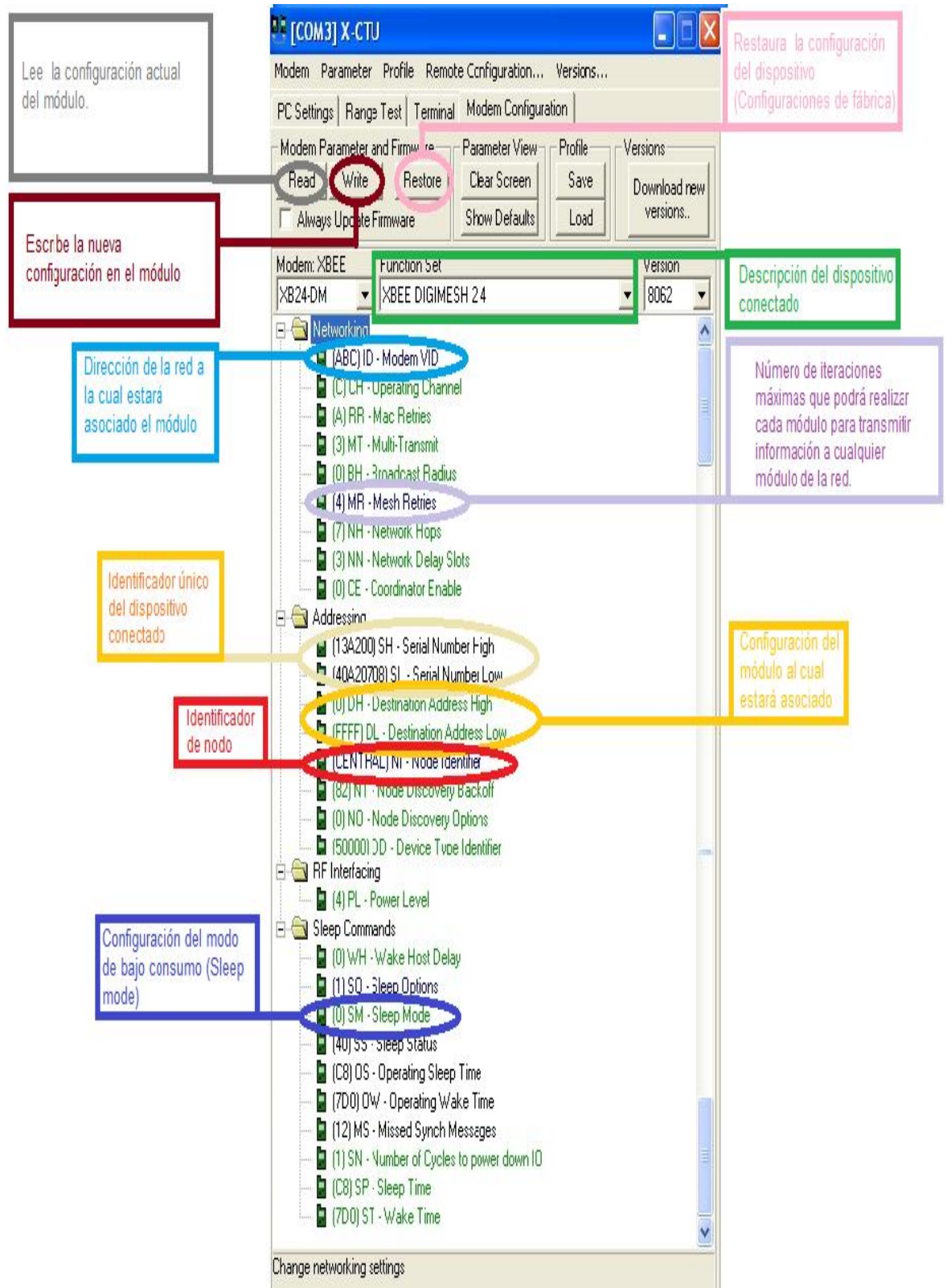
La dirección de recepción se configuró en modo *broadcast* con el fin de permitir a todos los módulos de la red recibir datos del módulo concentrador.

- ✓ Ni-Node Identifier = (CENTRAL): Identificador de nodo, aquí se dió el nombre deseado al nodo, de manera que fuese fácilmente identificado dentro de la red.
  
- ✓ SM-Sleep mode = (0): Cada módulo tiene el modo de bajo consumo en cero (0) por defecto. En el caso del módulo configurado como concentrador se verificó que se mantuviera así debido a que éste debe mantenerse activo todo el tiempo para recibir datos que puedan ser enviados desde cualquier módulo de la red.

d) Finalmente se procedió a escribir la configuración en el módulo mediante la opción *"write"*



**Figura 29. Configuración módulo concentrador**

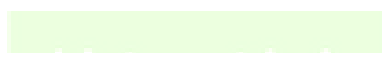


Fuente: software X-CTU

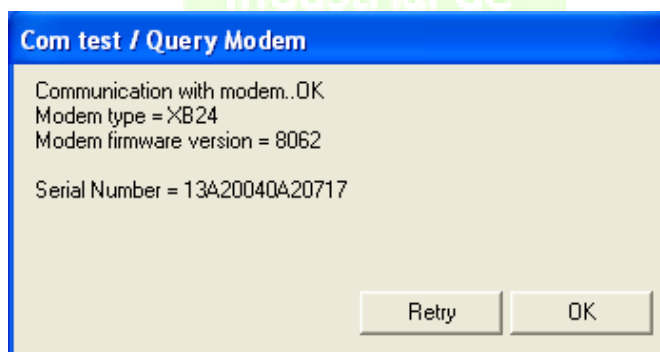
- **Módulo router**

Debido a que la red implementada consta de cuatro (4) módulos configurados como *router*, a continuación se especifica la configuración de uno (1) de los módulos, la cual se repitió con cada uno de los módulos restantes.

- a) Se ingresó al programa XCTU, en la pestaña *PC Settings* se verificó la conexión del módulo en el puerto correcto, se comprobó que las configuraciones de *Baud*, *Flow Control*, *Data Bits*, *Parity* y *Stop Bits* se hallaran en la configuración predeterminada por el fabricante. (Ver figura 27)
- b) Se seleccionó el puerto COM apropiado (MaxStream PKG-U Serial Port COM3) y se pulsó "Test / Query" (Figura 27) con el fin de verificar que el módulo se encuentra conectado en el puerto indicado. Al estar seleccionado el puerto apropiado, el mensaje resultante es el siguiente:



**Figura 30.** Respuesta positiva de verificación del puerto módulo router

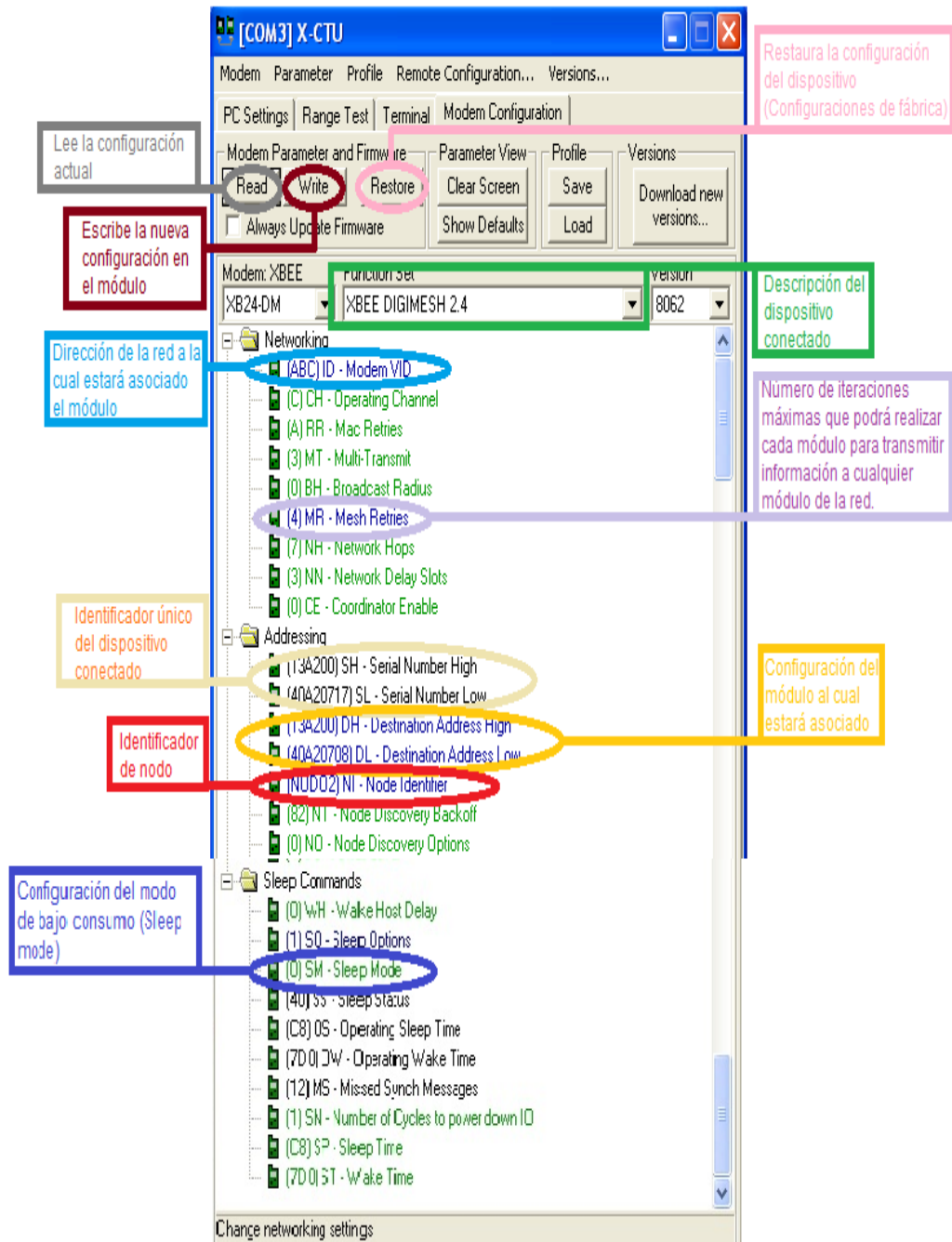


Fuente: software X-CTU

Si este mensaje no aparece, se verifica el puerto seleccionado y se repite la acción anterior.

- c) En la pestaña *Modem Configuration* se procedió a leer la configuración del módulo conectado, se restauró la configuración de fábrica y se procedió a configurar el módulo con los parámetros deseados de la siguiente manera:
- ✓ ID-Modem VID = (ABC): Ésta es la red a la cual se asocia el módulo (Todos los módulos deben estar conectados a una misma red).
  - ✓ MR-Mesh Retries = (4): Éste es el número de iteraciones (camino) que podrá realizar cada módulo para transmitir la información los demás módulos asociados a la red. (El número de iteraciones depende directamente del número de módulos asociados a la red).
  - ✓ DH-Destination Address High = (13A200)  
DL-Destination Address Low = (40A20708)  
La dirección de recepción es la misma en todos los módulos *router*, y corresponde al identificador único del módulo configurado como concentrador.
  - ✓ Ni-Node Identifier = (NODO2): Identificador de nodo, aquí se dió el nombre deseado al nodo, de manera que fuese fácilmente identificado dentro de la red.
  - ✓ SM-Sleep mode = (0): Cada módulo tiene el modo de bajo consumo en cero (0) por defecto. . En el caso del módulo configurado como *router* se verificó que se mantuviera así debido a que cada módulo debe mantenerse activo todo el tiempo, manteniendo la red activa para que en el caso en el que algún dispositivo de la red falle o no pueda comunicarse directamente con el concentrador, pueda hallar un camino opcional y logre transmitirle la información de manera precisa.
- d) Finalmente se procedió a escribir la configuración en el módulo mediante la opción *"write"*

**Figura 31. Configuración módulo router**

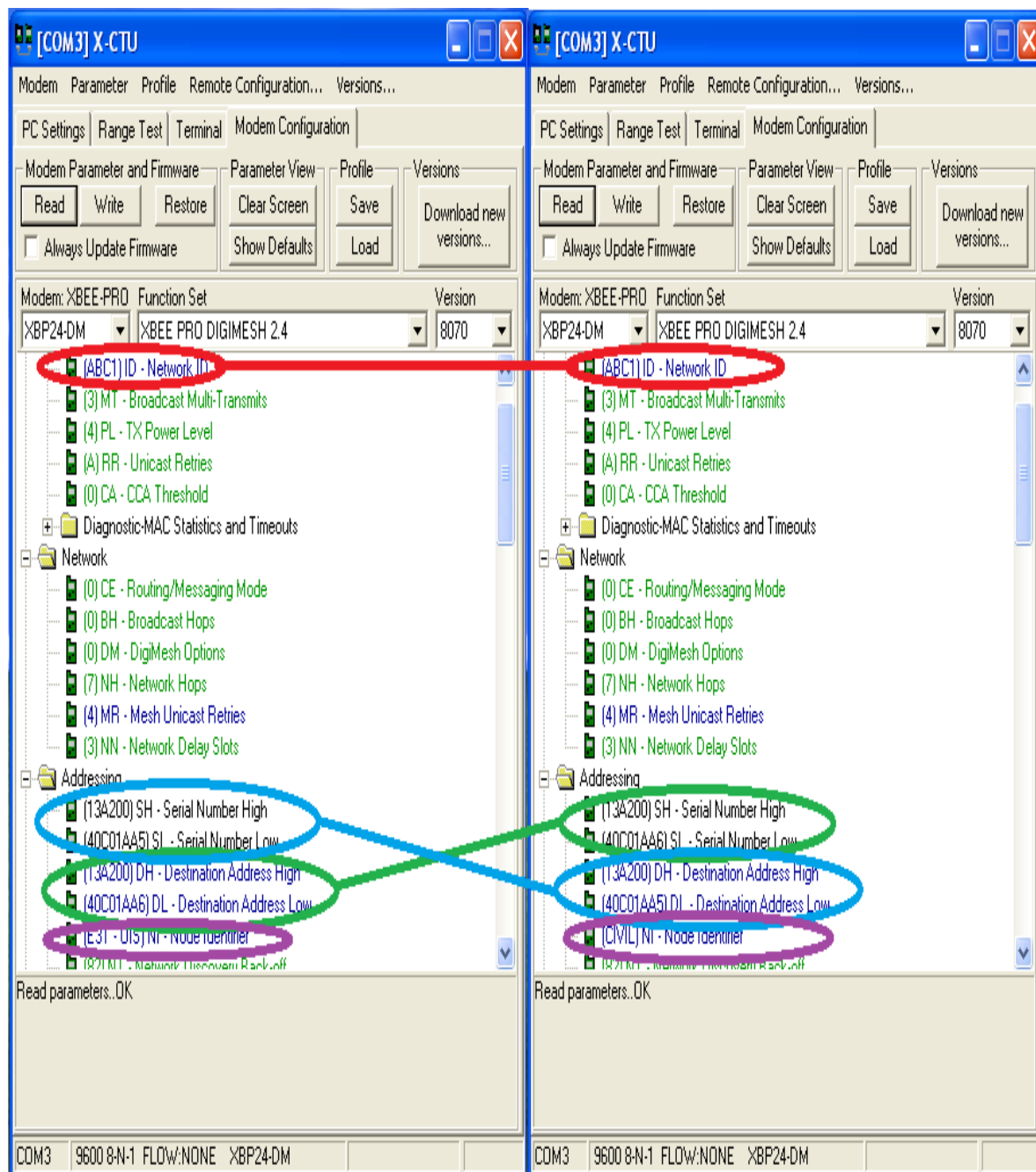


Fuente: software X-CTU

**6.7.2. Configuración red punto a punto (Envío y recepción entre el edificio E<sup>3</sup>T UIS y el edificio de ingeniería civil UIS).** Los dispositivos encargados de la transmisión y recepción de los datos (*XBEE XBP24-DMSIT-250*) se configuraron como módulos *router* (Para ver el procedimiento de configuración

revisar el numeral 7.1.: Configuración módulo *router*). Cabe resaltar que el modo de bajo consumo fue desactivado debido a que estos módulos deben estar continuamente. A continuación se presenta la figura 32, en la cual se evidencia la configuración de cada módulo y el cruce de direcciones.

**Figura 32.** Configuración módulos router XBP24-DMSIT-250



Fuente: software X-CTU

**6.7.3. Pruebas de comunicación (punto a punto).** A la hora de realizar la implementación de una red inalámbrica es de vital importancia establecer la distancia máxima a la cual dos nodos pueden mantener una conexión fiable. Muchos parámetros determinan dicha distancia, entre ellos la sensibilidad del receptor, la potencia de salida del transmisor, la frecuencia y el entorno de propagación de la señal [42]. A una distancia  $d$ , la potencia de una señal es función también de la frecuencia y se puede calcular a partir de la ecuación:

$$P_d = P_0 - 10 * 2 * \log_{10}(f) - 10 * 2 * \log_{10}(d) + 27.56 \quad (37)$$

Donde:

$P_d$ = es la potencia de la señal (en dBm) a una distancia  $d$

$P_0$ = es la potencia de la señal (en dBm) a una distancia cero de la antena

$f$ =es la frecuencia de la señal en MHz

$d$ =es la distancia (en metros) de la antena

En el mundo real, debido a que los escenarios no son ideales, la anterior fórmula no es lo suficientemente precisa, y se modifica de manera tal que pueda ser empleada en un cálculo más preciso:

$$P_d = P_0 - 10 * n * \log_{10}(f) - 10 * n * \log_{10}(d) + 30 * n - 32.44 \quad (38)$$

Estas pruebas se realizaron entre dos módulos *XBEE XB24-DMWIT-250* configurados como concentrador y *router*, en espacios reales (cuarto piso del edificio de la E<sup>3</sup>T UIS y cancha de softball UIS), en los cuales la señal podía ser afectada por otras señales que usan la misma banda de frecuencia y por los materiales que encuentra la señal al propagarse en el entorno.

Para este tipo de ambientes, se tuvo en cuenta la ecuación 11 con el fin de realizar los cálculos. Mediante la siguiente tabla se verificó el valor del factor ( $n$ ), a partir del cual se obtuvieron los datos teóricos de potencia.

**Tabla 23:** Exponente (n) para pérdidas en las líneas en diferentes ambientes

n	Entorno
2,0	Aire libre
1,6 hasta 1,8	Dentro de un edificio, con visión directa
1,8	Supermercado
1,8	Fábrica de papel/cereales
2,09	Sala de conferencia con mesas y sillas
2,2	Tienda
2 hasta 3	Dentro de una fábrica, sin visión directa
2,8	Dentro de una residencia
3,2 hasta 4,3	Dentro de un edificio de oficinas, sin visión directa

Debido a que las pruebas se realizaron dentro de un edificio sin visión directa y al aire libre, el valor del exponente (n) es tres coma dos ( $n=3,2$ ) y dos ( $n=2$ ), respectivamente. Cabe resaltar que se tuvo en cuenta que la sensibilidad del receptor es de  $-92\text{dBm}$  ( $6,30 * 10^{-10} \text{ mW}$ ) a la distancia máxima en interiores de 30 m y 90 metros al aire libre. La potencia de transmisión del módulo es de 0 dBm (1 mW). Los resultados teóricos se encuentran consignados en la siguiente tabla:

**Tabla 24:** Resultados teóricos de distancia vs potencia (edificio de oficinas, sin visión directa)

D [m]	10	15	20	25	30	35
$P_d$ [dBm]	-76,60	-82,24	-86,23	-89,34	-91,87	-94,01
$P_d$ [mW]	$2,18 * 10^{-8}$	$5,97 * 10^{-9}$	$2,37 * 10^{-9}$	$1,16 * 10^{-9}$	$6,49 * 10^{-10}$	$3,96 * 10^{-10}$

**Tabla 25:** Resultados teóricos de distancia vs potencia (al aire libre)

D [m]	10	20	40	60	80	90
$P_d$ [dBm]	-66,94	-74,47	-81,99	-86,39	-89,52	-90,80
$P_d$ [mW]	$2,02 * 10^{-7}$	$3,57 * 10^{-8}$	$6,31 * 10^{-9}$	$2,29 * 10^{-9}$	$1,11 * 10^{-9}$	$8,31 * 10^{-10}$

- Pruebas *INDOOR*

a) Puertas abiertas

Posteriormente se realizaron pruebas experimentales con puertas abiertas, en las cuales el módulo concentrador se mantuvo fijo (conectado al pc) y el módulo *router* se mantuvo en movimiento. Finalmente se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 26:** Resultados experimentales de distancia vs potencia (puertas abiertas)

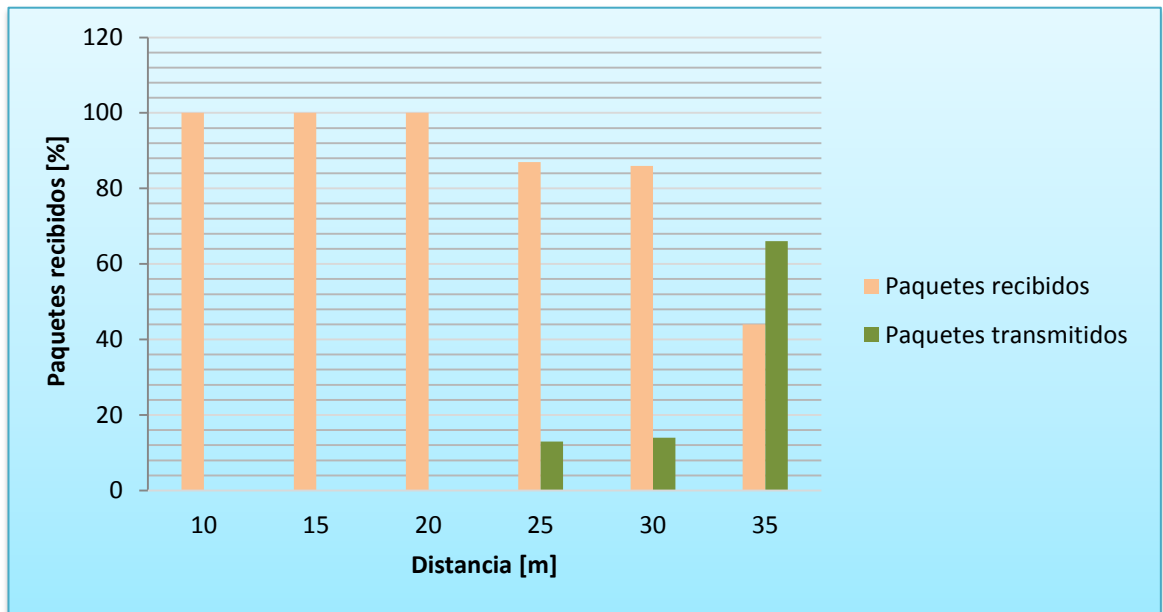
D [m]	10	15	20	25	30	35
$P_d$ [dBm]	-73,84	-79,12	-82,87	-85,78	-88,15	-90,16
$P_d$ [mW]	$4,12 \cdot 10^{-8}$	$1,22 \cdot 10^{-8}$	$5,15 \cdot 10^{-9}$	$2,63 \cdot 10^{-9}$	$1,52 \cdot 10^{-9}$	$9,61 \cdot 10^{-10}$

**Tabla 27:** Distancia vs paquetes recibidos y perdidos (puertas abiertas)

D [m]	10	15	20	25	30	35
Paquetes recibidos [%]	100	100	100	87	86	44
Paquetes perdidos [%]	0	0	0	13	14	66

Según la hoja técnica del fabricante (Ver anexo C), cada módulo *XBEE XB24-DMWIT-250* alcanza los 30 metros en interiores. Se comprobó que experimentalmente los resultados no coinciden, ya que a partir de los 25 metros existen pérdidas de paquetes.

**Figura 33.** Porcentajes de paquetes recibidos y perdidos (puertas abiertas)



b) Puertas cerradas En esta ocasión las pruebas se realizaron con las puertas cerradas. Los resultados se encuentran consignados en la siguiente tabla:

**Tabla 28:** Resultados experimentales de distancia vs potencia (puertas cerradas)

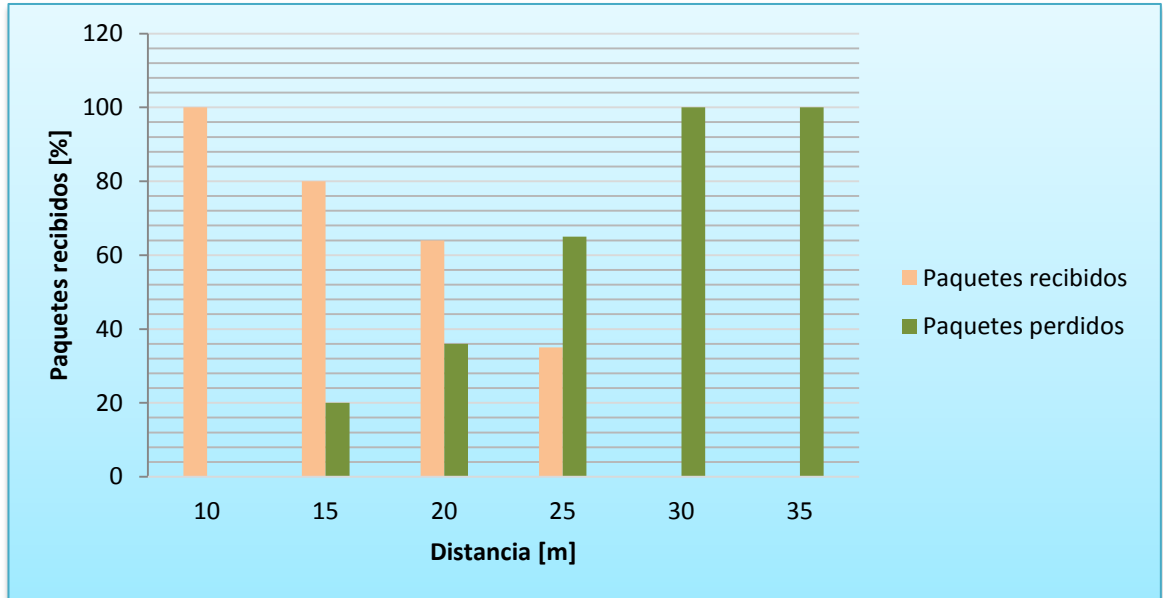
D [m]	10	15	20	25	30	35
$P_d$ [dB m]	-84,38	-89,65	-92,33	-101,47	-103,75	-105,96
$P_d$ [mW]	$3,64 * 10^{-9}$	$1,08 * 10^{-9}$	$5,84 * 10^{-10}$	$7,12 * 10^{-11}$	$4,21 * 10^{-11}$	$2,53 * 10^{-11}$

**Tabla 29:** Distancia vs paquetes recibidos y perdidos (puertas cerradas)

D [m]	10	15	20	25	30	35
Paquetes recibidos [%]	100	80	64	35	0	0
Paquetes perdidos [%]	0	20	36	65	100	100

En interiores con puertas cerradas se evidenció que la potencia de la señal es notablemente afectada, con una pérdida de paquetes alta (20) a tan solo 15 metros de distancia.

**Figura 34.** Porcentajes de paquetes recibidos y perdidos (puertas cerradas)



- **Pruebas *OUTDOOR***

Estas pruebas se realizaron al aire libre, los resultados se encuentran consignados en la siguiente tabla:

**Tabla 30:** Resultados experimentales distancia vs potencia (al aire libre con línea de vista)

D [m]	10	20	40	60	80	90
$P_d$ [dBm]	-67,98	-75,64	-83,34	-87,64	-93,08	-95,82
$P_d$ [mW]	$2,02 * 10^{-7}$	$3,57 * 10^{-8}$	$6,31 * 10^{-9}$	$2,29 * 10^{-9}$	$1,11 * 10^{-9}$	$8,31 * 10^{-10}$

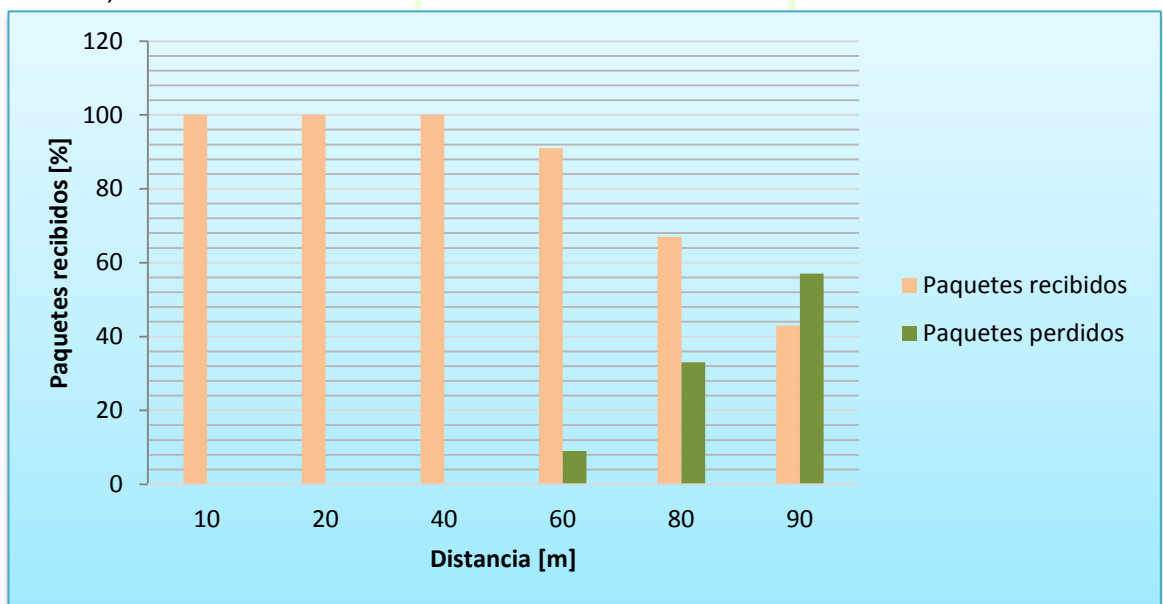
Se tuvo en cuenta que la sensibilidad del receptor es de -92dBm ( $6,84 * 10^{-8} mW$ ). El módulo concentrador se mantuvo fijo (conectado al pc), el módulo *router* se mantuvo en movimiento.

**Tabla 31:** Distancia vs paquetes recibidos y perdidos (al aire libre con línea de vista)

D [m]	10	20	40	60	80	90
Paquetes recibidos [%]	100	100	100	91	67	43
Paquetes perdidos [%]	0	0	0	9	33	57

Según la hoja técnica del fabricante (Ver anexo C), cada módulo alcanza los 90 metros en ambientes al aire libre. Se comprobó que experimentalmente los resultados coinciden de manera aproximada con los resultados teóricos, lo que indica que los módulos envían y reciben información de manera más precisa cuando no existen interferencias.

**Figura 35.** Porcentajes de paquetes recibidos y perdidos (al aire libre con línea de vista)



**6.7.4. Prueba de conexión.** Para esta prueba se alejó el módulo *router* del módulo concentrador y se verificó la conexión a determinadas distancias (dentro de un edificio, con línea de vista). El *router* se activó manualmente en cada distancia fijada, así se comprobó la capacidad de conexión del módulo a

diversas distancias. Esto con el fin de verificar que en el eventual caso en que el dispositivo sufra una pérdida repentina de energía, tenga la facultad de retomar la comunicación dentro de la red al momento de volver a ser activado. De esta forma se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 32:** Conexión vs distancia entre nodos

Distancia [m]	Conexión
10	Ok
15	Ok
20	Ok
25	Ok
30	En el 3er intento, logró conectarse
35	No conecta

**6.7.5. Pruebas de transmisión entre nodos en red mesh.** Las pruebas se realizaron en el cuarto piso del edificio de la E<sup>3</sup>T UIS, disponiendo de 4 módulos configurados como *router* distribuidos en el espacio y un módulo configurado como concentrador anclado al PC (*Personal computer*). Cada módulo se fijó a una distancia menor a 20 metros entre ellos. El concentrador se mantuvo conectado al computador con el fin de recibir y mostrar en pantalla los datos. La información fue transmitida de manera correcta cuando toda la red se encontraba activa, pero al apagar el dispositivo intermedio (módulo 3), los paquetes provenientes del módulo 1 no llegaron y los del módulo 2 se perdieron.

## 6.8. ETAPA 8: CONSTRUCCIÓN DE ANTENAS TIPO CANTENNA

### 6.8.1. Proceso de construcción cantenna

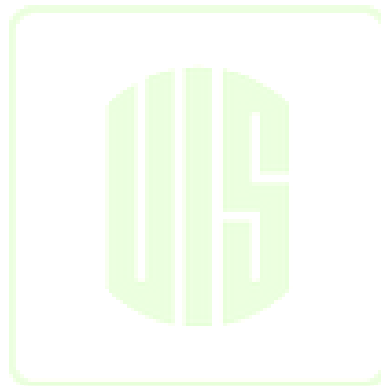
#### Materiales:

- Dos (2) latas de aluminio (Diámetro de la circunferencia:  $73\text{mm} < D < 95\text{mm}$ )
- Conector N hembra tipo tuerca

- Pigtail N-Macho
- 10cm de alambre de cobre de 1½ milímetro de grosor
- Cable coaxial RG58/U de 50 ohm
- 10 cm de termoencogible para cables

#### Herramientas necesarias:

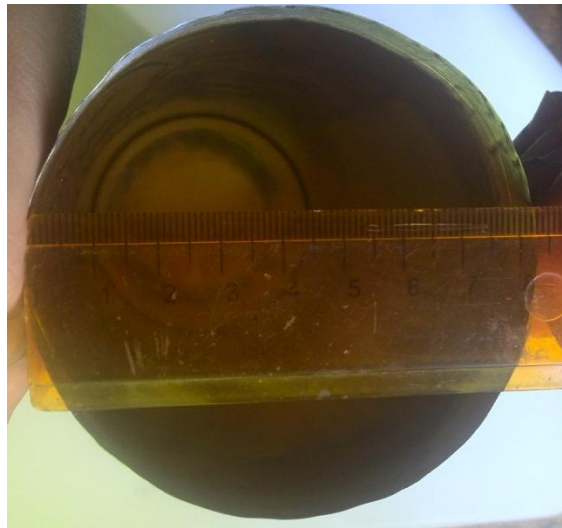
- Cortafrío
- Motor *tool*
- Regla
- Cautín
- Soldadura de estaño
- Pasta de soldadura
- Taladro
- Segueta
- Lija fina



#### PROCEDIMIENTO

1. En primer lugar se debe establecer la frecuencia a la cual se desea trabajar, en este caso se decide que será de 2.4 GHz debido a que esta es la más frecuencia más utilizada para las redes inalámbricas 802.11b/g por ser de uso libre y permite rangos de transmisión más amplios. Para esta frecuencia, el diámetro interno de la lata debe estar en el rango de 73 mm a 95 mm. Se procede a hacer la respectiva medición del diámetro con la ayuda de una regla.

**Figura 36.** Medición del diámetro de la lata



Datos de la lata  
Diámetro interno: 82 mm  
Frecuencia de trabajo: 2.4 GHz

A partir de estos datos y con las formulas (1), (2) y (3) es posible determinar los valores de  $L_e$ ,  $L_o$  y  $L_g$ .

$$L_c = 1.706 * D = 1.706 * 82 \text{ mm} = 139.89 \text{ mm}$$

$$L_o = \frac{c}{f} = \frac{300.000 \text{ km/s}}{2.4 \text{ GHz}} = 125 \text{ mm}$$

$$\left(\frac{1}{L_o}\right)^2 = \left(\frac{1}{L_c}\right)^2 + \left(\frac{1}{L_g}\right)^2 \Rightarrow L_g = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{L_o}\right)^2 - \left(\frac{1}{L_c}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{125\text{mm}}\right)^2 - \left(\frac{1}{139.89\text{mm}}\right)^2}} = 278.43 \text{ mm}$$

Con estos resultados se establece la longitud total de la lata que permite la correcta propagación de las ondas, la ubicación del elemento activo con respecto al fondo de la lata, y su longitud total.

**Longitud total de la lata**

$$L = \frac{3}{4} L_g = \frac{3}{4} * 278.43\text{mm} = 208.82 \text{ mm}$$

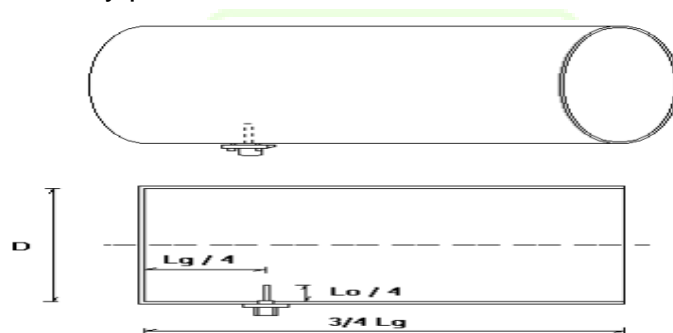
### Distancia del elemento activo con respecto al fondo

$$d = \frac{1}{4}Lg = \frac{1}{4} * 278.43mm = 69.6 mm$$

### Longitud del elemento activo o dipolo

$$l = \frac{1}{4}Lo = \frac{1}{4} * 125mm = 31.25 mm$$

**Figura 37.** Dimensión y posición del elemento activo



Fuente: Atis Tirma. Brico wifi I, Antena Pringles (Cantenna), Julio 17 2001. Disponible a Mayo-12-2014 en: [http://www.zero13wireless.net/wireless/Antenas/Antena\\_Pringles\\_Cantenna/Manual\\_paso\\_a\\_paso\\_Antena\\_Pringles.pdf](http://www.zero13wireless.net/wireless/Antenas/Antena_Pringles_Cantenna/Manual_paso_a_paso_Antena_Pringles.pdf)

2. A continuación, con la ayuda de un marcador se establece el punto en donde se ubicará el elemento activo y la altura correcta de la lata. Posteriormente con la ayuda de una segueta, se corta la lata y con un taladro se perfora el orificio en donde va a ir ubicado el conector N-hembra tipo tuerca (elemento activo o dipolo).

**Figura 38.** Marcación altura de la lata y ubicación del dipolo



3. Una vez hecho esto se procede a construir el elemento activo, a partir del conector N-hembra tipo tuerca (elemento activo o dipolo) y 31 mm de alambre de cobre de 1½ mm de grosor. Con la ayuda de un caudín, se suelda el alambre al conector procurando que la unión sea lo más sólida posible para así reducir fallas o pérdidas a la hora de recibir y transmitir información.

**Figura 39.** Dipolo



4. Una vez listo el dipolo se introduce en el orificio y se procede ajustarlo dentro de la lata con la ayuda de una pinza.

**Figura 40.** Vista lateral antenna



**Figura 41.** Vista frontal de la antena



5. Finalmente se procede a construir el cable conector que permitirá el envío y recepción de la información. El cable coaxial se debe cortar lo más pequeño posible para que las pérdidas en la línea se reduzcan al máximo.

**Figura 42.** Medición cable coaxial



**Figura 43.** Conector N-macho CP454



En este caso se corta un tramo de 10cm, el cual se pela dejando el núcleo expuesto, se suelda el pin del conector al núcleo del cable para mejorar el contacto y se introduce el cable dentro del núcleo. Con la ayuda de una pinza se ensambla el cilindro del conector y se ajusta con termoencogible para cables.

**Figura 44.** Pigtail



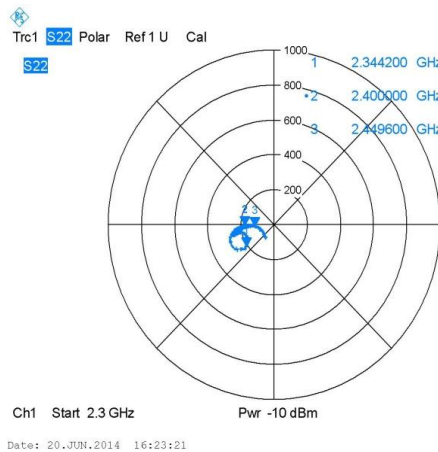
**6.8.2. Análisis de parámetros (Analizador de espectros).** Con la ayuda del analizador de redes vectorial fue posible realizar la medición de algunos parámetros de las antenas construidas, estos fueron: coeficiente de reflexión, impedancia característica y relación de onda estacionaria. Se hace necesario aclarar que el equipo mediante el cual se realizaron las medidas, debido a daños ocasionados por mal uso sólo puede ofrecer el análisis de parámetros de reflexión. Debido a esto y sabiendo que las redes bipuerto pasivas se caracterizan por ser redes reciprocas, es posible establecer una equivalencia entre los parámetros de reflexión y transmisión de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} S_{11} &= S_{22} \\ S_{21} &= S_{12} \end{aligned}$$

De esta manera es posible realizar el análisis de el parámetro reflexión a la entrada ( $S_{11}$ ) a través del análisis del parámetros de reflexión a la salida ( $S_{22}$ ).

- **Diagrama Polar (Cantenna emisora/Cantenna receptora):** Mediante el plano complejo, los Diagramas Polares muestran los datos medidos, ubicando su componente real en el eje horizontal y su componente imaginaria en el vertical

**Figura 45. Diagrama polar (cantenna emisora)**



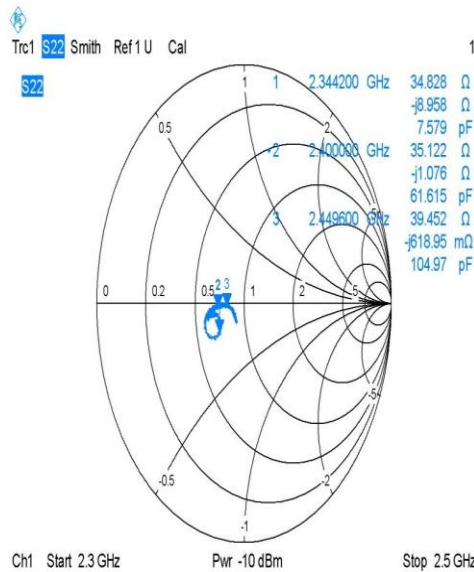
**Figura 46. Diagrama polar (cantenna receptora)**



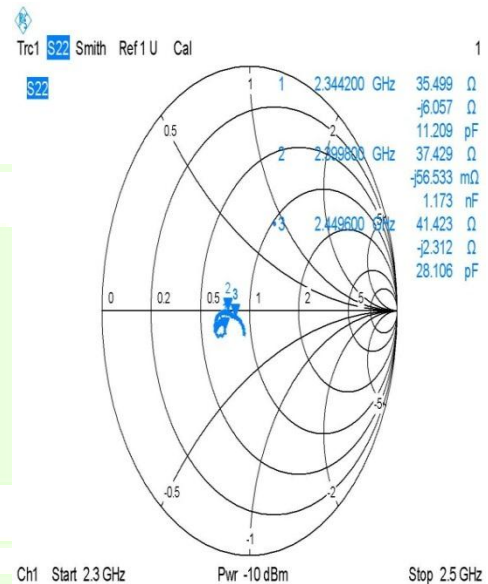
Las gráficas anteriores muestran el parámetro de dispersión ( $S_{22}$ ) de la cantenna emisora y la cantenna receptora, para una frecuencia de 2,4 [GHz], con valores de 175,64 [mU] a  $-178,03^\circ$  y 144,13 [mU] a  $-178,92^\circ$ , respectivamente. Para máxima transferencia de energía a través de una línea de transmisión desde la fuente a la carga, estas deben tener la misma impedancia  $Z_0$ . El centro del Diagrama Polar se corresponde con una carga perfecta  $Z_0$  en el puerto de ensayo de entrada del DUT (no reflexión, entrada adaptada), mientras que la circunferencia exterior ( $|S_{ii}| = 1$ ) representa una señal totalmente reflejada. De acuerdo a los resultados obtenidos se pudo concluir que la señal es mayormente transmitida. Cabe aclarar que el centro del diagrama corresponde a una carga perfecta, con base a esto se pudo concluir que la onda incidente es mayormente reflejada.

- **Carta de Smith (Cantenna emisora/Cantenna receptora):** Los coeficientes de reflexión complejos trazados como valores de impedancia normalizados, se pueden visualizar y analizar a través del diagrama de Smith.

**Figura 47.** Carta de Smith (cantenna emisora)



**Figura 48.** Carta de Smith (cantenna receptora)

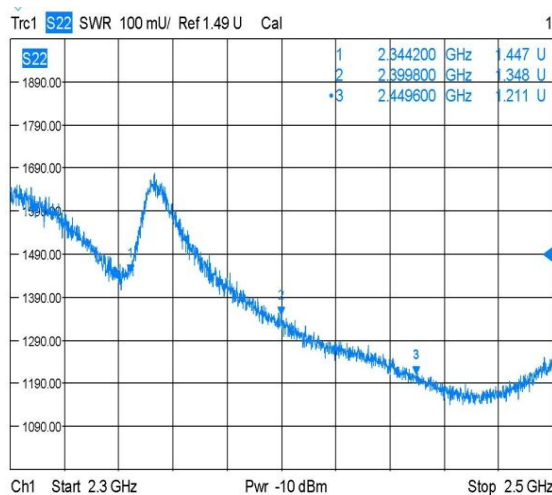


Las gráficas anteriores muestran la impedancia normalizada de la cantenna emisora y la cantenna receptora, para una frecuencia de 2,4 [GHz], con valores de  $35,122 [\Omega] - j1,76 [\Omega] + 61,615 \text{ pF}$  y  $37,429 [\Omega] - j56,533 [\text{m}\Omega] + 1,173 \text{ nF}$ , respectivamente. Se sabe que el eje central de la carta de Smith corresponde a un valor de impedancia real (reactancia cero) y las mitades superior e inferior corresponden a un valor reactivo positivo (inductivo) y reactivo negativo (capacitivo). La parte imaginaria de la impedancia representa la energía que se almacena en el campo cercano de la antena (potencia no radiada). Una antena con una impedancia de entrada real (cero la parte imaginaria) se dice que es resonante. A partir de esto y con los resultados obtenidos, se comprobó que debido a que los valores de reactancia son muy pequeños y los de impedancia real son cercanos a 1, las cantennas son resonantes en la frecuencia de

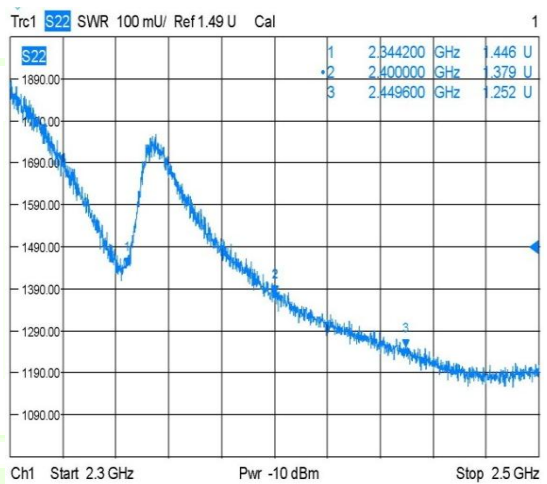
trabajo. Es importante resaltar que estas medidas se tomaron en ambientes no controlados lo cual podría generar interferencia con la antena.

- **SWR o ROE (Antenna emisora/Antenna receptora):** La relación de la onda estacionaria, se muestra en un plano cartesiano, el cual se relacionan el cociente del *SWR* y las frecuencias

**Figura 49. SWR (antenna receptora)**



**Figura 50. SWR (antenna emisora)**



Las gráficas anteriores muestran la relación de la onda estacionaria de la antena emisora y la antena receptora, para una frecuencia de 2,4 [GHz], con valores de 1,348 [U] y 1,379 [U] respectivamente. Cuando el  $SWR=1$ , se dice que toda la energía es transmitida, si por el contrario el  $SWR=\infty$ , se dice que toda la energía es reflejada.

El rango de valores ROE se encuentra entre  $1 - \infty$ . Con base en los resultados se pudo concluir que debido a que los valores de SWR de las *antennas* se acercan a 1 en la frecuencia de operación 2,4 [GHz], estas operan satisfactoriamente transmitiendo la mayor parte de la energía.

## 6.9. ETAPA 9: IMPLEMENTACIÓN DEL SERVIDOR.

En esta etapa se estableció la necesidad de utilizar una tarjeta de desarrollo, encargada del tratamiento de la información recibida en el edificio de ingeniería civil, a través de ella se realizó la implementación del servidor y el apropiado manejo de los datos, mediante el cual se hizo posible su posterior visualización. A continuación se presenta la selección de la tarjeta, posteriormente se describe su función dentro de este proyecto.

- **Tarjeta de desarrollo:** Es una plataforma de evaluación y desarrollo de bajo costo, la cual posee un procesador o un microcontrolador, resultando útil para proyectos de instrumentación, robótica o cualquier prototipo a diseñar. Aquí se presenta 3 tipos de tarjetas usuales en el mercado: *Arduino*, *Raspberry Pi* y *BeagleBoard*.

- **Arduino:** es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios. El hardware consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida. Los microcontroladores más usados son el Atmega168, Atmega328, Atmega1280 y ATmega8 por su sencillez y bajo coste que permiten el desarrollo de múltiples diseños. Las placas se pueden montar a mano o adquirirse. El entorno de desarrollo integrado libre se puede descargar gratuitamente. Las pcb's están diseñadas con una amplia variedad de sensores sin necesidad de circuitería externa resultando ser adecuada para principiantes [\[43\]](#).

El Arduino soporta periféricos *plug-in* llamados "escudos" que incluyen la capacidad de conectarse a *Ethernet*, pero el acceso a las funciones de red es bastante limitado.

**Figura 51.** Tarjeta arduino UNO



Fuente: Arduino uno. Disponible a octubre 1-2014 en: <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno#>

- **Raspberry pi:** es un ordenador de placa reducida o placa única (SBC) y bajo coste. Contiene un procesador central (CPU) ARM1176JZF-S a 700 MHz, procesador gráfico (GPU) VideoCore IV, y 512 MiB de memoria RAM, posee dos entradas USB, conexión Ethernet, salida de audio, salida de video RCA (La que ocupan los DVD y las consolas antiguas) además de tener una salida HDMI de 1080fps a 30 fps. El *Raspberry Pi* usa mayoritariamente sistemas operativos basados en el núcleo Linux. *Raspbian*, una distribución derivada de *Debian* que está optimizada para el hardware de *Raspberry Pi* [44]

**Figura 52.** Tarjeta Raspberry Pi



Fuente: Noticias de raspberry-pi. Disponible a octubre 1-2014 en: <http://computerhoy.com/noticias/hardware/que-es-raspberry-pi-donde-comprarla-como-usarla-8614>

- **BeagleBoard:** Tarjeta de alto rendimiento y baja potencia, con software libre. Salida de vídeo que se proporciona a través de distintas conexiones con un puerto *ethernet* para la comunicación en red y un puerto USB 2.0 para la comunicación con otros dispositivos [45].

**Figura 53.** Tarjeta BeagleBoard



Fuente: Interactive Dynamics Openhacks. Disponible a octubre 1-2014 en: [http://www.openhacks.com/page/productos/id/65/title/BeagleBone#.VEROK\\_mG](http://www.openhacks.com/page/productos/id/65/title/BeagleBone#.VEROK_mG)

Universidad  
Industrial de  
Santander

**Tabla 33:** Características tarjetas de desarrollo

Name	Arduino Uno	Raspberry Pi	BeagleBone
Model Tested	R3	Model B	Rev A5
Price	\$29.95	\$35	\$89
Size	2.95"x2.10"	3.37"x2.125"	3.4"x2.1"
Processor	ATMega 328	ARM11	ARM Cortex-A8
Clock Speed	16MHz	700MHz	700MHz
RAM	2KB	256MB	256MB
Flash	32KB	(SD Card)	4GB(microSD)
EEPROM	1KB		
Input Voltage	7-12v	5v	5v
Min Power	42mA (.3W)	700mA (3.5W)	170mA (.85W)
Digital GPIO	14	8	66
Analog Input	6 10-bit	N/A	7 12-bit
PWM	6		8
TWI/I2C	2	1	2
SPI	1	1	1
UART	1	1	5
Dev IDE	Arduino Tool	IDLE, Scratch, Squeak/Linux	Python, Scratch, Squeak, Cloud9/Linux
Ethernet	N/A	10/100	10/100
USB Master	N/A	2 USB 2.0	1 USB 2.0
Video Out	N/A	HDMI, Composite	N/A
Audio Output	N/A	HDMI, Analog	Analog

Fuente: Arduino UNO vs Beagle Bone vs Rasperry Pi, Disponible a septiembre 13-2014 en: <http://makezine.com/2013/04/15/arduino-uno-vs-beaglebone-vs-rasperry-pi/>

En la tabla 33 se observan las características de las tarjetas anteriormente mencionadas:

- En términos de precio la plataforma *Beagle Bone* es la más costosa sin embargo es la que ofrece mayores prestaciones.
- A pesar de las similitudes de velocidad de reloj las pruebas realizadas con *Beagle Bone* son aproximadamente el doble de rápidas respecto a las pruebas realizadas con *Rasperry Pi*
- *Arduino* es muy simple en diseño y puede ejecutar un programa a la vez mientras que *Beagle Bone* y *Rasperry Pi* puede realizar actividades multitarea y en paralelo.

- *Beagle Bone* y *Rasperry* pueden realizar cambios de tarjetas de memoria, es decir se pueden tener múltiples configuraciones y montajes sobre diferentes tarjetas, requiriéndose un sencillo cambio de tarjeta para una determinada configuración.
- *Beagle Bone* presenta mayor cantidad de interfaces para variedad de aplicaciones: CAN bus, 92 puntos de conexión, bus SPI ,4 temporizadores, 5 puertos serie, 65 pines GPIO, 8 salidas PWM, 7 entradas analógicas (1.8 [V] max, convertidores de 12 bits A / D).

Con base al análisis anterior, se decidió optar por el uso de la tarjeta *Beagle Bone*, a la cual se le configuró una dirección *ip* estática con el propósito de alojar allí los datos provenientes de la red de sensado y comunicación. Además, a través de ella, se lograron enlazar los datos provenientes del microcontrolador a una base de datos (*MySQL*). (Para observar el código desarrollado para la creación de la base de datos, ver anexo D)

#### **6.10. ETAPA 10: DESARROLLO DE LA INTERFAZ GRAFICA**

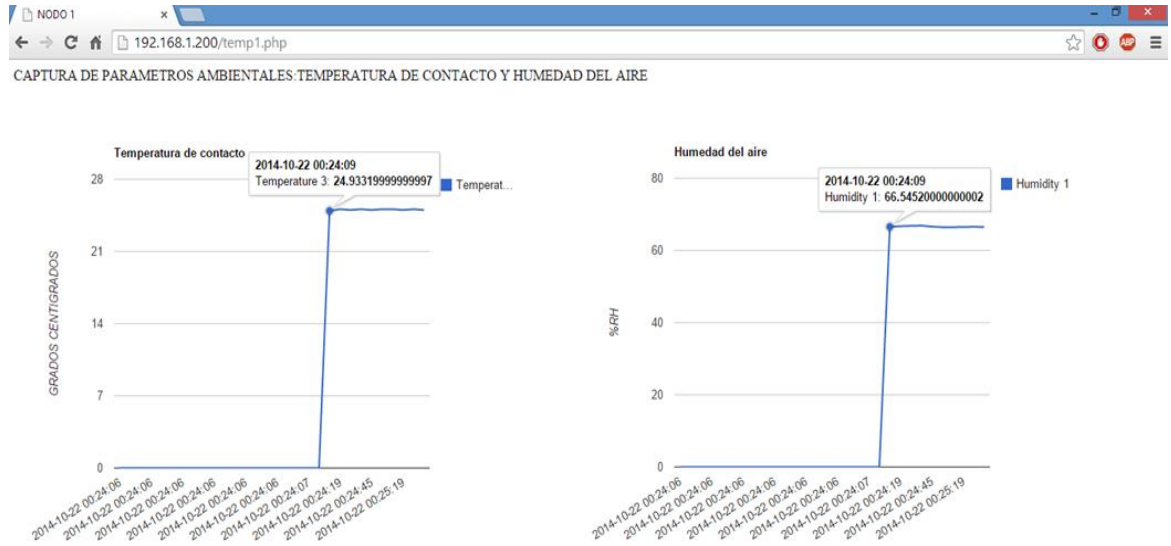
Mediante el lenguaje de programación PHP se desarrolló un programa web a través del cual se muestran gráficamente los parámetros sensados por cada nodo. (Para observar el código desarrollado, ver anexo E)

#### **6.11. ETAPA 11: TRANSMISIÓN DE LOS DATOS**

Esta etapa es la fase final del proyecto en la cual se integraron cada una de las etapas anteriores, se realizó la recopilación, envío, recepción y visualización de los datos.

A continuación se presenta la visualización de los parámetros sensados, a través de una página web.

**Figura 54:** Visualización página web para el nodo 1



Los datos provenientes de los nodos 2, 3 y 4, se encuentran alojados en las siguientes direcciones:

- NODO 2: <http://192.168.1.200/temp2.php>
- NODO 3: <http://192.168.1.200/temp3.php>
- NODO 4: <http://192.168.1.200/temp4.php>

## 7. CONCLUSIONES

- Al momento de hacer las mediciones con el analizador vectorial se comprobó que la antena no estaba resonando a la frecuencia con que se pretendía trabajar, debido a esto fue necesario la construcción de una nueva antena que cumpliera con los requerimientos de frecuencia, se recomienda que al trabajar con antenas guía-onda tipo *cantenna* ser precavidos en las mediciones de las dimensiones de la lata.
- Trabajar con antenas direccionales, requiere precisión en el momento de orientarlas. La falla en la orientación puede ocasionar que los datos se pierdan, esto se debe a que en este tipo de antenas, la energía se concentra en un punto, aumentando la potencia de transmisión en esa dirección.
- Se pudo comprobar que al trabajar con dispositivos Xbee configurados como *router*, no se debe activar el modo de bajo consumo (*sleep mode*) ya que en el eventual caso en el que un dispositivo se encuentre fuera del alcance del módulo concentrador y este le solicite información, el módulo *router* requerirá estar siempre activo, así podrá establecer una ruta que le permita cumplir con su objetivo. Si algún módulo se encuentra apagado en el momento de la falla, éste no hallará una ruta y se perderá la información si no existe una ruta alternativa por medio de otro módulo *router*.
- El sensor de humedad es muy sensible a los cambios presentados en el ambiente, razón por la cual su calibración se convierte en un proceso complicado y que exige mucha precisión. Se recomienda realizar las lecturas de humedad con un sensor que entregue sus datos de manera

digital puesto que al ser un sensor capacitivo, las capacitancias parásitas provenientes del circuito impreso y campos eléctricos aledaños afectan la medición.

- A la hora de realizar el envío y recepción dentro de una red de comunicación, las redes tipo *mesh* se presentan como las redes idóneas, ya que permiten el enlace de cientos de dispositivos, asegurando el tránsito de la información a través de todos los dispositivos que la componen. En contraposición, las redes tipo punto-punto, de árbol y de estrella, se ven limitadas en el número de dispositivos y en la manera en que se direcciona la información, posibilitando pérdidas de paquetes en caso de que algún dispositivo de la red falle.
- La etapa de acondicionamiento de señal que se implementó para medir la temperatura de contacto, permite el acople de RTD's con aletas captadoras que sensan la temperatura del aire en el ambiente, así como RTD's tipo capsula para sensado en superficies, como sensores de contacto.

Universidad  
Industrial de  
Santander

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Vitoria Núñez César (2009). Análisis comparativo de tecnologías inalámbricas. 203-212
- [2] Zigbee Wireless Standard. Disponible a Ene-30-2014 en: <https://www.digi.com/technology/rf-articles/wireless-zigbee>
- [3] Zigbee Specification FAQ. Disponible a Ene-30-2014 en: <http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBee/FAQ.aspx>
- [4] Understanding ZigBee. Disponible a Sep-26.2014 en: <http://www.zigbee.org/About/UnderstandingZigBee.aspx>
- [5] ZigBee Specification. Disponible a Sep-26.2014 en: <http://www.zigbee.org/Specifications.aspx>
- [6] Barneda Faudot Iván (2008). Zigbee aplicado a la transmisión de datos de sensores biomédicos. Disponible a Sep-26-2014 en: <http://www.recercat.net/bitstream/handle/2072/13081/pfc%20ivan%20barneda.pdf?sequence=1>
- [7] Oyarce Andrés (2010). Guía del usuario: XBEE Series 1. Disponible a Sep-26.2014 en: [http://www.olimex.cl/pdf/Wireless/ZigBee/XBee-Guia\\_Usuario.pdf](http://www.olimex.cl/pdf/Wireless/ZigBee/XBee-Guia_Usuario.pdf)
- [8] Navarro Muños José (2013). Control inalámbrico basado en redes inalámbricas de sensores mediante módulos XBEE. Disponible a Ene-30-2014 <http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/3476/1/pfc5207.pdf>
- [9]. Nicholas, J. V., White, D. R. (1994). Traceable Temperatures: An introduction to temperatura measurement and calibration.

- [10] Cromer Alan (1988). Física en la ciencia y en la industria
- [11] Fernandez Cortez Angel (2005). Caracterización microclimática de cavidades y análisis de la influencia entrópica de uso turístico.
- [12] Antonio Creus Solé (2011). Instrumentación Industrial
- [13] R.Gliessman Stephen (1998). Procesos ecológicos en agricultura sostenible.
- [14] Serna Ruiz Antonio, Antonio Ros Francisco, Rico Juan Carlos (2010). Guia Práctica De Sensores Editorial: Creaciones Copyright.
- [15] Jara N. Secado Luis Fernando (1997). Procesamiento Y Almacenamiento De Semillas Forestales.
- [16] Ros Marin Joan Antoni (2011). "Sistemas eléctricos De Seguridad Y Confortabilidad"
- [17] Cardama Aznar Angel, Jofre Roca Lluís, Rius Casals Juan, Romeu Robert Jordi, Boris Sebastian, Bataller Miguel. Antenas (2004)
- [18] Wayne Tomasi (2003). Sistemas de comunicaciones electrónicas.
- [19] Flicker Rob (2006). Redes inalámbricas en los países en desarrollo. Disponible a Mayo-12-2014 en: <http://wndw.net/pdf/wndw-es/chapter4-es.pdf>
- [20] Wade Paul (1999). The W1GHZ Online Microwave Antenna Book W1GHZ. Disponible a Sept-30-2014 en: <http://www.qsl.net/n1bwt/chap6-3.pdf>
- [21] Atis Tirma (2001). Brico wifi I, Antena Pringles (Cantena). . Disponible a Mayo-12-2014 en:

[http://www.zero13wireless.net/wireless/Antenas/Antena\\_Pringles\\_Cantenna/Manual\\_paso\\_a\\_paso\\_Antena\\_Pringles.pdf](http://www.zero13wireless.net/wireless/Antenas/Antena_Pringles_Cantenna/Manual_paso_a_paso_Antena_Pringles.pdf)

[22] Carvallar Jose (2007). Instalacion, seguridad y aplicaciones.

[23] Cardama Aznar Angel, Jofre Roca Lluís, Rius Casals Juan, Jordi Romeu Robert, Boris Sebastian, Bataller Miguel (2004). Antenas

[24] Rohde & Schwarz (2008). Analizador de Redes Vectoriales: Guía rápida.

[25] Albarracín Julián (2008). Servicio basado en localización y gis para la lectura registro de señales usando el kit sun spot con tecnología zigbee. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico, Universidad Industrial de Santander.

[26] Ballesteros Biviana, Chaparro Silvia (2008). Aplicación web para la captura, monitoreo y análisis de datos transmitidos a través de redes de sensores inalámbricos utilizando tecnología Zigbee. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander.

[27] Jácome Erik, Muñoz Luis (2009). Diseño, implementación y caracterización de una red de sensores zigbee para la monitorización de contadores de energía digitales en una red de distribución de baja tensión. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico, Universidad Industrial De Santander.

[28] Morgalo, Belkis. Módulo inalámbrico para redes de sensores biomédicos. Disponible a Ene24-2013 en: <http://www.fcencias.uaslp.mx/archivos/premiosDES2009/LICENCIATURA-C.Aplicada-MENDEZ-DELGADO.pdf>

[29] Mendez Gerardo, Zigbee y sus aplicaciones en el monitoreo y control de proceso a distancia, julio 2009 Disponible a ene24-2013 en:

<http://www.fciencias.uaslp.mx/archivos/premiosDES2009/LICENCIATURA-C.Aplicada-MENDEZ-DELGADO.pdf>

[30] Iberico Roberto (2001), Diseño de un sistema de seguridad basado en una red actuador-sensor zigbee con soporte en la wlan de un edificio de departamento. Disponible a ene24-2013 en: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/523>

[31] Xbee DigiMesh 2,4. Disponible a Sept-10-2013 en: <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/zigbee-mesh-module/xbee-digimesh-2-4#models>

[32] Sensor resistivos. Disponible-1-octubre, en: <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Tutorial/TECNO2.pdf>

[33] Yemlahi Naoual (2009). Proyecto final de carrera. Disponible a sept-6-2014 en: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/9280/1/Mem%C3%B2ria.pdf>

[34] Tomado de: Baterías, motores y condensadores, Disponible Septiembre 18-2014 en: [http://www.portaleso.com/portaleso/trabajos/tecnologia/ele.yelectro/t3\\_baterias,dinamos,motores\\_y\\_condensadores.pdf](http://www.portaleso.com/portaleso/trabajos/tecnologia/ele.yelectro/t3_baterias,dinamos,motores_y_condensadores.pdf)

[35] Heins Dietsche Karl (2005). Manual de la técnica del automóvil

[36] TEXAS INSTRUMENTS, Reg113na-3.3/3k Datasheet. Disponible a Sept-09-2014 en: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/reg113-33.pdf>

[37] HUMIRIEL, Relative humidity sensor. Disponible a Sept-09-2014 en: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/humirel/HS1100.pdf>

[38] TEXAS INSTRUMENTS, TLC555-Q1 Datasheet .Disponible a Agosto 5-2014 en: <http://www.ti.com/product/TLC555-Q1?keyMatch=tlc555&tisearch=Search-EN>

[39] Escuela técnica en ingeniería. Disponible a agosto-23-2014 en: [http://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion\\_5\\_IT/IEC\\_6.pdf](http://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion_5_IT/IEC_6.pdf)

[40] MICROCHIP, AN687 Precision temperatura-sensing with RTD circuits. Disponible a Sep-09-2014 en: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00687c.pdf>

[41] TEXAS INSTRUMENTS, Microcontrolador MSP430F5529 Datasheet. Disponible Agosto-5-2014 en: <http://www.ti.com/product/msp430f5529?keyMatch=MSP430F5529&tisearch=Search-EN>

[42] Shahin Farahani (2008). *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*, Newnes. Disponible a Octubre 11 de 2014 en: <http://bbs.armfly.com/m/index.php?a=job&action=download&aid=1167&tid=996>

[43] Arduino uno. Disponible a Agosto-3-1014 en: <http://www.arduino.cl/int/caracteristicas.html>

[44] Características de raspberry pi. Disponible a Agosto-5-2014 en: <http://arstechnica.com/gadgets/2012/02/raspberry-pi-retailers-toppled-by-demand-as-35-linux-computer-launches/>

[45] TEXAS INSTRUMENTS, BeagleBone Black Datasheet. Disponible a Octubre-09-2014 en: <http://www.ti.com/tool/beaglebk?keyMatch=BEAGLEBONE%20BLACK&tisearch=Search-EN>

## BIBLIOGRAFÍA

ALBARRACÍN Julián. Servicio basado en localización y gis para la lectura registro de señales usando el kit sun spot con tecnología zigbee. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, 2008.

BALLESTEROS Biviana, CHAPARRO Silvia. Aplicación web para la captura, monitoreo y análisis de datos transmitidos a través de redes de sensores inalámbricos utilizando tecnología Zigbee. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniería de Sistemas. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, 2008.

DIGI INTERNATIONAL. Zigbee: Low.cost, low-power, wireless networking for device monitoring and control [Minnetonka, United States]. Digi International Inc, 1996-2014 [Cited January-30-2014]. Available from internet: URL:<https://www.digi.com/technology/rf-articles/wireless-zigbee>

FLICKER Rob. Redes inalámbricas en los países en desarrollo. Copenhagen. Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0, 2013.

JÁCOME Erik, MUÑOZ Luis. Diseño, implementación y caracterización de una red de sensores zigbe para la monitorización de contadores de energía digitales en una red de distribución de baja tensión. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico. Bucaramanga. Universidad Industrial De Santander, 2009.

OYARCE Andrés. Guía del usuario: XBEE Series 1. Santiago de Chile. MCI Ltda, 2010.

WAYNE, Tomasi. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. México. Prentice Hall, 2003.



ANEXO A

ESQUEMÁTICOS Y NEGATIVOS DE LAS TARJETAS

Figura 55. Circuito acondicionador de humedad (Esquemático)

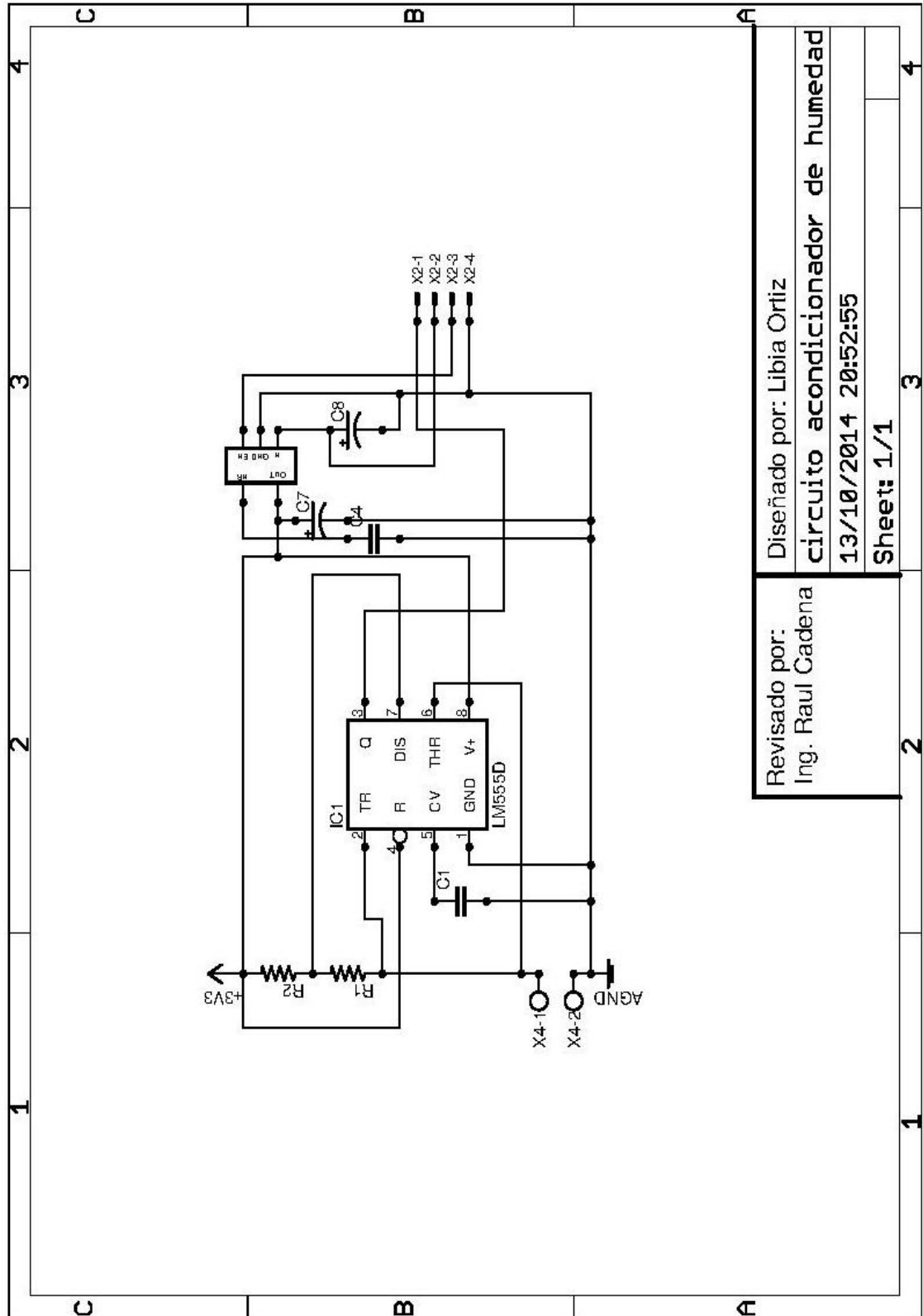
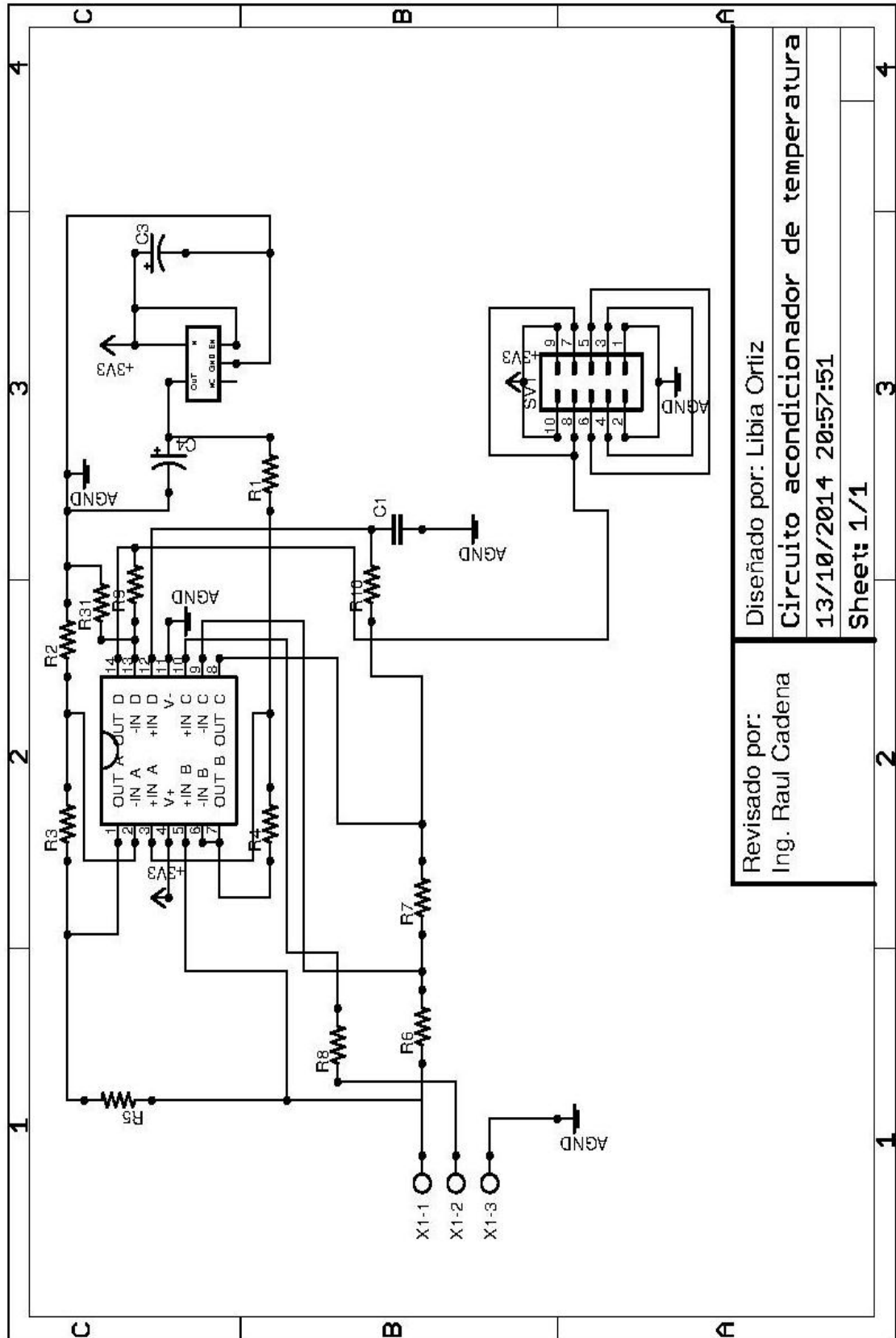


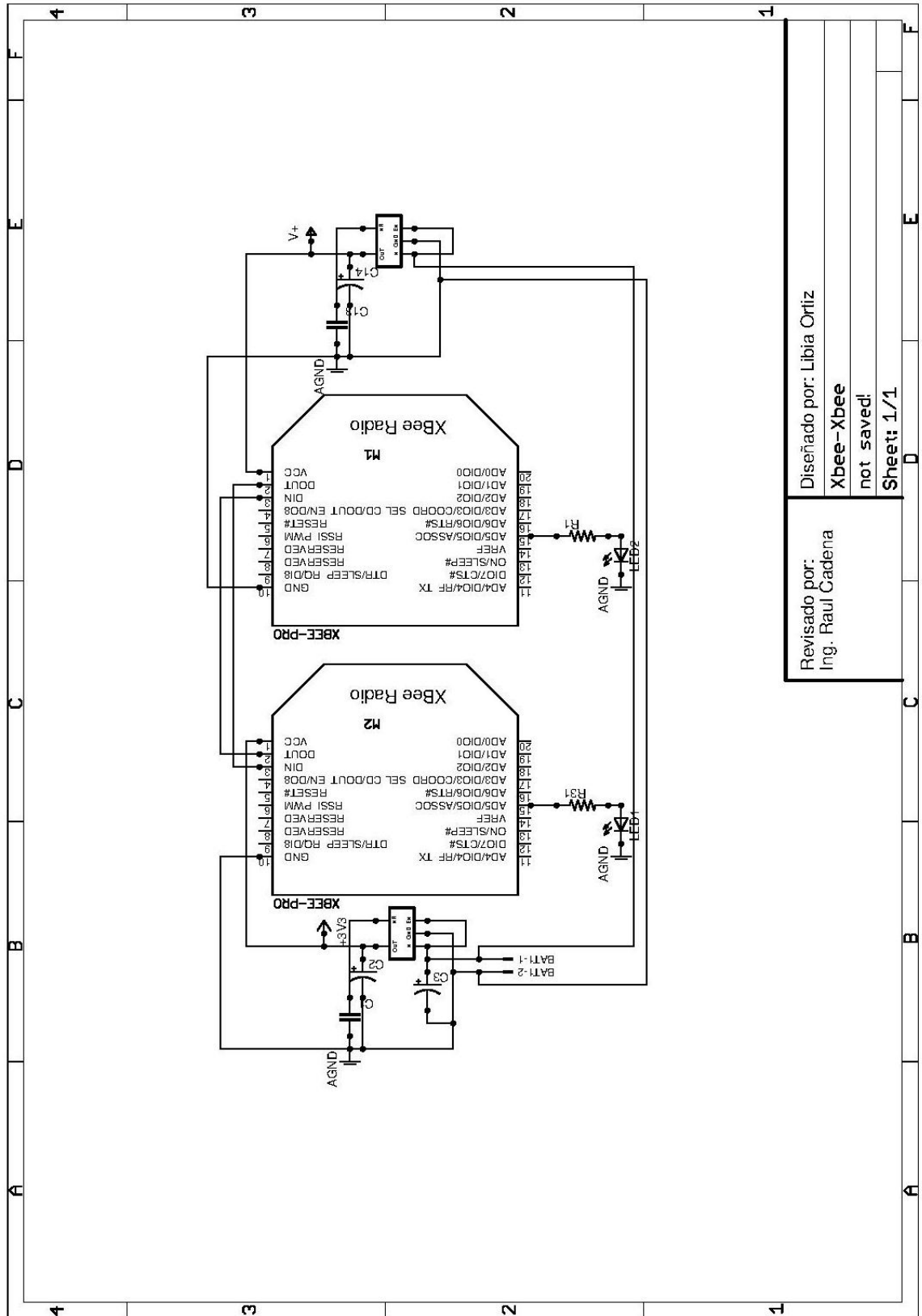
Figura 56. Circuito acondicionador de temperatura (Esquemático)



Revisado por: Ing. Raul Cadena	Diseñado por: Libia Ortiz
Circuito acondicionador de temperatura	
13/10/2014 20:57:51	
Sheet: 1/1	

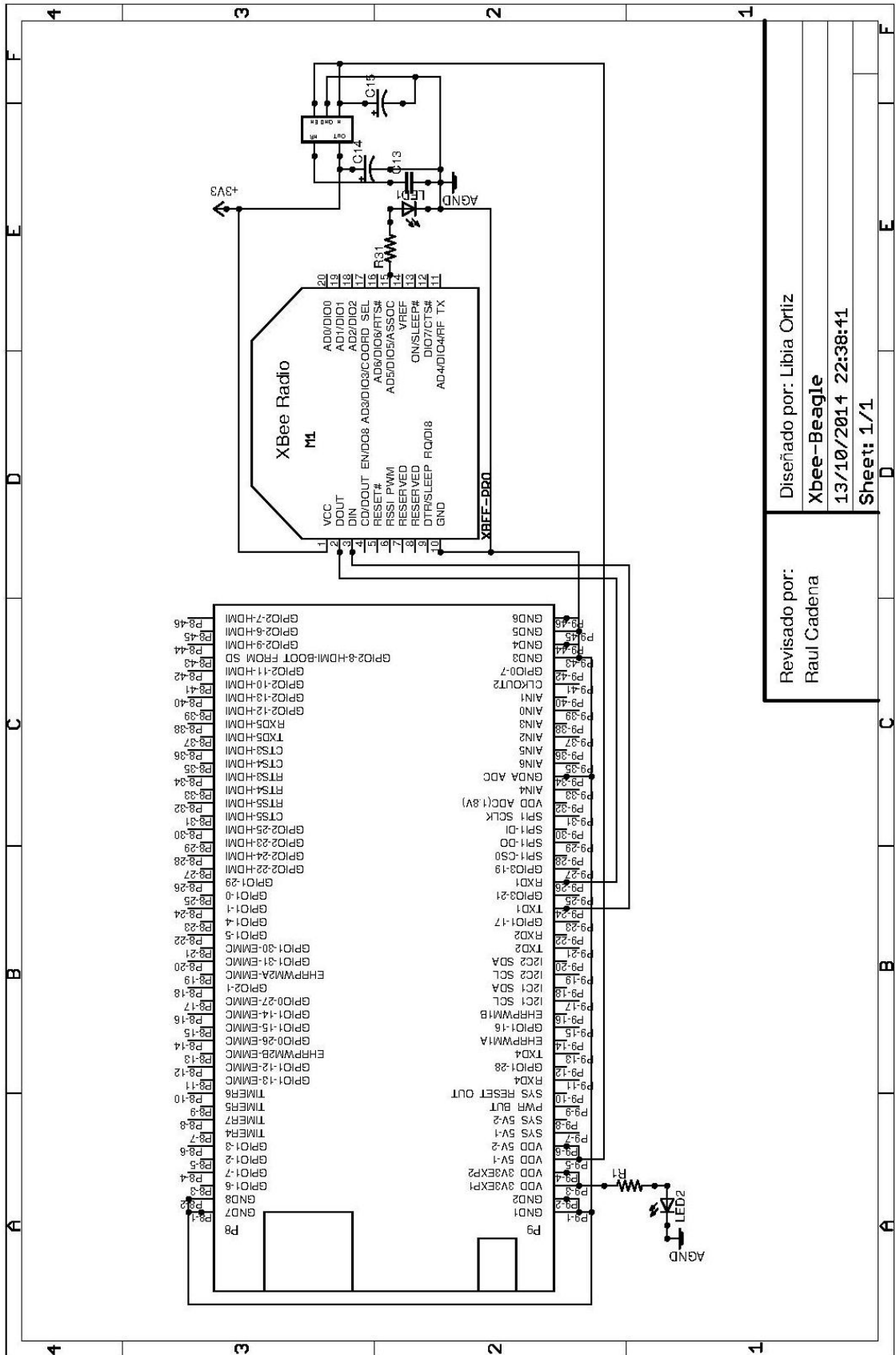


Figura 58. Módulo repetidor Xbee-Xbee (Esquemático)



Revisado por:	Diseñado por: Libia Ortiz
Ing. Raul Cadena	Xbee-Xbee
	not saved!
	Sheet: 1/1

Figura 59. Xbee-Beagle (Esquemático)

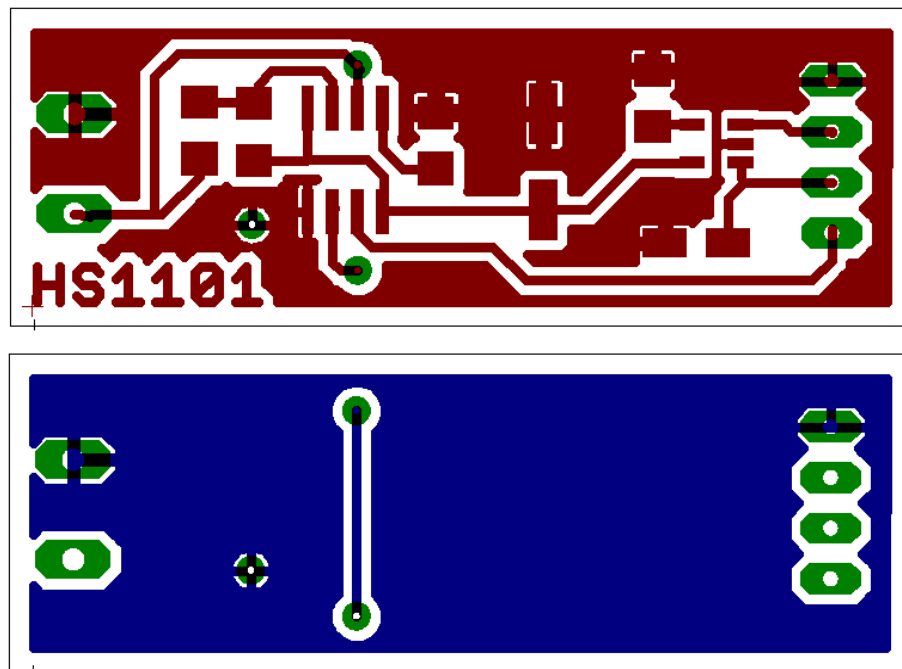


Diseñado por: Libia Ortiz  
 Xbee-Beagle  
 13/10/2014 22:38:41  
 Sheet: 1/1

Revisado por:  
 Raul Cadena

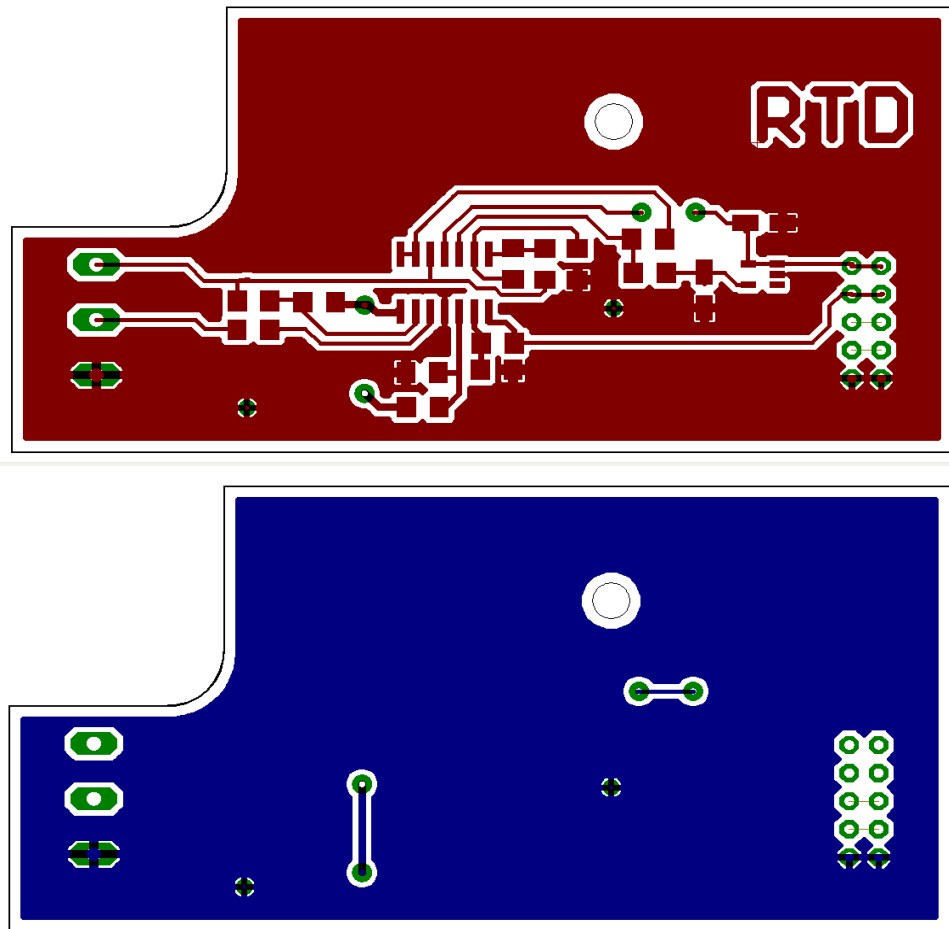
**Nota:** Todas las imágenes se encuentran escaladas

**Figura 60.** Layout circuito acondicionador de humedad (Top-rojo/Bottom-azul)



Universidad  
Industrial de  
Santander

**Figura 61.** Layout Circuito acondicionador de temperatura (Top-rojo/Bottom-azul)



**Figura 62.** Layout módulo repetidor Xbee-Xbee (Top-rojo/Bottom-azul)

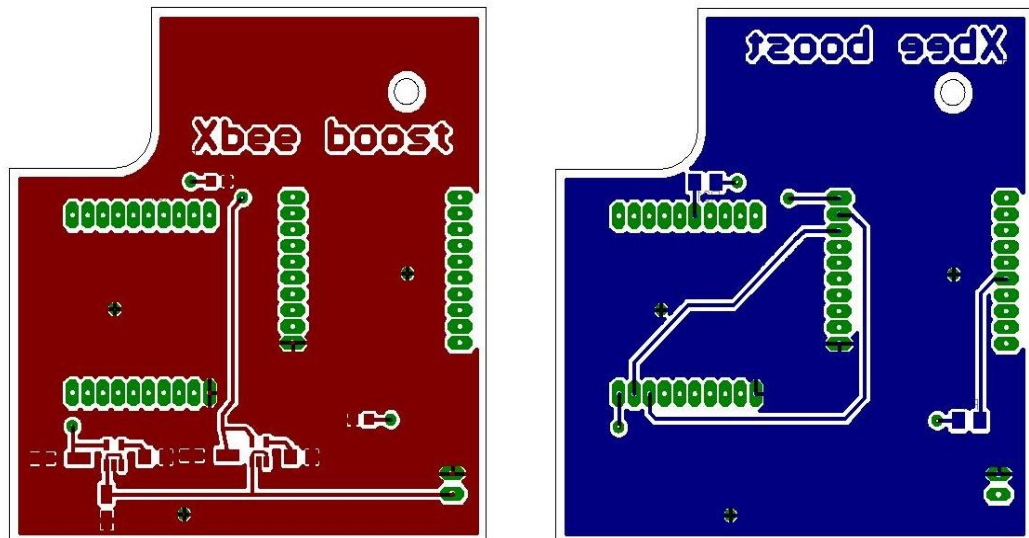
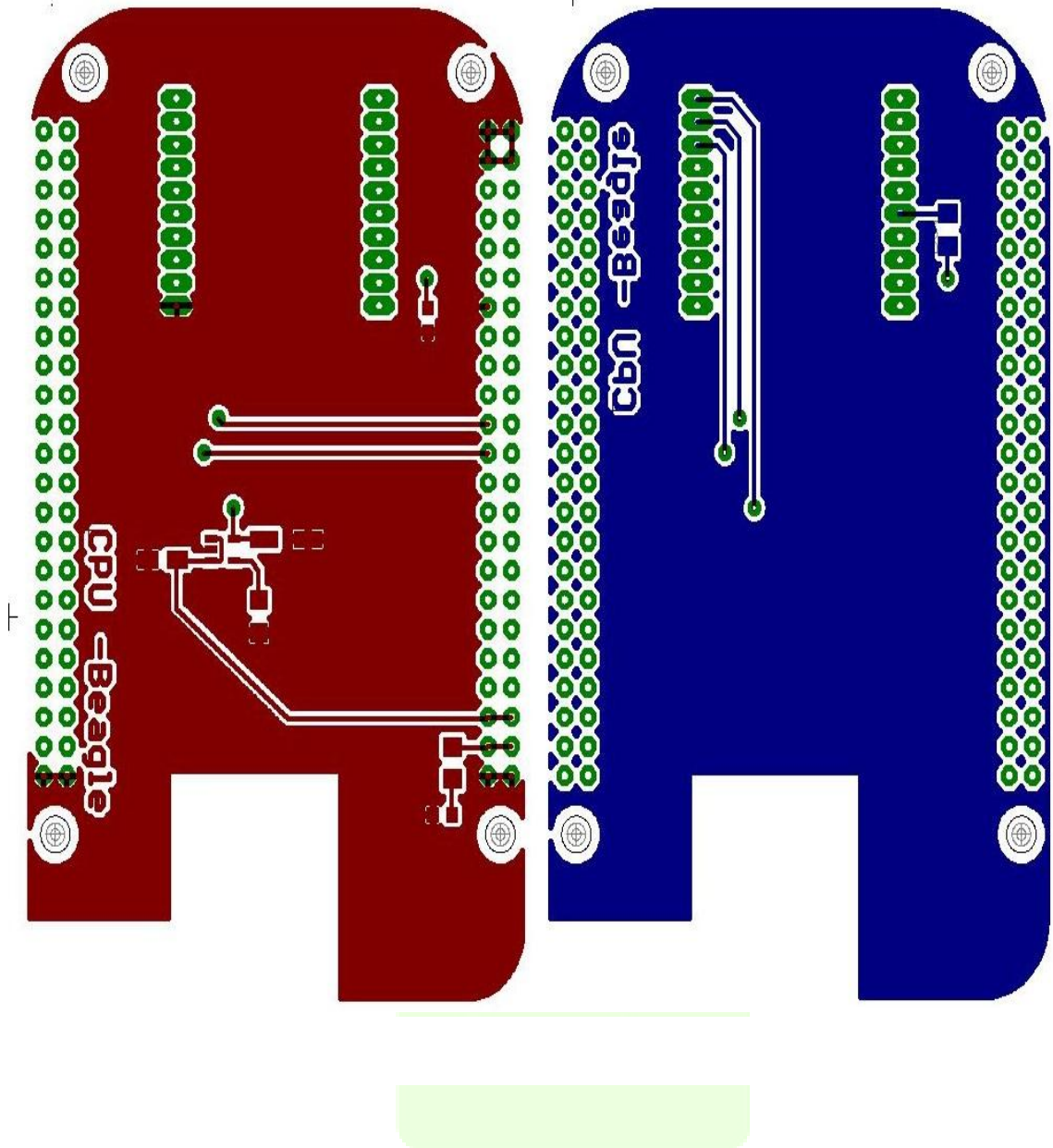


Figura 63. Xbee-Beagle (Top-rojo/Bottom-azul)





```

// Cada vez que haya un pulso en la interrupción, se incrementará este contador
void ticks2 ()
{
  hum2++;
}

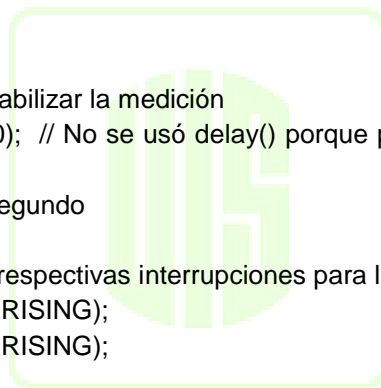
// Función que lee humedad de los lectores
void humidity()
{
  unsigned long th;
  // Poner el conteo de ticks en 0
  hum1 = 0;
  hum2 = 0;
  th = millis();
  // Activar los sensores
  digitalWrite(pin_ehum1, HIGH);
  digitalWrite(pin_ehum2, HIGH);
  // Esperar dos segundos para estabilizar la medición
  do t = millis(); while ((t-th) < 2000); // No se usó delay() porque puede que las interrupciones
alteren resultados
  // Realizar la lectura durante un segundo
  th = millis();
  // Poner los pines de humedad a respectivas interrupciones para los conteos
  attachInterrupt(pin_hum1, ticks1, RISING);
  attachInterrupt(pin_hum2, ticks2, RISING);
  // Esperar 1 segundo
  do t = millis(); while ((t-th) < 1000);
  // Deshabilitar las interrupciones anteriores
  detachInterrupt(pin_hum1);
  detachInterrupt(pin_hum2);
  // Deshabilitar los sensores
  digitalWrite(pin_ehum1, LOW);
  digitalWrite(pin_ehum2, LOW);

  // Calcular la frecuencia
  float frec = (float)(hum1)/(float)(t-th);
  frec1 = (unsigned int) frec;
  frec = (float)(hum2)/(float)(t-th);
  frec2 = (unsigned int) frec;
}
// ** FUNCIÓN DE CONFIGURACIÓN DE LOS MÓDULOS DEL MICROCONTROLADOR
*****

void setup()
{
  Serial1.begin(9600);

  // HUMEDAD: Habilitadores
  pinMode(pin_ehum1, OUTPUT);
  pinMode(pin_ehum2, OUTPUT);
  // Entradas de frecuencia del sensor de humedad

```



```

pinMode(pin_hum1, INPUT);
pinMode(pin_hum2, INPUT);

// DIR (dipswitch)
int i;
for (i=0; i < 8; i++)
    pinMode(pins_dir[i], INPUT_PULLUP);

// Habilitador XBEE
pinMode(pin_hab_xbee, OUTPUT);

t = ta = millis();

interrupts();

}
// ** PROGRAMA PRINCIPAL *****
void loop()
{
    unsigned char dir = 0;
    unsigned int t1, t2, t3;
    unsigned int i1, i2, i3;
    unsigned int f1, f2;
    unsigned char crc = 0;

    int i;
    // Construir el dir a base de los dipsw
    // Tener en cuenta que:
    // (digitalRead(pins_dir[i])?1:0) <-- hace que el valor devuelto obligatoriamente sea 1 o 0
    // El operador A << X desplaza a A en X numero de bits hacia la izquierda
    // El operador |= hace un or bit a bit y lo asigna a la misma variable (mismo que dir = dir |
    COSA)
    for (i=0; i < 8; i++)
        dir |= (digitalRead(pins_dir[i])?1:0) << i;

    // Leer entradas analógicas
    t1 = analogRead(pin_temp1);
    t2 = analogRead(pin_temp2);
    t3 = analogRead(pin_temp3);
    i1 = analogRead(pin_ilu1);
    i2 = analogRead(pin_ilu2);
    i3 = analogRead(pin_ilu3);

    // Leer frecuencias
    humidity();
    f1 = frec1;
    f2 = frec2;
    // Formato inicial
    //          A, DIR, TMP1, TMP1, TMP1, ILU1, ILU2, ILU3, HUM1, HUM2,
    sprintf(str, size_str, "A,%.3u,%.4u,%.4u,%.4u,%.4u,%.4u,%.4u,%.4u,%.5u,%.5u,",

```

```

        (unsigned int)dir,
        t1,t2,t3,
        i1,i2,i3,
        f1,f2);

// Hacer CRC8 de XOR bit a bit de todo el mensaje
// Recordar que ^= es la operacion XOR bit a bit
int l = strlen(str);
for (i=0; i < l; i++)
    crc ^= (unsigned char)str[i];

// Formato final

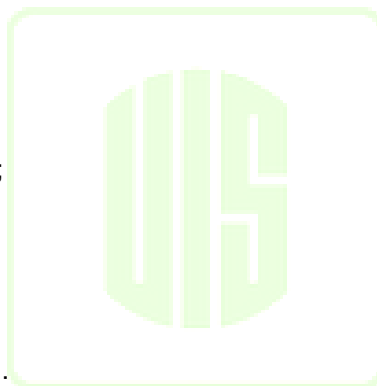
sprintf(det, 10, "%.3u\x0A\x0D",
        (unsigned int)crc);
strcat(str,det);

//unsigned long tm = millis();
// Activar el Xbee
digitalWrite(pin_hab_xbee, LOW);
// Esperar 500 ms
delay(500);
Serial1.print(str);
delay (100);
// Desactivar el Xbee
digitalWrite(pin_hab_xbee, HIGH);

// Esperar a que pasen 5 segundos
delay (5000);

ta = t;
}

```



## ANEXO C

**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS XBee/XBee-PRO 2.4 DigiMesh**  
**Tabla 34: Especificaciones técnicas XBee/XBee-PRO 2.4 DigiMesh**  
**Specifications of the XBee/XBee-PRO 2.4 DigiMesh**

The following table discusses the hardware and mechanical specifications of the XBee-PRO DigiMesh 2.4 RF Module:

Specification	XBee	XBee-PRO
<b>Performance</b>		
Indoor/Urban range	Up to 100 ft. (30 m)	Up to 300 ft. (90 m), up to 200 ft. (60 m) Intl. variant
Outdoor RF line of sight range	Up to 300 ft. (90 m)	Up to 1 mile (1.5 km), w/ 2.0 dB dipole antenna Up to 6 miles (10 km) w/ high gain antenna
Transmit power output	1 mW (0 dBm)	63 mW (18 dBm)* 10 mW (10 dBm) for international variant
RF data rate	250 kbps	250 kbps
Serial interface data rate (software selectable)	1200 bps - 250 kbps (non-standard baud rates also supported)	1200 bps-250 kbps (non-standard baud rates also supported)
Receiver sensitivity	-92 dBm (1% packet error rate)	-100 dBm (1% packet error rate)
<b>Power requirements</b>		
Supply voltage	2.8 - 3.4 VDC	2.8 - 3.4 VDC
Transmit current	45 mA (@ 3.3 V)	250 mA (@ 3.3 V) (150 mA for international variant) RPSMA module only: 340 mA (@ 3.3 V) (180 mA for international variant)
Idle / Receive current	50 mA (@ 3.3 V)	55 mA (@ 3.3 V)
Power down current (pin sleep)	<10 µA	<10 µA
Power down current (cyclic sleep)	<50 µA	<50 µA
<b>General</b>		
Operating frequency band	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
Dimensions	0.960" x 1.087" (2.438 cm x 2.761 cm)	0.960" x 1.297" (2.438 cm x 3.294 cm)
Operating temperature	-40 to 85 °C (Industrial), 0 to 95% non-condensing	-40 to 85 °C (Industrial), 0 to 95% non-condensing
Antenna options	1/4 wave wire antenna, embedded PCB antenna, RPSMA RF connector, U.FL RF connector	1/4 wave wire antenna, RPSMA RF connector, U.FL RF connector
<b>Network and security</b>		
Supported network topologies	Mesh, point-to-point, point-to-multipoint, peer-to-peer	Mesh, point-to-point, point-to-multipoint, peer-to-peer
Number of Channels (software selectable)	16 direct sequence channels	12 direct sequence channels
Addressing Options	PAN ID, channel and 64-bit addresses	PAN ID, channel and 64-bit addresses
Encryption	128 bit AES	128 bit AES
<b>Agency approvals</b>		
United States (FCC Part 15.247)	OUR-XBEE	OUR-XBEEPRO
Industry Canada (IC)	4214A XBEE	4214A XBEEPRO
Europe (CE)	ETSI	ETSI (max 10dBm transmit power output)*
RoHS	Lead-free and RoHS compliant	Lead-free and RoHS compliant
Japan	R201WW07215214	R201WW08215111* (max. 10 dBm transmit power output)*
Australia	C - Tick	C - Tick

1 See Appendix B for region-specific certification requirements

Fuente: Xbee/Xbee-PRO. DigiMesh 2.4 RF Modules: User Manual.

## ANEXO D

### CÓDIGO FUENTE PARA LA CREACIÓN DE LA BASE DE DATOS

```
#include <mysql.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <unistd.h>
#include <termios.h>
#include <fcntl.h>
#include <sys/signal.h>
#include <sys/types.h>

#define _POSIX_SOURCE 1 /* POSIX compliant source */
#define FALSE 0
#define TRUE 1
#define N_MUEST 30 // Muestras que se desea tomar
#define CAP 4 // Número de puntos de acceso

MYSQL *con = NULL;

/// Prints out a MySQL error message and exits
void error_exit(MYSQL *cond)
{
    fprintf(stderr, "%s\n", mysql_error(cond));

    if (cond != NULL)
    {
        mysql_close(cond);
    }

    exit(1);
}

/// Prints out a MySQL error message and restart
void error_restart()
{
    fprintf(stderr, "%s\n", mysql_error(con));

    if (con != NULL)
    {
        mysql_close(con);
    }

    // Iniciar una conexión a MySQL
    con = mysql_init(NULL);
```

```

        if(con == NULL)
        {
            error_exit(con);
        }

        if (mysql_real_connect(con, "localhost", "bone", "bone", "TempDB", 0, NULL, 0) ==
NULL)
        {
            error_exit(con);
        }
    }

volatile int STOP=FALSE;

void signal_handler_IO (int status); /* definicion de la funcion de respuesta de signal */
int wait_flag=TRUE;          /* TRUE mientras signal no haya sido recibida */

size_t size_str = sizeof("A,000,0000,0000,0000,0000,0000,0000,0000,0000,0000,");
char query[1024];

int main(int argc, const char *argv[])
{
    if( access( "/dev/ttyO1", F_OK ) == -1 ) {
        // Declarar el uso del puerto Serial 1 en la BeagleBone
        system("echo BB-UART1 > /sys/devices/bone_capemgr.8/slots");
        usleep(1000000);
        if( access( "/dev/ttyO1", F_OK ) == -1 ) {printf("No puedo crear /dev/ttyO1\n");
return 1; } // Hay problemas si no existe
    }

    int fd,c, res;
    struct termios oldtio,newtio;
    struct sigaction saio;          /* definicion de la accion de signal */
    char buf[255], aux[255];

    /* Abrir el dispositivo para ser no-obstruivo (las lecturas retornaran inmediatamente) */
    fd = open("/dev/ttyO1", O_RDWR | O_NOCTTY | O_NONBLOCK);
    if (fd <0) {printf("/dev/ttyO1\n"); return 2; }

    /* Instalar la funcion de la signal antes de hacer el dispositivo asincrono */
    saio.sa_handler = signal_handler_IO;
    sigemptyset (&saio.sa_mask); //saio.sa_mask = 0;
    saio.sa_flags = 0;
    saio.sa_restorer = NULL;
    sigaction(SIGIO,&saio,NULL);

    /* permitir al proceso recibir el SIGIO (AKA signal) */
    fcntl(fd, F_SETOWN, getpid());
    /* Hacer el descriptor del archivo asincrono
    O_APPEND y O_NONBLOCK, funcionara con F_SETFL...) */

```

```

fcntl(fd, F_SETFL, FASYNC);

tcgetattr(fd,&oldtio); /* guardar las configuraciones actuales */
/* poner las nuevas configuraciones para entrada canonica */
newtio.c_cflag = /*CRTSCTS */ CS8 | CLOCAL | CREAD;
newtio.c_iflag = IGNPAR | ICRNL;
newtio.c_oflag = 0;
newtio.c_lflag = ECHO | ICANON;
newtio.c_cc[VMIN]=1;
newtio.c_cc[VTIME]=0;
    cfsetispeed(&newtio, B9600);
    cfsetospeed(&newtio, B9600);
tcflush(fd, TCIFLUSH);
tcsetattr(fd,TCSANOW,&newtio);

printf("Serial configurado\n");

// Iniciar una conexion a MySQL
con = mysql_init(NULL);
if(con == NULL)
{
    error_exit(con);
}

// Conectar a MySQL
// Aqui pasamos a:
// host name => localhost
// user name => bone
// password => bone
// database name => TempDB
if (mysql_real_connect(con, "localhost", "bone", "bone", "TempDB", 0, NULL, 0) ==
NULL)
{
    error_exit(con);
}

MYSQL_STMT *stmt[4];
double temp1 = 0.0, temp2 = 0.0, temp3 = 0.0, hum1 = 0.0, hum2 = 0.0;

for(int i = 0; i < CAP; i++)
{
    sprintf(query, "DROP TABLE IF EXISTS TempMeas%d", i+1);
    // Borrar las tablas
    if (mysql_query(con, query))
        error_exit(con);

    sprintf(query, "CREATE TABLE IF NOT EXISTS TempMeas%d(id INT
UNSIGNED NOT NULL AUTO_INCREMENT, MeasTime DATETIME NOT NULL, Temp1
DOUBLE NOT NULL, Temp2 DOUBLE NOT NULL, Temp3 DOUBLE NOT NULL, Hum1
DOUBLE NOT NULL, Hum2 DOUBLE NOT NULL, PRIMARY KEY (id))", i+1);

```

```

// Crear la tabla de la base de datos que se usara
if (mysql_query(con, query))
{
    error_exit(con);
}

for(int j = 0; j < N_MUEST; j++)
{
    sprintf(query, "INSERT INTO TempMeas%d VALUES(%d, NOW(), 0, 0,
0, 0, 0)", i+1, j+1);
    if (mysql_query(con, query))
        error_exit(con);
}

// Iniciar una sentencia dinamica de MySQL
stmt[i] = mysql_stmt_init(con);
if (stmt[i] == NULL)
{
    error_exit(con);
}

// Poner la peticion
int muest = N_MUEST;
sprintf(query, "INSERT INTO TempMeas%d VALUES(%d, NOW(), ?, ?, ?, ?,
?)", i+1, muest);
if (mysql_stmt_prepare(stmt[i], query, strlen(query)))
{
    error_exit(con);
}

// Poner una estructura de relacion en MySQL

MYSQL_BIND bind[5];
for(int j = 0; j < 5; j++)
{
    memset(&bind[j], 0, sizeof(MYSQL_BIND));
    bind[j].buffer_type = MYSQL_TYPE_DOUBLE;
    bind[j].buffer_length = sizeof(double);
    switch(j)
    {
        case 0: bind[j].buffer = (char *)&temp1; break;
        case 1: bind[j].buffer = (char *)&temp2; break;
        case 2: bind[j].buffer = (char *)&temp3; break;
        case 3: bind[j].buffer = (char *)&hum1; break;
        case 4: bind[j].buffer = (char *)&hum2; break;
    }
}

// Bind the data structure to the MySQL statement
if (mysql_stmt_bind_param(stmt[i], bind))

```

```

        {
            error_exit(con);
        }
    }

    printf("Entrando en el bucle\n");
    /* Bucle para esperar datos del Serial */
    while (STOP==FALSE) {
        usleep(100000);
        /* despues de recibir SIGIO, wait_flag = FALSE, hay datos
        y se pueden leer */
        if (wait_flag==FALSE) {
            res = read(fd,buf,255);
            buf[res]=0;
            printf(":%s:%d\n", buf, res);

            // Verificar el CRC
            unsigned int dir, t1, t2, t3, i1, i2, i3, h1, h2, crc;
            strncpy(aux, buf + size_str - 1, 3);
            sscanf(aux, "%u", &crc);

            char crcd = 0;
            // Hacer CRC8 de XOR bit a bit de todo el mensaje en det
            for (int j=0; j <= size_str; j++)
                crcd ^= buf[j];

            if(crc != ((unsigned int)(crcd))) {printf("\n");}

            // sintaxis datos leidos:
            // A, DIR,TMP1,TMP1,TMP1,ILU1,ILU2,ILU3,HUM1,HUM2,CRC
            sscanf(buf, "A,%u,%u,%u,%u,%u,%u,%u,%u,%u,%u", &dir, &t1, &t2,
&t3, &i1, &i2, &i3, &h1, &h2, &crc);

            if(dir >= CAP+1 || dir <= 0) goto failed;

            switch(dir)
            {
            case 1:
                temp1 = ((double)t1)*0.0836 - 228.96;
                temp2 = ((double)t2)*0.0836 - 228.96;
                temp3 = ((double)t3)*0.0836 - 228.96;
                hum1 = ((double)h1)*-0.0532 + 397.13;
                hum2 = ((double)h2)*-0.0532 + 397.13;;
                break;
            case 2:
                temp1 = ((double)t1)*0.0836 - 233.98;
                temp2 = ((double)t2)*0.0848 - 233.98;
                temp3 = ((double)t3)*0.0848 - 233.98;
                hum1 = ((double)h1)*-0.0969 + 676.07;
                hum2 = ((double)h2)*-0.0969 + 676.07;
            }
        }
    }
}

```

```

        break;
    case 3:
        temp1 = ((double)t1)*0.078 - 213.849;
        temp2 = ((double)t2)*0.078 - 213.849;
        temp3 = ((double)t3)*0.078 - 213.849;
        hum1 = ((double)h1)*-0.1002 + 829.87;
        hum2 = ((double)h2)*-0.1002 + 829.87;
        break;
    default:
        temp1 = ((double)t1)*0.075 - 238.25;
        temp2 = ((double)t2)*0.075 - 238.25;
        temp3 = ((double)t3)*0.075 - 238.25;
        hum1 = ((double)h1)*-0.1256 + 853.55;
        hum2 = ((double)h2)*-0.1256 + 853.55;
        break;
    }

    sprintf(query, "DELETE FROM TempMeas%d WHERE id<=1", dir);
    if (mysql_query(con, query))
    {
        printf("Failed UPDATE 2\n");
        error_restart();
        continue;
    }

    sprintf(query, "UPDATE TempMeas%d SET id=id-1 ORDER BY id
ASC", dir);

    if (mysql_query(con, query))
    {
        printf("Failed UPDATE 1\n");
        error_restart();
        continue;
    }
    mysql_stmt_execute(stmt[dir-1]);
failed:

    // Para obtener otro dato
    res = read(fd,buf,255);
    wait_flag = TRUE;
}

}

// Cerrar la conexion MySQL
mysql_close(con);

/* restaurar las configuraciones anteriores */
tcsetattr(fd,TCSANOW,&oldtio);

return 0;
}

```

```
/******  
* signal handler. sets wait_flag to FALSE, to indicate above loop that *  
* characters have been received. *  
*****/  
  
void signal_handler_IO (int status)  
{  
    wait_flag = FALSE;  
}
```



## ANEXO E

### CÓDIGO FUENTE INTERFAZ GRÁFICA

- **NODO 1**

```
<html>
<head>
  <title>NODO 1</title>
  <script type="text/javascript" src="https://www.google.com/jsapi"></script>
  <script type="text/javascript">
    google.load("visualization", "1", {packages:["corechart"]});
    google.setOnLoadCallback(drawChart);
    function drawChart() {
      var data1 = google.visualization.arrayToDataTable([
        ['Time', 'Temperature 3'],
        <?php
          $con = mysqli_connect("localhost", "bone", "bone", "TempDB");
          $query = "SELECT * FROM TempMeas1";
          $result = mysqli_query($con, $query);
          mysqli_close($con);
          while ($row = mysqli_fetch_array($result))
          {
            $time = $row['MeasTime'];
            $temp3 = $row['Temp3'];
            echo "[".$time', $temp3],";
          }
        ?>
      ]);
      var options1 = {
        title: 'Temperatura de contacto',
        vAxis: { title: "GRADOS CENTIGRADOS" }
      };
      var data2 = google.visualization.arrayToDataTable([
        ['Time', 'Humidity 1'],
        <?php
          $con = mysqli_connect("localhost", "bone", "bone", "TempDB");
          $query = "SELECT * FROM TempMeas1";
          $result = mysqli_query($con, $query);
          mysqli_close($con);
          while ($row = mysqli_fetch_array($result))
```

```

        {
            $time = $row['MeasTime'];
            $hum1 = $row['Hum1'];
            echo "['$time', $hum1]";
        }
    ?>
]);

var options2 = {
    title: 'Humedad del aire',
    vAxis: { title: "%RH" }
};

var chart1 = new google.visualization.LineChart(document.getElementById('chart_div1'));
var chart2 = new google.visualization.LineChart(document.getElementById('chart_div2'));
chart1.draw(data1, options1);
chart2.draw(data2, options2);
}
</script>
</head>
<body>
<table style="width:100%">
<tr>CAPTURA DE PARAMETROS AMBIENTALES:TEMPERATURA DE CONTACTO Y
HUMEDAD DEL AIRE</tr>
<tr>
<td><div id="chart_div1" style="width: 600px; height: 500px;"></div></td>
<td><div id="chart_div2" style="width: 600px; height: 500px;"></div></td>
</tr>
</table>
</body>
</html>

```

- **NODO 2**

```

<html>
<head>
    <title>NODO 2</title>
    <script type="text/javascript" src="https://www.google.com/jsapi"></script>
    <script type="text/javascript">
        google.load("visualization", "1", {packages:["corechart"]});
        google.setOnLoadCallback(drawChart);
        function drawChart() {
            var data1 = google.visualization.arrayToDataTable([
                ['Time', 'Temperature 3'],
                <?php
                    $con = mysqli_connect("localhost", "bone", "bone", "TempDB");

                    $query = "SELECT * FROM TempMeas2";
                    $result = mysqli_query($con, $query);

```

```

        mysqli_close($con);

        while ($row = mysqli_fetch_array($result))
        {
            $time = $row['MeasTime'];
            $temp3 = $row['Temp3'];
            echo "['$time', $temp3],";
        }
    ?>
]);

var options1 = {
    title: 'Temperatura de contacto',
    vAxis: { title: "Grados Celsius" }
};

var data2 = google.visualization.arrayToDataTable([
    ['Time', 'Humidity 1'],
    <?php
        $con = mysqli_connect("localhost", "bone", "bone", "TempDB");

        $query = "SELECT * FROM TempMeas2";
        $result = mysqli_query($con, $query);

        mysqli_close($con);

        while ($row = mysqli_fetch_array($result))
        {
            $time = $row['MeasTime'];
            $hum1 = $row['Hum1'];
            echo "['$time', $hum1],";
        }
    ?>
]);

var options2 = {
    title: 'Humedad del aire',
    vAxis: { title: "%RH" }
};

var chart1 = new google.visualization.LineChart(document.getElementById('chart_div1'));
var chart2 = new google.visualization.LineChart(document.getElementById('chart_div2'));
chart1.draw(data1, options1);
chart2.draw(data2, options2);
}
</script>
</head>
<body>
<table style="width:100%">

```

```
<tr>CAPTURA DE PARAMETROS AMBIENTALES: TEMPERATURA DE CONTACTO Y HUMEDAD DEL AIRE</tr>
```

```
<tr>
  <td><div id="chart_div1" style="width: 600px; height: 500px;"></div></td>
  <td><div id="chart_div2" style="width: 600px; height: 500px;"></div></td>
</tr>
</table>
</body>
</html>
```

- **NODO 3**

```
<html>
<head>
  <title>NODO 3</title>
  <script type="text/javascript" src="https://www.google.com/jsapi"></script>
  <script type="text/javascript">
    google.load("visualization", "1", {packages:["corechart"]});
    google.setOnLoadCallback(drawChart);
    function drawChart() {
      var data1 = google.visualization.arrayToDataTable([
        ['Time', 'Temperature 3'],
        <?php
          $con = mysqli_connect("localhost", "bone", "bone", "TempDB");

          $query = "SELECT * FROM TempMeas3";
          $result = mysqli_query($con, $query);

          mysqli_close($con);

          while ($row = mysqli_fetch_array($result))
          {
            $time = $row['MeasTime'];
            $temp3 = $row['Temp3'];
            echo "['$time', $temp3],";
          }
        ?>
      ]);

      var options1 = {
        title: 'Temperatura de contacto',
        vAxis: { title: "Grados Celsius" }
      };

      var data2 = google.visualization.arrayToDataTable([
        ['Time', 'Humidity 1'],
        <?php
          $con = mysqli_connect("localhost", "bone", "bone", "TempDB");

          $query = "SELECT * FROM TempMeas3";
```

```

        $result = mysqli_query($con, $query);

        mysqli_close($con);

        while ($row = mysqli_fetch_array($result))
        {
            $time = $row['MeasTime'];
            $hum1 = $row['Hum1'];
            echo "['$time', $hum1],";
        }
        ?>
    ];

    var options2 = {
        title: 'Humedad del aire',
        vAxis: { title: "%RH" }
    };

    var chart1 = new google.visualization.LineChart(document.getElementById('chart_div1'));
    var chart2 = new google.visualization.LineChart(document.getElementById('chart_div2'));
    chart1.draw(data1, options1);
    chart2.draw(data2, options2);
}
</script>
</head>
<body>
<table style="width:100%">
<tr>CAPTURA DE PARAMETROS AMBIENTALES: TEMPERATURA DE CONTACTO Y
HUMEDAD DEL AIRE</tr>
<tr>
<td><div id="chart_div1" style="width: 600px; height: 500px;"></div></td>
<td><div id="chart_div2" style="width: 600px; height: 500px;"></div></td>
</tr>
</table>
</body>
</html>

```

- **NODO 4**

```

<html>
<head>
    <title>NODO 4</title>
    <script type="text/javascript" src="https://www.google.com/jsapi"></script>
    <script type="text/javascript">
        google.load("visualization", "1", {packages:["corechart"]});
        google.setOnLoadCallback(drawChart);
        function drawChart() {
            var data1 = google.visualization.arrayToDataTable([
                ['Time', 'Temperature 3'],
            ]

```

```

$con = mysqli_connect("localhost", "bone", "bone", "TempDB");

$query = "SELECT * FROM TempMeas4";
$result = mysqli_query($con, $query);

mysqli_close($con);

while ($row = mysqli_fetch_array($result))
{
    $time = $row['MeasTime'];
    $temp3 = $row['Temp3'];
    echo "['$time', $temp3],";
}
?>
]);

var options1 = {
    title: 'Temperatura de contacto',
    vAxis: { title: "Grados Celsius" }
};

var data2 = google.visualization.arrayToDataTable([
    ['Time', 'Humidity 1'],
    <?php
        $con = mysqli_connect("localhost", "bone", "bone", "TempDB");

        $query = "SELECT * FROM TempMeas4";
        $result = mysqli_query($con, $query);

        mysqli_close($con);

        while ($row = mysqli_fetch_array($result))
        {
            $time = $row['MeasTime'];
            $hum1 = $row['Hum1'];
            echo "['$time', $hum1],";
        }
        ?>
]);

var options2 = {
    title: 'Humedad del aire',
    vAxis: { title: "%RH" }
};

var chart1 = new google.visualization.LineChart(document.getElementById('chart_div1'));
var chart2 = new google.visualization.LineChart(document.getElementById('chart_div2'));
chart1.draw(data1, options1);
chart2.draw(data2, options2);
}

```

```
</script>
</head>
<body>
<table style="width:100%">
<tr>CAPTURA DE PARAMETROS AMBIENTALES: TEMPERATURA DE CONTACTO Y
HUMEDAD DEL AIRE</tr>
<tr>
<td><div id="chart_div1" style="width: 600px; height: 500px;"></div></td>
<td><div id="chart_div2" style="width: 600px; height: 500px;"></div></td>
</tr>
</table>
</body>
</html>
```

