



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Análisis y Evaluación de pérdidas de datos en redes ZigBee para la agricultura  
de precisión**

AUTOR:

Choez Márquez, Kevin Mauricio

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de

**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

TUTOR:

Bohórquez Heras, Daniel Bayardo

Guayaquil, Ecuador

18 de Septiembre del 2017



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr. **Choez Márquez Kevin Mauricio**, como requerimiento para la obtención del Título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES.**

TUTOR

---

Bohórquez Heras, Daniel Bayardo

DIRECTOR DE LA CARRERA

---

Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 18 del mes de Septiembre del año 2017



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **CHOEZ MÁRQUEZ, KEVIN MAURICIO**

**DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación, **Análisis y evaluación de pérdidas de datos en redes Zigbee para la agricultura de precisión** previo a la obtención del Título de **Ingeniero en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 18 del mes de Septiembre del año 2017

EL AUTOR

---

CHOEZ MÁRQUEZ, KEVIN MAURICIO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**

**DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **CHOEZ MÁRQUEZ, KEVIN MAURICIO**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Análisis y evaluación de pérdidas de datos en redes Zigbee para la agricultura de precisión**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 18 del mes de Septiembre del año 2017

EL AUTOR:

---

CHOEZ MÁRQUEZ, KEVIN MAURICIO

# REPORTE URKUND

Correo - mauribeniteza... x URKUND - Log in x Inicio - URKUND x D30248928 - TESIS KEVIN x

Es seguro | <https://secure.orkund.com/view/29865908-519314-889412#Dck7DoNADADRu2y9QvZ6PzZXQRQSRsQltokFEuXumeM3Mk847rZv2InV0OCK...>

**URKUND**

Documento: [TESIS KEVIN CHOEZ 25-08-17.docx](#) (D30248928)

Presentado: 2017-08-25 13:53 (-05:00)

Presentado por: mauribeniteza\_22@hotmail.com

Recibido: orlando.philco.ucsg@analysis.orkund.com

Mensaje: CHOEZ KEVIN [Mostrar el mensaje completo](#)

4% de estas 53 páginas, se componen de texto presente en 1 fuentes.

Lista de fuentes Bloques

- <http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/11846...>
- <http://www.domodesk.com/a-fondo-zigbee>
- <http://di002.edv.uniovi.es/-cueva/investigacion/tesis/Nestor.pdf>
- [http://www.recercat.cat/bitstream/handle/2072/97337/PFC\\_D...](http://www.recercat.cat/bitstream/handle/2072/97337/PFC_D...)
- [http://olimex.cl/website\\_MCI/static/documents/XBee-Guia\\_Us...](http://olimex.cl/website_MCI/static/documents/XBee-Guia_Us...)
- <http://docplayer.es/8261736-Posicionamiento-con-una-red-de...>
- <http://postgrado.info.unlp.edu.ar/Carreras/Especializaciones/...>

1 Advertencias. Reiniciar. Exportar. Compartir

Abstract The IEEE 802.15.4 standard defines everything related to the Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPAN). Technologies of that standard are: Xbee from Digi and MiWi from Microchip but the most implemented is Zigbee, it operates in the 2.4 GHz band of ISM (Industrial, Scientific and Medical) internationally reserved bands for non-commercial use of electromagnetic radiofrequency in industrial, scientific and medical areas. With an approximate coverage range of 100 meters and a bit rate of 250 kbps on 15 possible channels. Zigbee is an emerging standard specifically designed for low-level wireless personal area networks (LR-WPAN) but there are many limitations, where the first challenge is signal fading, propagation delay that increase signal losses in the receiver. The evaluation of losses of data in these types of networks is carried out with several experiments obtained from the scientific literature in the last two years, as well as results of packet loss rate and transmission performance. The contribution of the titling work indicates that networks developed in Zigbee could work well under multi-hop transmission over a long period of time. Keywords: Zigbee, WPAN, data loss, two-ray model, free space.

INDICE GENERAL Resumen IX Abstract X CAPITULO I: GENERALIDADES DEL TRABAJO DE TITULACION 1 1.1

Introducción 1 1.2 Planteamiento del Problema 2 1.3 Objetivo General 2 1.4 Objetivos Especificos 2 1.5 Justificación 3 1.6 Metodología 3 CAPITULO II:

MARCO TEÓRICO 4 Tecnologías del estándar IEEE 802.15.4 4.2.1 Otras

Urkund Report - T....pdf Mostrar todo

ES 13:51 25/08/2017

Reporte Urkund del Trabajo de Titulación “**Análisis y Evaluación de Pérdidas de Datos en Redes Zigbee para la Agricultura de Precisión**” del estudiante Kevin Mauricio Choez Márquez al 4% de coincidencias.

Atentamente.

Msc. Orlando Philco Asqui.

## **DEDICATORIA**

Quiero empezar dedicándole a Dios por permitirme terminar esta etapa de mi vida, a mis padres por ser el pilar fundamental en todo el trayecto de mi carrera y enseñarme a realizar mis sueños día a día para con ello poder cumplir mis metas.

Recuerdo aquellos momentos de obstáculos y caídas que estuvieron con las palabras precisas para aconsejarme, guiarme y respaldarme para poder seguir adelante.

De manera muy especial agradezco a mi padre por ser un apoyo incondicional en todo momento, ya que sin el no estuviese aquí logrando mis metas.

A mis profesores y principales autoridades de la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo, quienes me proporcionaron la enseñanza y su amistad.

A mi tutor, ing. Daniel Bohórquez Heras por su acertada guía y consejos para culminar con éxito el presente trabajo de titulación.

## **AGRADECIMIENTO**

**Agradezco a esta prestigiosa institución académica como lo es la Universidad Católica Santiago de Guayaquil por formarme como un profesional de elite en el campo de las telecomunicaciones, a todos los docentes que estuvieron dispuestos de la mejor manera a transmitirnos todos sus conocimientos y experiencia, a mis compañeros que estuvieron en los buenos y malos momentos a lo largo de esta etapa.**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

**ING. MIGUEL ARMANDO HERAS SÁNCHEZ, M. Sc.**  
DIRECTOR DE CARRERA

---

**ING. NÉSTOR ARMANDO ZAMORA CEDEÑO, M. Sc.**  
COORDINADOR DE ÁREA

---

**ING. EDWIN FERNANDO PALACIOS MELÉNDEZ, M. Sc.**  
OPONENTE



## INDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	VI
AGRADECIMIENTO .....	VII
Resumen.....	XV
Abstract .....	XVI
CAPITULO I: GENERALIDADES DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	2
1.1 Introducción.....	2
1.2 Planteamiento del Problema .....	3
1.3 Objetivo General .....	3
1.4 Objetivos Específicos .....	3
1.5 Justificación.....	3
1.6 Metodología.....	4
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	5
2.1. Tecnologías del estándar IEEE 802.15.4.....	5
2.1.1 Otras tecnologías del estándar IEEE 802.15.4 .....	6
2.1.2 Protocolo MiWi .....	6
2.2 Tecnología Inalámbrica en Red de Area Personal .....	7
2.2.1 Bluetooth.....	7
2.2.2 Bluetooth Low Energy .....	9
2.2.3 ANT .....	9
2.3 Red Zigbee .....	10
2.3.1 Funciones de Zigbee .....	15
2.3.2 Trama de Zigbee .....	16
2.4 Comparaciones entre Bluetooth, Zigbee y ANT .....	20
2.4.1 Comparación de técnica de modulación entre Bluetooth y Zigbee .....	21
2.4.2 Comparación en consumo de batería. ....	21

2.5 Redes de sensores inalámbricas.....	24
2.6 Módulos inalámbricos IEEE 802.15.4 .....	25
2.6.1 Módulos XBee de Digi .....	28
2.6.2 Breakout board para el módulo Xbee .....	33
2.6.3 Placa Xbee Explorer USB.....	33
2.7 Tecnología LORA .....	34
2.7.1 Módulo RN2903 .....	35
2.8 Batería en red Zigbee .....	36
2.8.1. Baterías alcalinas .....	38
2.8.2 Baterías de litio .....	38
2.8.3. Baterías níquel e hidruro metálico (NiMH).....	39
2.8.4 Elección de la batería.....	40
CAPÍTULO III:.....	41
RECOLECCIÓN DE DATOS EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN .....	41
3.1 Los datos en la agricultura de precisión .....	41
3.1.1 Computación en la nube .....	44
3.2 Caso de monitoreo de viñedo .....	45
3.2.1 Beneficios de la agricultura de precisión.....	46
3.3 Caso de monitoreo y control en invernaderos .....	48
3.3.1 Números de sensores y parámetros de entrada .....	49
3.3.2 Parámetros del sensor y su uso en el sistema.....	50
3.3.3 Control climático del invernadero .....	50
3.3.4 Topología Cluster-Tree.....	52
3.4 Modelos Empíricos de propagación de ondas electromagnéticas .....	56
3.4.1 Modelo de Propagación en el Espacio Libre .....	56
3.4.2 Modelo de pérdida: Shadowing y multipath.....	59

3.4.3 Modelo Dos Rayos.....	62
3.5 Factores que afectan el rendimiento de redes inalámbricas .....	63
3.5.1 Factores menos conocidos que afectan el rendimiento de redes inalámbricas .....	66
3.6 Cálculo de pérdidas de trayectoria .....	69
<b>CAPITULO IV: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS DE DATOS EN RED ZIGBEE EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN .....</b>	<b>74</b>
4.1 Modelos de follaje .....	74
4.2 Configuración de la medición .....	78
4.2.1 Resultados .....	79
4.2.2 Comparación de mediciones reales y la pérdida de trayectoria.....	81
4.2.3 Comparación de medición real combinados con modelos de vegetación .	83
4.2.4 Optimización de nuevos modelos .....	85
Conclusiones .....	88
Recomendaciones .....	90
Glosario .....	91
Bibliografía.....	93

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Relojes con tecnología ANT para medir parámetros en entrenamientos	10
Figura 2. 2 Tecnología inalámbrica .....	11
Figura 2. 3 Características de radio para Zigbee.....	12
Figura 2. 4 Topologías Zigbee .....	13
Figura 2. 5 Pila de protocolos Zigbee .....	14
Figura 2. 6. Tramas Zigbee en Capa Física y Capa MAC .....	17
Figura 2. 7 Comparación de velocidad efectiva entre Zigbee y Bluetooth según largo del paquete .....	23
Figura 2. 8. Red Zigbee dentro de aplicación WSN .....	25
Figura 2. 9 Módulo Xbee ZNet 2.5 RF Series 2 de Digi .....	26
Figura 2. 10 Módulo EasyBee ZigBee Transceiver .....	27
Figura 2. 11 Módulo ZB-21 Zigbee OEM .....	27
Figura 2. 12 Módulo Cirronet ZMN2400 .....	28
Figura 2. 13 Red Mesh para módulos XBEE PRO .....	29
Figura 2. 14 Conexiones mínimas para el XBee y los tipos de módulos XBee.....	29
Figura 2. 15 Ejemplo comando AT.....	31
Figura 2. 16 Entrada en el modo de comandos mediante el software X-CTU.....	32
Figura 2. 17 Modos de funcionamiento del módulo Xbee.....	33
Figura 2. 18 Breakout Board de Sparkfun para Xbee .....	33
Figura 2. 19 Xbee Explorer USB .....	34
Figura 2. 20 Conexión del módulo Xbee al Explorer USB.....	34
Figura 2. 21 Conexión de una red LoRa .....	35
Figura 2. 22 Módulo RN2903 de Microchip.....	36
Figura 2. 23 Temperatura actual de la batería alcalina AA.....	38
Figura 2. 24 Temperatura actual de una batería de hierro-sulfuro de litio AA.....	39

Figura 2. 25 Temperatura actual para una batería de NiMH de tamaño AA .....	40
Figura 3. 1 Equipos y máquinas conectados para el agro .....	43
Figura 3. 2 Tractor autonomo con sensores para siembra.....	43
Figura 3. 3 Esquema de la computación en la nube.....	44
Figura 3. 4 Pasado y futuro para la agricultura .....	45
Figura 3. 5 Ejemplo de monitoreo en viñedo.....	47
Figura 3. 6 Nuevas tecnologías para monitoreo y control continuo de variables .....	47
Figura 3. 7 Representacion de monitreo con red Zigbee .....	48
Figura 3. 8 invernadero típico .....	48
Figura 3. 9 Variables de interés a controlar y sus perturbaciones en invernadero.....	52
Figura 3. 10 Topología estrella de una red zigbee para agricultura de precisión.....	53
Figura 3. 11 Direccionamiento y tramas de comunicación Zigbee.....	54
Figura 3. 12 Apertura recibida en una antena .....	56
Figura 3. 13 Efectos de path loss, shadowing y multipath en función de la distancia60	
Figura 3. 14 Esquema del Modelo de 2 Rayos62	
Figura 4. 1 Invernadero para arboles de mango .....	77
Figura 4. 2 Geometría media del árbol.....	79
Figura 4. 3 Datos en serie de los nodos de la red inalámbrica .....	80
Figura 4. 4 Mediciones empíricas de pérdida de trayectoria. ....	81
Figura 4. 5 Pérdidas de trayectoria de 3 modelos de trayectoria .....	82
Figura 4. 6 Pérdida de trayectoria de propagación a gran escala .....	83
Figura 4. 7 Pérdida de trayectoria por la combinación de modelos de vegetación con modelo FSPL.....	84
Figura 4. 8 Pérdida de trayectoria por combinación de modelos de vegetación con modelo 2-Rayos .....	84
Figura 4. 9 pérdida de trayectoria total real y la línea de regresión lineal de las mediciones.....	85

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Memoria de programa MiWi vs Zigbee.....	6
Tabla 2. 2 Potencia y alcance de Bluetooth, según la clase .....	8
Tabla 2. 3 Ancho de banda en las diferentes generaciones Bluetooth.....	8
Tabla 2. 4 Características de las tecnologías de comunicaciones inalámbricas.....	20
Tabla 2. 5. Comparación de técnica modulación en Bluetooth y Zigbee .....	21
Tabla 2. 6 Características de velocidad de transferencia de los paquetes Bluetooth .	22
Tabla 2. 7 Comparativa entre los dos tipos de módulos .....	30
Tabla 3. 1 Variables a controlar según tipo cultivo .....	49
Tabla 3. 2 Disponibilidad y tiempo inactivo según valor de SOM.....	72
Tabla 4. 1 Configuración de los nodos inalámbricos JN5148. ....	79
Tabla 4. 2 Path loss por FSPL y modelos de 2-Ray en dB. ....	81
Tabla 4. 3 % Error absoluto y % Error absoluto medio de modelos de propagación a gran escala y mediciones empíricas (%). ....	83
Tabla 4. 4 Pérdida de la trayectoria total por ( $PL_{FSPL} + PL_{Veg}$ ) (dB). ....	83
Tabla 4. 5 Pérdida de trayectoria total por ( $PL_{2-Rayos} + PL_{Veg}$ ) (dB). ....	84
Tabla 4. 6 % Error absoluto y % Error absoluto medio .....	85
Tabla 4. 7 $PL_{Tot}$ por mediciones empíricas y el modelo $PL_{LRFCM}$ (dB).....	86
Tabla 4. 8 % de Error absoluto y % de Error absoluto medio: mediciones reales y valores de $PL_{TOT}$ por el nuevo modelo (%). ....	87

## **Resumen**

El estándar IEEE 802.15.4, define todo lo relacionado con las redes inalámbricas de área personal de bajo tráfico (Low Rate Wireless Personal Area Networks LR-WPAN). Tecnologías de dicho estándar son; Xbee de Digi y MiWi de Microchip pero la más implementada es Zigbee, esta opera en la banda 2.4 GHz de la ISM (Industrial, Scientific and Medical) bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en áreas industrial, científica y médica. Con un rango de cobertura aproximado de 100 metros y una tasa de bits de 250 kbps sobre 15 canales posibles.

Zigbee es un estándar emergente diseñado específicamente para redes de área personal inalámbricas de bajo índice (LR-WPAN) pero existen muchas limitaciones, en donde el primer desafío es el desvanecimiento de la señal, retardo de propagación que incrementan pérdidas de la señal en el receptor. La evaluación de pérdidas de datos en estos tipos de redes se efectúa con varias experimentaciones obtenidas de la literatura científica en los dos últimos años, así se tiene resultados de tasa de pérdida de paquetes, y el rendimiento de transmisión. La aportación del trabajo de titulación, indica que redes desarrolladas en Zigbee podrían funcionar bien bajo transmisión multi-salto durante un largo período de tiempo.

**Palabras claves:** Zigbee, WPAN, pérdida datos, modelo dos rayos, espacio libre.

## **Abstract**

The IEEE 802.15.4 standard defines everything related to the Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPAN). Technologies of that standard are; Xbee from Digi and MiWi from Microchip but the most implemented is Zigbee, it operates in the 2.4 GHz band of ISM (Industrial, Scientific and Medical) internationally reserved bands for non-commercial use of electromagnetic radiofrequency in industrial, scientific and medical areas. With an approximate coverage range of 100 meters and a bit rate of 250 kbps on 15 possible channels.

Zigbee is an emerging standard specifically designed for low-level wireless personal area networks (LR-WPAN) but there are many limitations, where the first challenge is signal fading, propagation delay that increase signal losses in the receiver. The evaluation of losses of data in these types of networks is carried out with several experiments obtained from the scientific literature in the last two years, as well as results of packet loss rate and transmission performance. The contribution of the titling work indicates that networks developed in Zigbee could work well under multi-hop transmission over a long period of time.

**Keywords:** Zigbee, WPAN, data loss, two-ray model, free space.



## **CAPITULO I: GENERALIDADES DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

### **1.1 Introducción**

El avance y desarrollo circuitos con micro procesadores distribuidos, de dimensiones reducidas, económicos y de bajo consumo energético, permiten procesar información localmente como de comunicarse de forma inalámbrica. La posibilidad de implementar este tipo de dispositivos de bajo costo y elevada duración sin mantenimiento capaces de obtener información del entorno y reenviarla de forma inalámbrica a un centro de coordinación ofrece una amplia gama de aplicaciones. La aparición de la tecnología basada en el estándar IEEE 802.15.4, comúnmente conocida como; Zigbee ha tenido una amplia gama de aplicaciones y productos en la industria mundial.

En el entorno de redes inalámbricas de sensores los mayores desafíos se encuentran en minimizar dos factores fundamentales: costo y consumo energético, maximizando el tiempo de servicio Un nodo sensor generalmente es un sistema basado en microcontrolador que incorpora un módulo de Radio Frecuencia (RF), una unidad de sensorización, encargada de recoger los datos del entorno, todo ello alimentado mediante una batería.

Los nodos sensores se coordinan entre sí para producir información de alta calidad sobre el entorno físico. Cada nodo sensor basa sus decisiones en su misión, la información que tiene actualmente, y su conocimiento de su computación, comunicación y recursos energéticos. Cada uno de estos nodos de sensor dispersos tiene la capacidad de recopilar y enrutar datos ya sea a otros sensores o de vuelta a una estación base externa. Una estación base puede ser un nodo fijo o un nodo móvil capaz de conectar la red de sensores a una infraestructura de comunicaciones existente o a Internet donde un usuario pueda tener acceso a los datos reportados. Estos nodos sensores son capaces de recopilar y difundir datos en áreas donde las redes ordinarias no son adecuadas por razones ambientales o estratégicas. Como tales, tienen un futuro prometedor en muchas aplicaciones, tales como casas inteligentes, granjas inteligentes, estacionamiento inteligente, hospitales inteligentes, monitoreo de hábitat y monitoreo, robótica distribuida, industria y fabricación, seguridad nacional, etc. las redes bajo estándar IEEE 802.15.4 más viable y ha contribuido a su creciente

popularidad como posibles soluciones de bajo costo a una variedad de desafíos de la vida real.

En síntesis, Zigbee es un estándar emergente diseñado específicamente para redes de área personal inalámbricas de bajo índice (LR-WPAN) pero existen muchas limitaciones, en donde el primer desafío es el desvanecimiento de la señal, retardo de propagación que incrementan pérdidas de la señal en el receptor.

## **1.2 Planteamiento del Problema**

La implementación de redes Zigbee en ambientes externos como el rural y urbano-rural para monitoreo en la agricultura de precisión presenta dificultades de pérdida de datos, por el entorno de la vegetación, altura de plantas o árboles.

## **1.3 Objetivo General**

Analizar y evaluar pérdidas de datos en una red zigbee con modelos de pérdida de trayectoria para la agricultura de precisión.

## **1.4 Objetivos Específicos**

- 1) Analizar el estado del arte de la tecnología Zigbee y su estándar IEEE 802.15.4
- 2) Caracterizar los modelos de pérdida de datos en redes inalámbricas como Espacio libre, Shadowing y Dos Rayos.
- 3) Evaluar parámetros del modelo de pérdida de datos para Zigbee en un entorno para agricultura de precisión.

## **1.5 Justificación**

En la literatura de redes Zigbee, existen pocos artículos científicos que proporcionan una discusión limitada sobre los modelos de propagación, pues los principales objetivos de estos trabajos son el comportamiento de la red, la topología de red y el modelado de nivel de sistema y aplicaciones. Con el uso de simuladores se proporciona requerimientos de cálculo para el modelado realista, esto permitirá estudiar las redes Zigbee de una forma muy pareja a la realidad y así optimizarlo para el caso real.

## **1.6 Metodología**

El presente trabajo de titulación emplea dos métodos; se utiliza la metodología descriptiva pues se tomará en cuenta el estado del arte de los cinco últimos años en redes Zigbee y redes de sensores inalámbricos (WSN). Se emplea también el método analítico-sintético por cuanto se examina los efectos del modelo de pérdida de datos, por lo cual también se deberá emplear simulaciones de escenarios exteriores para una red Zigbee con un coordinador y al menos 20 nodos, las simulaciones de eventos discretos puede ser efectuada a través del programa NS-2.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Tecnologías del estándar IEEE 802.15.4

En 1999 el organismo internacional; Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronic Engineers*) creó el grupo de trabajo IEEE 802.15, dedicado específicamente al estudio de redes de área personal (PAN) y consecutivamente las redes inalámbricas de área personal WPANs (Wireless Personal Area Network), las cuales tienen un escenario inalámbrico de gran despliegue en términos de acercar la red al usuario y de integrar todos los servicios en base a conseguir una automatización total del entorno de forma que se obtenga un esquema de comunicaciones y de monitorización completo en base a la misma infraestructura.

Con este breve antecedente Zigbee parte del IEEE 802.15.4 con características de bajo consumo de energía se le está dando un uso extenso en lo referente a domótica y automatización. Una red Zigbee tiene como objetivo el manejo de baja velocidad de datos, son dispositivos de bajo costo con baterías de larga duración lo que es muy adecuado para las redes de sensores inalámbricos WSN y puede ser incluido en una amplia gama de productos y aplicaciones.

Zigbee es una tecnología de inalámbrica de corto alcance y bajo consumo originaria de la antigua alianza HomeRF y que se definió como una solución inalámbrica de baja capacidad para aplicaciones en el hogar como la seguridad y la automatización.

Entre las aplicaciones que puede tener están los siguientes:

- Domótica.
- Automatización industrial.
- Reconocimiento remoto.
- Juguetes interactivos.
- Medicina, etc.

La tecnología Zigbee puede conformar parte de una red de sensores inalámbricas para el monitoreo o supervisión de entornos mayores de una red de área personal.

### 2.1.1 Otras tecnologías del estándar IEEE 802.15.4

#### 2.1.2 Protocolo MiWi

El protocolo MiWi es un protocolo propietario del fabricante estadounidense Microchip y está basado en el estándar IEEE 802.15.4. MiWi propone una implementación liviana y royalty-free, que se apoya en dos herramientas: MiMAC (controlador de acceso al medio) y una interfaz de cara al manejo de los protocolos propietarios llamada MiApp. MiWi está orientado a redes relativamente pequeña (1024 nodos).

El protocolo MiWi Los nodos de red bajo MiWi pueden ser dispositivos de funciones completas (Full Function Devices - FFD) o dispositivos de funciones reducidas (Reduced Function Devices - RFD), jerárquicamente el nodo principal de la red de área personal denominado PAN Coordinator debe ser siempre un FFD. El PAN Coordinator (Coordinador de la PAN) siempre es único.

Las principales características del protocolo MiWi son la facilidad de implementación sobre microcontroladores de 8, 16 o 32 bits y su aspecto liviano, en comparación con Zigbee (tabla 2.1) en cuanto al consumo de memoria de programa. Además de los transceptores, las comunicaciones bajo MiWi se sustentan sobre dos bases funcionales: una formulación llamada MiApp y otra denominada MiMAC, que rigen los aspectos de la capa de aplicación y la capa física del protocolo respectivamente.

Adicionalmente, el protocolo MiWi es royalty-free y a diferencia de Zigbee el número máximo de nodos de las redes que soporta es menor, 1024 nodos, que suele ser suficiente para la mayoría de aplicaciones. (Meneses, 2015).

Tabla 2. 1 Memoria de programa MiWi vs Zigbee

Memoria de programa (Kbyte)		MiWi	Zigbee
	Coordinador	<16kbyte	37-96 kbyte
Router	<16kbyte	30-64 kbyte	
Dispositivo Final	2-8 kbyte	18-40 kbyte	

Fuente: (Meneses, 2015)

A su vez, el protocolo MiWi ofrece variantes MiWi P2P y MiWi Pro, que poseen características definidas que varían en cuanto al número máximo de nodos, las topologías cubiertas y aspectos como el enrutamiento, entre otros. MiWi P2P cubre aplicaciones que requieran redes con pocos nodos y baja complejidad, menos de 127 nodos, mientras que MiWi pro puede instalar más de 8.000 nodos.

Al igual que en IEEE 802.15.4 se trabaja con dispositivos de dos categorías: de funciones completas (Full-Function Devices FFD) y de funciones reducidas (Reduced Function Devices RFD), que se reflejan en roles de coordinadores de red y dispositivos terminales (Meneses, 2015).

## **2.2 Tecnología Inalámbrica en Red de Area Personal**

### **2.2.1 Bluetooth**

En la actualidad existe un sin número de dispositivos habilitados, incluyendo un alto porcentaje de los teléfonos móviles vendidos en el mundo, Bluetooth se presenta como la tecnología inalámbrica ideal para la conexión de dispositivos electrónicos. Por tanto, se puede determinar que Bluetooth es una especificación industrial para Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN), que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace por radiofrecuencia segura y globalmente libre. (Barbolla Asenjo, 2009).

Bluetooth es una tecnología diseñada para ofrecer conectividad a redes personales mediante dispositivos móviles, de forma económica. Dicha tecnología está respaldada por grandes fabricantes de dispositivos (Agere, Ericsson, IBM, Intel, Microsoft, Motorola, Nokia, Toshiba, etc.), que conforman desde 1999 el Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG), grupo destinado a realizar las especificaciones industriales Bluetooth. El IEEE también desarrolla sus propios estándares para WPAN (Wireless Personal Area Network), bajo el estándar 802.15, que en su primera versión aceptó en gran medida las especificaciones de Bluetooth. (Casar Corredera, 2005, págs. 32-33).

Por otro lado, otros autores como (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014) los definen Bluetooth como un estándar de tecnología inalámbrica para el intercambio de datos a cortas distancias (empleando un enlace por radiofrecuencia en la banda ISM de 2,4 GHz), desde dispositivos fijos y móviles construyendo redes de

área personal (PAN). Pues, utiliza canales RF (79 canales) de  $f = 2402 + k$  MHz siendo  $k = 0.78$ . El espacio entre los mismos es de 1 MHz más unas bandas de guarda.

Además, Bluetooth permite conectar múltiples aparatos que dispongan de la tecnología (ordenadores portátiles, PDAs, teléfonos móviles, ordenadores personales, etc.), formando piconets (en una piconet, un dispositivo actúa como maestro y los otros como esclavos), y posibilita la conexión a una LAN o WAN a través de un punto de acceso. (Casar Corredera, 2005).

Estos dispositivos se clasifican en clases: clase 1, clase 2 y clase 3, en referencia a su potencia de transmisión.

Tabla 2. 2 Potencia y alcance de Bluetooth, según la clase

Clase	Potencia máxima permitida (mW)	Potencia máxima permitida (dBm)	Alcance (aproximado)
Clase 1	100 mW	20 dBm	~100 metros
Clase 2	2.5 mW	4 dBm	~5-10 metros
Clase 3	1 mW	0 dBm	~1 metro

Fuente: Elaborado por el autor

Actualmente, Bluetooth SIG proporciona un sistema de aumento de velocidad y disminución de potencia (Bluetooth Enhanced Data Rate) que, según sus desarrolladores, permite triplicar la velocidad de las conexiones. (Casar Corredera, 2005, pág. 33).

La tecnología Bluetooth ha evolucionado considerablemente en los últimos años, y son ya varias las generaciones de Bluetooth que han existido, considerando mejoras en ancho de banda, alcance o seguridad. Por lo tanto, los dispositivos pueden clasificarse, según su ancho de banda. Ver tabla 2.3.

Tabla 2. 3 Ancho de banda en las diferentes generaciones Bluetooth

Versión	Ancho de banda (BW)
Versión 1.2	1 Mbit/s
Versión 2.0 + EDR	3 Mbit/s
Versión 3.0 + HS	24 Mbit/s
Versión 4.0	32 Mbit/s

Fuente: Elaborado por el autor

### 2.2.2 Bluetooth Low Energy

También llamada *Bluetooth LE*, *Bluetooth ULP* y *Bluetooth Smart*, está creada para reducir eficazmente el consumo de energía manteniendo un rango de comunicación similar a *Bluetooth*.

BLE es una tecnología todavía en desarrollo, pero actualmente, es compatible con la mayoría de los sistemas operativos (*iOS*, *Android*, *Windows Phone*, *Blackberry*, *OS X*, *Windows 8*), y se prevé que en 2018 más del 90% de los *smartphones* incluirán BLE. (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014).

### 2.2.3 ANT

ANT es un protocolo inalámbrico probada ultra bajo de energía (ULP), que se encarga de enviar la información de forma inalámbrica desde un dispositivo a otro dispositivo, de una manera robusta y flexible.

Con millones de nodos desplegados, ANT se adapta perfectamente a cualquier tipo de velocidad de datos topologías de redes de sensores bajas, de igual a igual en redes de área personal (PAN), que son muy adecuadas para los deportes, aplicaciones de salud y bienestar para el hogar. De esa manera, ANT es una solución práctica para redes de área local (LAN) en los hogares y las aplicaciones de automatización industrial. (ANT+Alliance, 2016)

Por otro lado, (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014), señala que el ANT es una tecnología propietaria de libre acceso para redes inalámbricas de sensores multicast, que ofrece una pila de protocolos de comunicación inalámbrica para dispositivos que operan en la banda de 2,4 GHz (aplicaciones industriales, científicas y médicas) permitiendo a éstos comunicarse, estableciendo reglas estándar de coexistencia, representación de datos, señalización, autenticación y detección de errores.

Un protocolo de red inalámbrica de 2,4 GHz y una solución práctica de sistemas empotrados o embebidos; ANT está diseñado específicamente para redes de sensores inalámbricos (WSN) que requieren:



- De ultra bajo consumo de energía; se ejecuta en una pila de botón de años de operación.
- Altamente optimizado de los recursos; encaja en una memoria de tamaño compacto.
- La flexibilidad y la escalabilidad de la red; auto-adaptable y capaz de hacer malla práctica.
- Fácil de usar con un bajo coste del sistema; opera de forma independiente con un solo chip. (ANT+Alliance, 2016)

El ANT se caracteriza por una baja carga computacional y una baja eficiencia, lo que se traduce en un consumo de energía mínimo. Las aplicaciones más conocidas y difundidas de ANT se encuentran en el sector del deporte, más en concreto en *fitness* y ciclismo. En estas, los transceptores se integran en elementos como relojes o cinturones que miden parámetros, tales como velocidad y distancia permitiendo al usuario una monitorización de su rendimiento.



Figura 2. 1 Relojes con tecnología ANT para medir parámetros en entrenamientos  
Fuente: (Linio, 2016)

### 2.3 Red Zigbee

El desarrollo de Zigbee ha sido posible gracias a la organización *Zigbee Alliance*, donde se agrupan las empresas que impulsan esta tecnología. Hasta hoy en día, ésta empresa cuenta con nueve grupos de desarrollo que se encargan de la implementación de estándares. Nunca se imaginó que una tecnología de altas velocidades como el *Bluetooth* se viera desplazada por *Zigbee*, que es una tecnología lenta, pero la realidad de sus bajos costos comparados con sus beneficios y compatibilidad de comunicación han hecho posible que consiga cada vez más, adeptos en distintos campos de la tecnología, unos desarrollados y otros por explorar. (Agudelo Quiroz, 2011).

Zigbee tiene como principal objetivo, comunicar aplicaciones que requieren una comunicación segura, con baja tasa de envío y bajo consumo. Se basa en dispositivos inalámbricos operando en la banda ISM para usos industriales, científicos y médicos (868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz) con una modulación en espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS), también conocida como acceso múltiple por división de código en secuencia directa (DS-CDMA). En el rango de frecuencias de 2.4 GHz (banda más extendida) se definen 16 canales con un ancho de banda de 5 MHz. (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014, pág. 16)

EL estándar IEEE 802.15.4 es la base de la tecnología Zigbee, un conjunto de protocolos de alto nivel, abiertos y globales para comunicación inalámbrica en las redes de área personal (PAN) y de sensores inalámbricos (WSN), que ha incursionado los últimos años con aplicaciones en campos tan diversos como el militar, la domótica, la industria, la salud, entretenimiento y el monitoreo y control inteligentes de sistemas de generación y distribución de energía denominados con el nombre genérico de Smart Grid. (Agudelo Quiroz, 2011).

En la figura 2.1 se puede ver el espectro de ocupación en las bandas del protocolo 802.

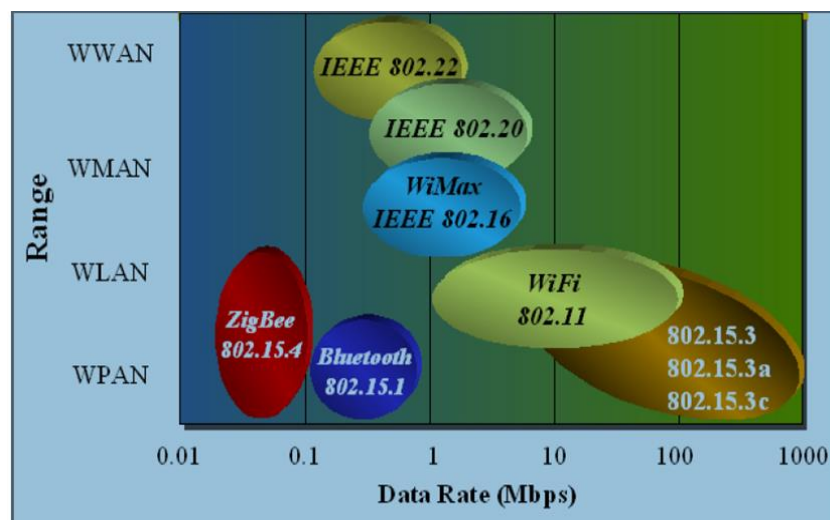


Figura 2. 2 Tecnología inalámbrica  
Fuente: (Alfvín, 2011) & (Wexler, 2012)

En la banda de 2.4 GHz se usa la modulación de espectro expandido DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*). A una velocidad de transmisión de 250Kbps y a

una potencia de 1mW cubre aproximadamente unos 13 metros de radio. La miniaturización de los nodos sensores y los avances en las comunicaciones por radiofrecuencia ISM han permitido que dichas tecnologías en rangos de frecuencia libre se implementen en entornos del hogar, la industria e incluso en espacio externos como parques, avenidas etc. Pues las aplicaciones hoy mayormente se utilizan sirven para monitorear variables de interés (por ejemplo; ruido, temperatura, contaminación ambiental en una ciudad) a corta y mediana escala o cobertura.

En la figura 2.3 se muestra las características de radio frecuencia para Zigbee.

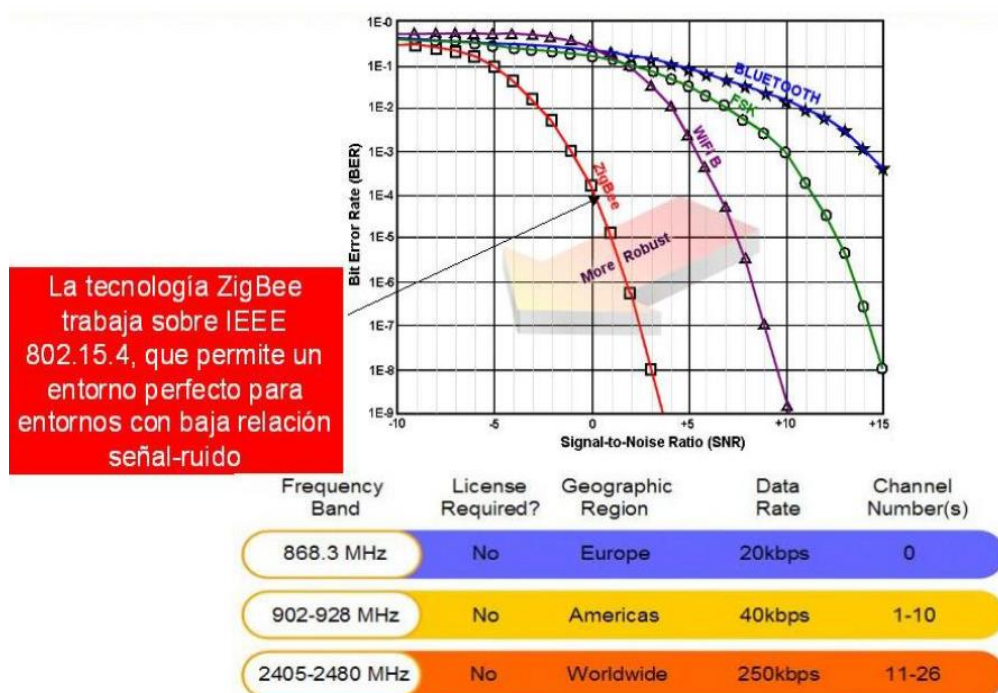


Figura 2. 3 Características de radio para Zigbee

Fuente: (Wexler, 2012)

Asimismo, IEEE 802.15.4 y Zigbee definen diferentes tipos de dispositivos, tal como se detalla a continuación:

- Tipos de dispositivos (según Zigbee):
  - **Coordinador:** Controla el ruteado y administra la red. Existe uno por red.
  - **Router:** Interconecta diferentes nodos mediante direccionamiento.
  - **Dispositivo final:** Elemento pasivo que responde ante peticiones de otros dispositivos. Se pasa la mayor parte del tiempo dormido.
- Tipos de dispositivos (según IEEE 802.15.4):
  - **FFD (Full Function Device)**

- **RFD** (*Reduced Function Device*) (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014)

Zigbee está diseñado y/o creado para ser una solución que permita crear redes e interconectar dispositivos remotos. A continuación, se detallan las diversas topologías de red que se pueden formar con los dispositivos.

- **Punto a punto**
  - Topología más sencilla.
  - Uno de los dispositivos es el coordinador y el otro puede ser un *router* o un dispositivo final.
- **Estrella**
  - Todos los dispositivos de la red se pueden comunicar con el nodo coordinador, pero no entre sí.
- **Malla**
  - Se trata de una comunicación punto a punto, pero existiendo restricciones en la intercomunicación de dispositivos.
  - Cualquier dispositivo puede comunicarse con otro.
  - El coordinador se encarga de la gestión de caminos.
- **Árbol**
  - El coordinador establece la red inicial.
  - Los *routers* forman ramas y retransmiten los mensajes.
  - Los dispositivos finales son las hojas del árbol. (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014, págs. 15-16)

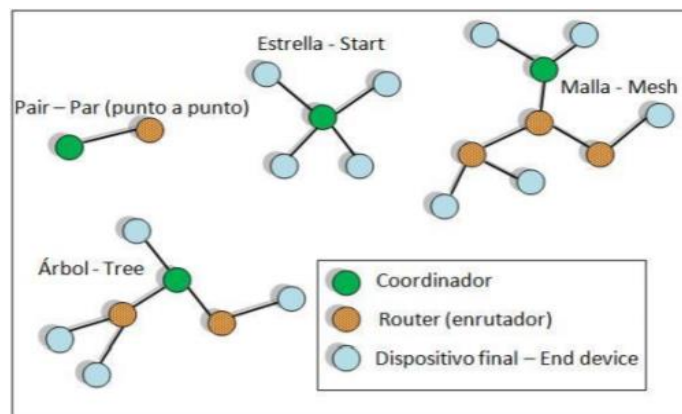


Figura 2. 4 Topologías Zigbee

Fuente: (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014)

Zigbee continúa el modelo OSI (Interconexión de Sistemas Abiertos) pero reduce las 7 capas de la pila de protocolos a sólo 4. El estándar 802.15.4 define las dos

primeras capas, física y de enlace de datos, mientras que Zigbee define la capa de red y la capa de aplicación. Ver figura 2.5.

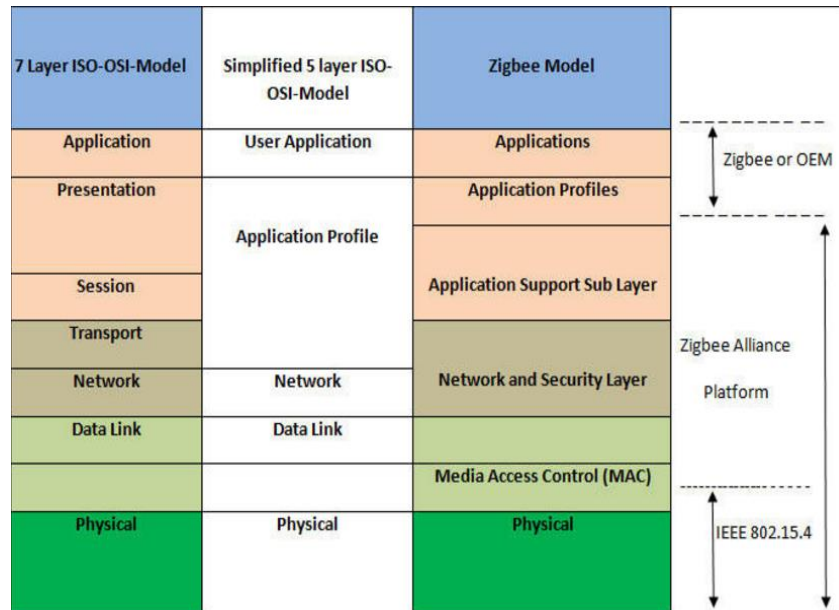


Figura 2. 5 Pila de protocolos Zigbee

Fuente: (Thakur, 2012)

**-Capa Física:** Define las funciones con la capa de enlace de datos, los niveles de potencia del transmisor y la sensibilidad del receptor, transfiriendo los datos por medio de un entero de 8 bits. Sus funciones son: canales, numeración de canales, detección de energía, medición de portadora, indicador de calidad del enlace, evaluación de canal libre, cliente, servidor entre capas e interfaz/área de datos capa física, enlace de datos.

**-Capa de enlace de datos:** Provee la interfaz entre la capa física y la capa de red. Maneja los servicios y los datos. Sus funciones son: operación de la red usando balizas, espaciado entre tramas, CSMA-CA, nodo oculto y nodo expuesto, formato de la trama.

**-Capa de red:** Otorga las funcionalidades para el armado y manejo de redes y una interfaz simple para las aplicaciones de usuarios. Se encarga de: establece la red, configuración de dispositivos, ruteado, y seguridad.

**-Capa de aplicación:** Nivel más alto de la especificación. Es la interfaz efectiva entre el nodo y el usuario. En él se ubican la mayor parte de los componentes definidos por la especificación como la funcionalidad requerida para los dispositivos. El estándar

Zigbee ofrece la opción de emplear perfiles en el desarrollo de aplicaciones. Un perfil de aplicación permite la interoperabilidad entre productos de diferentes fabricantes como si fuesen del mismo. La Zigbee Alliance define varios identificadores de perfil, un número de 16 bits de la capa de aplicación que define el perfil. (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014).

### 2.3.1 Funciones de Zigbee

Algunas funciones del estándar Zigbee, se indican a continuación:

- **Búsqueda de red (Network Scan)**

Es la capacidad de un dispositivo de sondear canales dentro de su rango de comunicaciones. Este rango es llamado a menudo POS (Personal Operating Space).

- **Creación de una red PAN (Creating)**

Es la capacidad de constituir una red sobre canales sin utilizar, en el POS.

- **Descubrimiento de dispositivos (Device Discovery)**

Es la capacidad de identificar los dispositivos en una PAN.

- **Descubrimiento de servicio (Service Discovery)**

Es la capacidad de determinar que características o servicios son soportados en los dispositivos dentro de una red.

- **Unión (Binding)**

Es la capacidad de comunicarse a nivel de capa aplicación con otros dispositivos en la red.

- **Asociación y Disociación de dispositivos (Joining and leaving a network)**

Es la habilidad de ganar nuevos miembros para la red y el proceso para que los miembros dejen la red.

- **Configuración de un nuevo dispositivo (Configuring a new device)**

La habilidad de configurar el stack para operaciones requeridas.

- **Direccionamiento (Addressing)**

La habilidad de un coordinador ZigBee para asignar direcciones a dispositivos nuevos en la red.

- **Sincronización en una red (Synchronization within a network)**

La habilidad de un dispositivo para lograr la sincronización con otro dispositivo a través del envío de tramas beacon o mediante poleo (polling).

- **Seguridad (Security)**

Aplicando seguridad a las tramas transmitidas y retirando la seguridad a las tramas recibidas.

- **Asignación de ruta (Routing)**

Enrutamiento de tramas a sus direcciones establecidas.

### **2.3.2 Trama de Zigbee**

Los dispositivos/módulos transceptores de Zigbee operan en una banda de frecuencias que incluye 2.4 GHz (mundial), banda de 902 a 928 Mhz (en Estados Unidos) y banda 866Mhz (en Europa). La transferencia de datos de hasta 250 Kbs puede ser transmitido en la banda de 2.4Ghz (16 canales), hasta 40kps en 915Mhz (10 canales) y a 20kps en la de 868Mhz (un solo canal). La distancia de transmisión puede variar desde los 10 metros hasta los 75, dependiendo de la potencia de transmisión y del entorno. Al igual que Wifi, Zigbee utiliza la DSSS (secuencia directa de espectro ensanchado) en la banda 2.4 GHz. En las bandas de 868 y 900Mhz también se utiliza la secuencia directa de espectro ensanchado, pero con modulación de fase binaria. (DomoDesk, 2011).

La estructura de este estándar, en la figura 2.6, muestra los campos de los cuatro tipos de paquetes básicos: datos, ACK, MAC y beacon o baliza.



Figura 2. 6. Tramas Zigbee en Capa Física y Capa MAC

Fuente: (DomoDesk, 2011)

El paquete de datos tiene una carga de datos de hasta 104 bytes. La trama está numerada para asegurar que todos los paquetes lleguen. Un campo nos asegura que el paquete se ha recibido sin errores. Esta estructura aumenta la fiabilidad en condiciones complicadas de transmisión. Otra estructura importante es la de ACK, o reconocimiento. Esta trama es una realimentación desde el receptor al emisor, para confirmar que el paquete se ha recibido sin errores. Se puede incluir un ‘tiempo de silencio’ entre tramas, para enviar un pequeño paquete después de la transmisión de cada paquete. (DomoDesk, 2011).

El paquete MAC, se utiliza para el control remoto y la configuración de dispositivos/nodos. Una red centralizada utiliza este tipo de paquetes para configurar la red a distancia. Para acabar, el paquete baliza ‘despierta’ los dispositivos, que escuchan y luego vuelven a ‘dormirse’ si no reciben nada más. Estos paquetes son importantes para mantener todos los dispositivos y los nodos sincronizados, sin tener que gastar una gran cantidad de batería estando todo el tiempo encendidos. (DomoDesk, 2011). Las redes Zigbee pueden usar el entorno ‘con balizas’ o ‘sin balizas’. Las balizas son usadas para sincronizar los dispositivos de la red, identificando la red doméstica, y describiendo la estructura de la ‘supertrama’. Los intervalos de las balizas son determinados por el coordinador de red y pueden variar desde los 15msg hasta los 4 minutos.



El modo ‘sin balizas’ es sencillo: se usa el acceso múltiple al sistema en una red punto a punto cercano. Funciona como una red de dos caminos, donde cada dispositivo es autónomo y puede iniciar una conversación en donde los otros pueden interferir. El dispositivo destino puede no oír la petición o el canal puede estar ocupado. (DomoDesk, 2011).

El modo ‘baliza’ es un mecanismo de control del consumo de potencia en la red. Este modo permite a todos los dispositivos saber cuando pueden transmitir. Aquí, los dos caminos de la red tienen un distribuidor que controla el canal y dirige las transmisiones. La principal ventaja de este método de trabajo es que se reduce el consumo de potencia.

El modo ‘sin balizas’, es típicamente usado en sistemas de seguridad, donde los dispositivos, por ejemplo, sensores, detectores de movimiento o de rotura de cristales, duermen el 99,999% del tiempo. Estos elementos ‘despiertan’ de manera regular para anunciar que siguen en la red. Cuando un evento tiene lugar (se detecta algo), el sensor se ‘despierta’ instantáneamente y transmite la alarma. El coordinador de red, alimentado de la red principal todo el tiempo, recibe el mensaje y activa la alarma respectiva.

El modo ‘baliza’ es más recomendable cuando el coordinador de red trabaja con una batería. Los dispositivos escuchan al coordinador de red durante el ‘balizamiento’ (envío de mensajes a todos los dispositivos, broadcast, entre 0.015 y 252 segundos). Un dispositivo se registra para el coordinador y mira si hay mensajes para él. Si no hay mensajes, el dispositivo vuelve a ‘dormir’, despertando según un horario establecido por el coordinador. Una vez hecho todo el ‘balizamiento’ el coordinador mismo vuelve a ‘dormirse’. (DomoDesk, 2011).

La capa física incluye adicionalmente sistemas de detección de energía recibida ED (Energy Detection), de indicación de la calidad del enlace LQI (Link Quality Indication) y de exploración de canal libre CCA (Clear Channel Assessment).

Soporta tanto direcciones de 64 bits (propuesta de IEEE) como direcciones cortas de 16 bits, que permiten el direccionamiento de más de 65.000 dispositivos, además de posibilitar la asociación y disociación de redes.

Para operar, el estándar opera con cuatro tipos o estructuras de trama:

- Trama de balizado para la transmisión de balizas (Beacon frames)
- Tramas de datos
- Tramas de asentimiento para confirmar la recepción (Acknowledgement frame)
- Tramas de comandos MAC

No está dentro del alcance del trabajo de titulación ahondar con más detalle en todas las tramas, principalmente cuando resulta similar a otros protocolos de transmisión de datos con confirmación (ACK).

En efecto, mediante las supertramas con baliza (Superframes con beacon) se permite la sincronización de todos los dispositivos de una red sin necesidad que estén permanentemente en modo de escucha, con el importantísimo ahorro de energía que esto representa. Los nodos solo despiertan cuando se provoca un broadcast de una supertrama; si la dirección no coincide con la del nodo, se vuelva al estado dormido. En la figura se representa el formato de una supertrama. (DomoDesk, 2011).

Se establece a priori un período entre balizas, que oscila entre 15,38 mseg. y 252 mseg. El coordinador establece en ese intervalo 16 espacios de tiempo o slots idénticos, por lo que el acceso al canal es sin contienda. El acceso al canal individual, sin embargo, está basado en contienda. Sin embargo, el nodo coordinador, que se define con posterioridad, siempre reserva 7 slots de cada intervalo para tráfico garantizado (GTS Guaranteed Timed Slots) para asegurar una mejor calidad.

En cuanto a las frecuencias utilizadas, encontramos tres bandas con 27 canales disponibles

2.4 GHz: 16 canales y 250 kbps

868.3 MHz: un canal y 20 Kbps

902-928 MHz: 10 canales y 40 Kbps

## 2.4 Comparaciones entre Bluetooth, Zigbee y ANT

Bluetooth está creado para aplicaciones como los teléfonos móviles o la informática casera y tiene un consumo eléctrico relativamente alto en comparación con *Zigbee* o ANT. Pues, en términos exactos, Bluetooth tiene un consumo de 40mA transmitiendo y 0.2mA en reposo, frente a los 30mA transmitiendo y 3 $\mu$ A en reposo de *Zigbee*. Es por ésta razón, que *bluetooth* no es una elección óptima en cuanto ahorro energético, pues este requiere de un bajo consumo puesto que va a depender de una pequeña batería. (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014).

Sin embargo, existe la posibilidad de emplear BLE pero debido al bajo conocimiento de este tipo de tecnología y a que todavía se encuentra en desarrollo, se opta desechar Bluetooth por completo para la implementación final. Por tanto, es importante señalar que antes de llegar a la solución final se realizarán pruebas con módulos JY-MCU, con tecnología Bluetooth para notar el funcionamiento de ésta y familiarizarse con la misma.

De esta manera, la elección se centra en Zigbee y ANT. Pues, se considera a Zigbee como una tecnología ‘perfecta’ puesto que presenta un bajo consumo, a una tasa de envío de datos reducida, con un alcance de más de 100 metros y lo más importante, es una tecnología creada para la interconexión de pequeños dispositivos con batería en una red de múltiples nodos, que es exactamente como se habían definido las redes inalámbricas de sensores. (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014).

Tabla 2. 4 Características de las tecnologías de comunicaciones inalámbricas

	<b>BLE</b>	<b>Zigbee</b>	<b>ANT</b>
<b>RX Sensibilidad</b>	-87 dBm	-102 dBm	-85 dBm
<b>TX Potencia</b>	0 dBm	0 dBm	0 dBm
<b>Frecuencia Hopping</b>	SI	NO	NO
<b>Frecuencia</b>	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
<b>Radio chip</b>	CC2450	XBee S2	AP2
<b>Programable</b>	SI	NO	NO
<b>Periodo de difusión</b>	100 ms	100 ms	10 ms
<b>Período entre paquetes de RF</b>	100 ms	100 ms	250 ms

Fuente: (Dementyev, Hodges, Taylor, & Smith, 2016)

ANT es una tecnología más desconocida que Zigbee y su mercado se reduce a dispositivos deportivos como se ha mencionado antes. A pesar de que el alcance es menor en ANT que en Zigbee, ANT presenta una ventaja muy significativa, la de un consumo de energía mínimo.

Sin embargo, se puede ver que para un escenario cíclico en el que los sensores inalámbricos envían datos cada cierto intervalo de tiempo y el resto de tiempo permanecen en modo dormido (“sleep”), ANT proporciona un consumo mayor que Zigbee. Esto es debido a que en modo “sleep” un dispositivo Zigbee no consume prácticamente energía. Por último, se puede decir que Zigbee es una tecnología estándar y no propietaria como ANT, permitiendo mayor libertad y compatibilidad. (Dementyev, Hodges, Taylor, & Smith, 2016).

Bluetooth Low Energy (BLE), Zigbee y ANT también tienen la ventaja real de que los dispositivos de consumo, tales como teléfonos celulares, los apoyan cada vez más, proporcionando un suministro listo de dispositivos 'hub' adecuados.

#### 2.4.1 Comparación de técnica de modulación entre Bluetooth y Zigbee

Ambas usan la técnica del espectro extendido. En la tabla 2.5 se muestra una comparación Bluetooth y Zigbee, se aprecia que Bluetooth usa FHSS y Zigbee usa DSSS.

Tabla 2. 5. Comparación de técnica modulación en Bluetooth y Zigbee

Característica	ZigBee	Bluetooth
Modulación	DSSS	FHSS
	11 chips/símbolo	1600 saltos/segundo
	62.5 Ksímbolo/segundo	1 Msímbolo/segundo
	4 bits/símbolo	1 bit/símbolo
Tasa de información pico	~ 127 Kbit/segundo	~ 108-723 kbit/segundo
Tiempo de enumeración	30 ms típico	≥ 3 s , típico 20 s
Tiempo de transición de dormido a activo	15 ms típico	3 s típico
Tiempo de un esclavo activo de acceso al canal	15 ms típico	2 ms típico

Fuente: (Dignani, 2011)

#### 2.4.2 Comparación en consumo de batería.

El consumo de energía es directamente proporcional al tiempo que los dispositivos estén en transmisión/recepción y esto está relacionado al tamaño del

paquete ya que cuanto más pequeño es el paquete antes los dispositivos entrarán en modo dormir. Por otro lado, cuanto más grande sea el paquete más se acerca la tasa efectiva de datos a la velocidad plana de la interfase. Bluetooth es un protocolo que se maneja en base a ranuras de tiempo. (Dignani, 2011).

La comunicación puede ocurrir en 1 ranura = 625 $\mu$ s, 3 ranuras= 1875 $\mu$ s ó 5 ranuras = 3125 $\mu$ s. Considerando que después de cada transmisión llega un ACK en la próxima ranura, se muestran en la Tabla 2.6 los tiempos en función de los tipos de paquetes.

Tabla 2. 6 Características de velocidad de transferencia de los paquetes Bluetooth

Tipo de paquete	Nº de ranuras	Carga máx. de inform. [bytes]	Tiempo total [ $\mu$ s]	Tasa efectiva [kb/s]
DH1	1	27	1250	172.8
DH3	3	183	2500	585.6
DH5	5	339	3750	723.2

Fuente: (Dignani, 2011)

En la figura 2.7 se puede ver cómo aparecen picos en la tasa efectiva de datos de Bluetooth. La carga se manda en ranuras y se debe usar una ranura tanto para enviar 2 bytes como para 5, 8 ó 27. Zigbee fue diseñado pensando en paquetes pequeños y se puede observar que, para paquetes de menos de 75 bytes, Zigbee tiene, a pesar de su baja velocidad física de transmisión de datos, una velocidad efectiva mayor que Bluetooth.

Por lo tanto, para pequeños paquetes Bluetooth va a gastar mayor energía debido a que necesita mayor tiempo de transmisión/recepción.

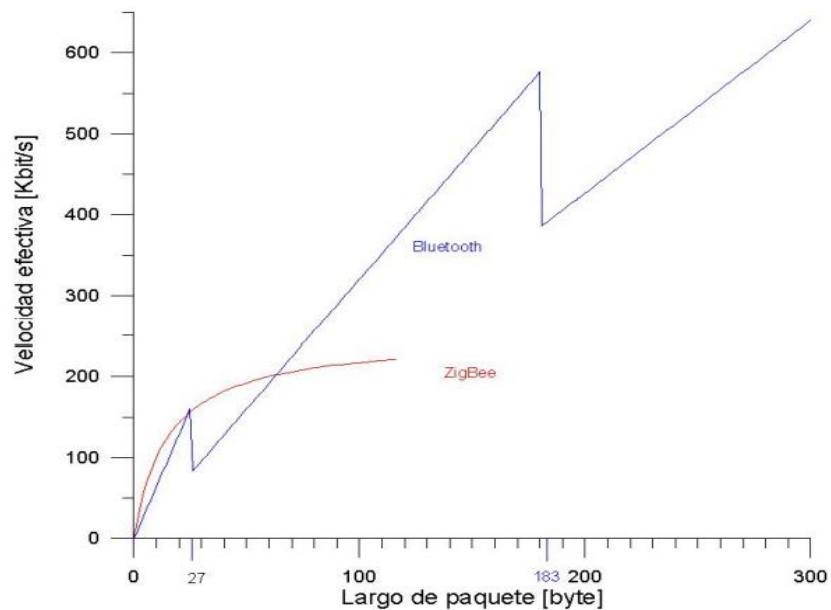


Figura 2. 7 Comparación de velocidad efectiva entre Zigbee y Bluetooth según largo del paquete  
Fuente: (Dignani, 2011)

La gráfica de la figura 2.7 se basa en los protocolos Bluetooth v1.1 y el IEEE 802.15.4 en condiciones ideales, esto es: el canal está vacío, no hay errores y no se necesita retransmisión. Otra diferencia notable es en el tiempo de enumeración. En Bluetooth se requieren típicamente 20 segundos contra 15 ms de Zigbee. Aparte Zigbee está muy bien preparado para realizar rápidamente el proceso de conexión y desconexión a la red, esto determina que se requiera la centésima parte de la energía que requiere Bluetooth para esta misma tarea.

Además, el protocolo Bluetooth se basa en encuestar a cada dispositivo esclavo y en cambio Zigbee se basa en CSMA-CA, que debe esperar a tener el canal libre. Esto no representa un problema porque en redes de muy bajo tráfico como redes de sensores, no hay competencia por el canal.

Como conclusión, el bajo consumo energético de Zigbee, permite usar pilas alcalinas tipo AA por más de 6 meses (hasta 2 años típico). Lo típico en Bluetooth es usar baterías recargables con periodicidad de carga de algunos días. Zigbee y Bluetooth son dos soluciones pensadas para aplicaciones diferentes. Bluetooth es apto para aplicaciones de baja latencia como audio y video. Es un protocolo maestro-esclavo para unos pocos dispositivos. Zigbee está diseñado para uso de sensores y

controles que usan mensajes cortos. Está preparado para redes tipo estrella ó entre pares de cientos de dispositivos.

Estas diferencias entre Zigbee y Bluetooth se originan en las arquitecturas de cada uno de estos protocolos y no parece probable que el cambio de versiones modificaría la situación.

## **2.5 Redes de sensores inalámbricas**

Una red de sensores inalámbricas WSN puede definirse como un grupo de nodos independientes, que se comunican de forma inalámbrica a través de frecuencia y ancho de banda limitados. A medida que avanza la tecnología, también aumentan las capacidades de las redes de sensores, limitado sólo por lo que puede ser tecnológicamente detectado, se prevé que WSN desempeñará un papel importante en nuestra vida diaria. La novedad de WSNs en comparación con las redes de sensores tradicionales es que dependen de un despliegue denso y la coordinación para ejecutar sus tareas con éxito.

Este método de detección distribuida permite una colocación más cercana a los fenómenos a alcanzar, cuando se desconoce la localización exacta de un evento particular, que es posible utilizando un único sensor.

En la figura 2.8 se aprecia el uso de Zigbee en un escenario de monitoreo de determinada variable de interés y que bien puede visualizarse en una pantalla, la conexión a internet y control de dichas variables de interés es catalogada como una red de sensores inalámbricos (WSN).

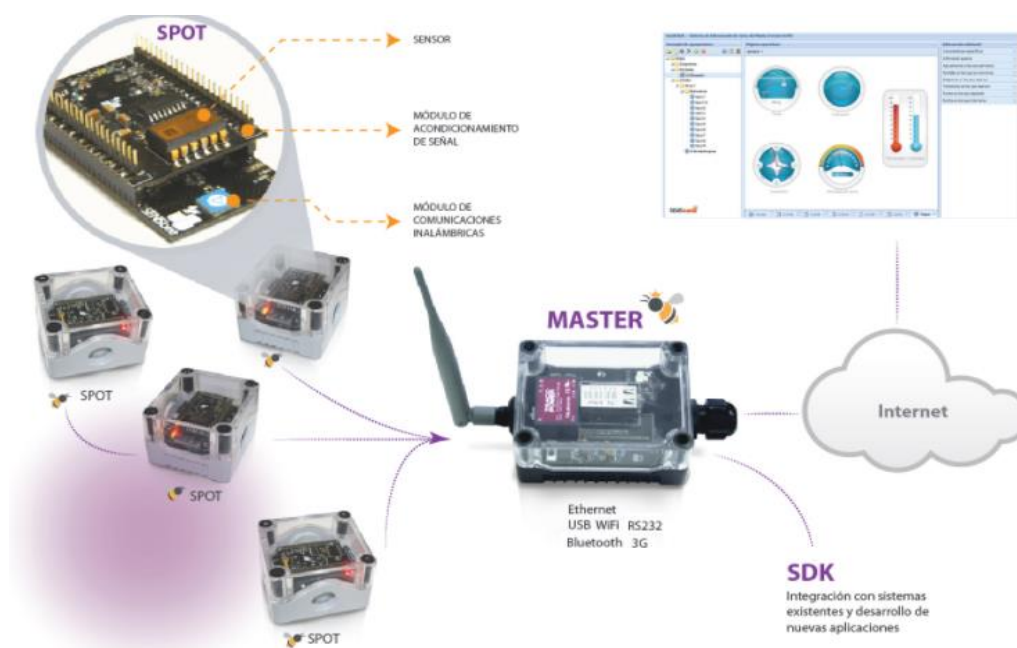


Figura 2. 8. Red Zigbee dentro de aplicación WSN

Fuente: (Cianca, 2012)

Un nodo principal es el master o coordinador que recibe los datos de cada nodo sensor o dispositivo final, el monitoreo según los fabricantes de los módulos pueden ser transmitidos en tiempo real. Los dispositivos finales son unidades autónomas que constan de un microcontrolador, una fuente de energía (casi siempre una batería), un radio transceptor (RF) y un elemento sensor. Los nodos actúan como elementos de la infraestructura de comunicaciones al reenviar los mensajes (datos) transmitidos por nodos más lejanos hacia al centro de coordinación (nodo master/coordinador). Hay que indicar que existen muchos fabricantes de módulos/nodos para Zigbee. A continuación, se describen algunos módulos en esta tecnología.

## 2.6 Módulos inalámbricos IEEE 802.15.4

Módulos para diseñar y desplegar una red Zigbee, pueden ser varios por una gran cantidad de fabricantes, elegir el módulo Zigbee apropiado dependerá de ciertas características técnicas a la hora del diseño o solución eficiente de monitoreo. La selección debe tener en cuenta aspectos tales como el precio y la sencillez de la programación. Existe una amplia variedad de dispositivos Zigbee (transceptor + micro) en el mercado actual que proveen un listado de fabricantes.



A continuación, se hace un compendio de los principales módulos y sus características.

❖ **Módulo Xbee ZNet 2.5 RF:**

- Bajo coste y bajo consumo típico de WSN.
- Fácil uso y entrega fiable de datos entre dispositivos.
- Pequeño tamaño.
- No está configurado para ningún nivel de aplicación específico.
- Muy extendido entre el público.
- No dispone de microcontrolador.
- Posee un software de programación gratuito y se puede descargar de la propia web del fabricante.
- Existe una versión superior que proporciona mayor potencia y cobertura a cambio de mayor tamaño y mayor consumo. (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014, pág. 20).

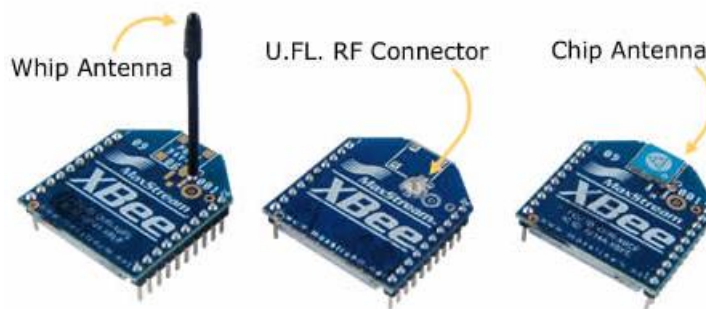


Figura 2. 9 Módulo Xbee ZNet 2.5 RF Series 2 de Digi

Fuente: (XBee, 2016)

❖ **EasyBee ZigBee Módulo Transceptor:**

- Contiene toda la circuitería de RF, una antena integrada, el regulador y el enchufe de unión.
- Posee un SPI de 4 cables que hacen de interfaz con el microcontrolador.
- La capa PHY incluye una impedancia al igual que la antena.
- La capa MAC incluye la generación CRC-16, la evaluación de canal clara, la detección de señal de energía, la seguridad, encriptación y autenticación.
- No precisa de una capa de red. Si se precisa Zigbee, se pueden encontrar pilas Zigbee libres. (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014)

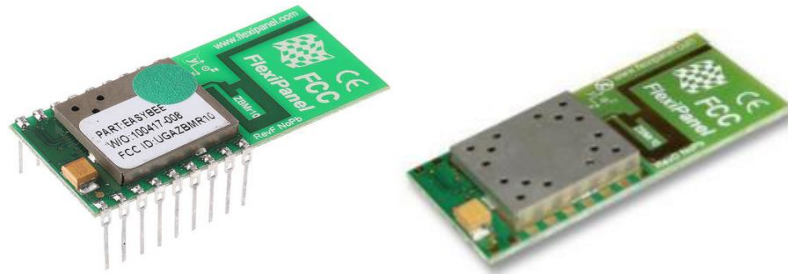


Figura 2. 10 Módulo EasyBee ZigBee Transceiver  
Fuente: (Catalogue Solutions , 2015)

❖ **Módulo ZB-21 Zigbee OEM:**

- Permite gran flexibilidad en las conexiones.
- Incluye transceptor y microcontrolador en un mismo PCB.
- Consumo cuidado con detalle: 23μA de consumo en estado dormido.
- Uno de los módulos con mejores prestaciones del mercado.

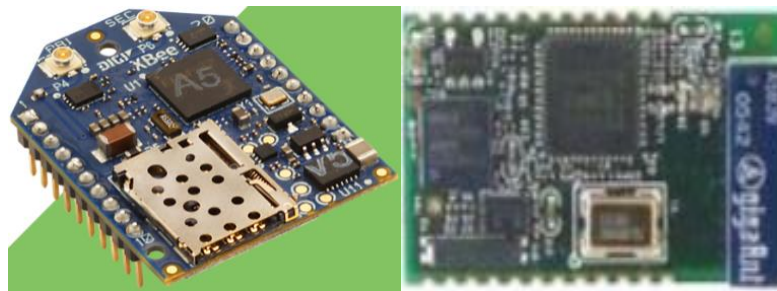


Figura 2. 11 Módulo ZB-21 Zigbee OEM  
Fuente: (ZigBee OEM RF Modules by MaxStream. , 2007)

❖ **Cirronet ZMN2400:**

- Provee flexibilidad y versatilidad para servir aplicaciones que van desde el reemplazo de cable en redes de sensores.
- Es fácil de integrar y aporta una comunicación inalámbrica robusta incluyendo la operación en una topología de tipo malla.
- Incluye el potente perfil de aplicación CSM de Cirronet, el cual elimina la necesidad del cliente de programar el firmware.



Figura 2. 12 Módulo Cirronet ZMN2400  
Fuente: (Catalogue Solutions , 2015)

### 2.6.1 Módulos XBee de Digi

Existen dos tipos de módulos XBee:

#### 1. Los módulos XBee Serie 1

Los módulos XBee PRO de la Serie 1 que se diferencian en la capacidad de alcance, permitiendo en algunos casos doblar la distancia de transmisión, ya que poseen una mayor potencia en la señal (Oyarce, 2010). Estos módulos utilizan un microchip hecho por *Freescale* para proveer comunicación simple de punto a punto, así como la implementación de redes tipo *mesh*.

#### 2. Los módulos XBee Serie 2

Los módulos XBee Serie 2 usan un microchip de *Ember Networks* que utiliza las normas basadas en la creación de redes *mesh* bajo el protocolo Zigbee y XBee Pro. Las redes *mesh* son el centro de la creación de redes robustas de sensores. Esta serie de módulos permiten una configuración para definir el tipo de comunicación a realizar (punto a punto o mesh), así como la función que desempeñará el radio en la comunicación. (Lore Heba, 2011).

Asimismo, con los módulos Xbee PRO de la Serie 2, es posible crear redes más complejas, como las llamadas MESH. Estas permiten acceder a un punto remoto, utilizando módulos intermedios para llegar como *routers*. Además, los módulos automáticamente generaran la red entre ellos, sin intervención humana alguna,

permitiendo la reparación de la red en caso de que algún nodo falle. Al mismo tiempo la red por sí sola resuelve la mejor ruta para un determinado paquete. (Oyarce, 2010).

Ambos tipos de módulos están disponibles en dos diferentes potencias de transmisión, la regular y la PRO. A continuación, se puede ver en la figura 2.13 un ejemplo de Red Mesh para módulos XBEE PRO.

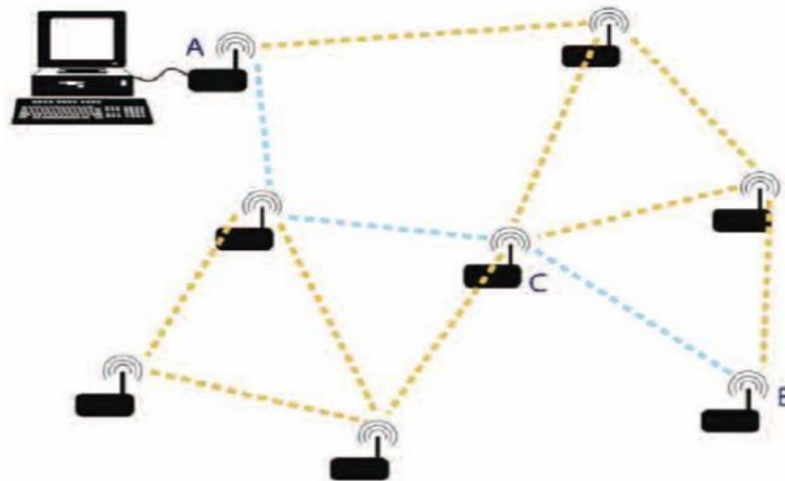


Figura 2. 13 Red Mesh para módulos XBEE PRO  
Fuente: (Oyarce, 2010)

En la figura 2.13 muestra un ejemplo de una red MESH. Se observa que se desea acceder al punto B a partir del punto A. Presumiendo que la distancia entre A y B es demasiado para que alcance la señal, entonces se utiliza la red MESH para poder alcanzarla, así cada nodo ubicado en medio del camino mostrado en color celeste funciona como módulo transparente, donde todo lo que le llega es retransmitido hacia el punto A. Esto funciona para cada uno de los módulos de la red.

Luego, se puede observar en la figura 2.14 las conexiones mínimas requeridas para el XBee y los dos tipos de módulos mencionados.

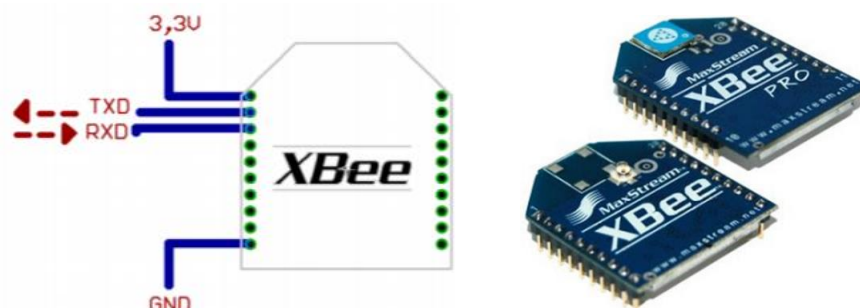


Figura 2. 14 Conexiones mínimas para el XBee y los tipos de módulos XBee  
Fuente: (Oyarce, 2010, pág. 12) (Lore Heba, 2011)

El módulo requiere una alimentación desde 2.8 a 3.4 V, la conexión a tierra y las líneas de transmisión de datos por medio del UART (TXD y RXD), para comunicarse con un microcontrolador o directamente a un puerto serial, utilizando algún conversor apropiado para los niveles de voltaje.

Finalmente, se muestra una tabla comparativa resumida entre los dos tipos de módulos.

Tabla 2. 7 Comparativa entre los dos tipos de módulos

	Serie 1	Serie 2
Alcance típico (interiores)	30 metros	40 metros
Mejor alcance (en línea recta)	100 metros	120 metros
Corriente de Transmisión/Recepción	45/50 mA	40/40 mA
Firmware	802.15.4 punto a punto	ZB Zig Bee mesh
Entradas/Salidas Digitales	8 I/O + 1 de solo entrada	11
Pines de entrada análogos	7	4
Pines análogos (PWM) de salida	2	Ninguno
Topologías punto a punto y estrella	Si	Si
Topologías Mesh y Cluster Tree	No	Si
Requiere nodo coordinador	No	Si
Configuración Punto a Punto	No	Más involucrado

Fuente: (Lore Heba, 2011)

Por otro lado, es necesario mencionar en este trabajo los modos de operación del módulo XBee y la misma, se realiza de la siguiente manera:

#### **Modo recepción/transmisión.**

Se encuentra en uno de estos modos cuando llega al módulo algún paquete RF por la antena (modo recepción) o cuando se manda información serial al buffer del pin 3 que luego será transmitida (modo transmisión).

#### **Modo de bajo consumo.**

Este modo hace posible que el módulo se encuentre en un estado de bajo consumo cuando no está en uso. La configuración de los ciclos de sueño se realiza mediante comandos. Por defecto, los ciclos de sueño están deshabilitados (módulo en estado de reposos/recepción).

Mediante el pin de hibernación Sleep\_RQ (pin 9) en estado alto, el módulo termina cualquier transmisión, recepción o procedimiento de asociación y entra en modo reposo y luego en modo sueño. En este estado no responde a comandos entrantes de ningún tipo. Sólo cuando se baje el estado lógico de Sleep\_RQ el módulo saldrá del estado de sueño y podrá volver a enviar y recibir datos.

Existe otro modo de sueño a parte del de controlado por pin, este es el modo de sueño cíclico que se basa en despertar al módulo cada cierto período para que compruebe si existen datos para enviar.

### 🚦 Modo de comando

En este modo es posible configurar parámetros del módulo mediante comandos AT. Para ello se debe emplear un software como el Hyperterminal de Windows o el X-CTU de Digi.

Se entra en modo de comando escribiendo por el terminal el string “+++”. Tras la devolución de un OK, es posible ingresar comandos mediante la sintaxis siguiente:

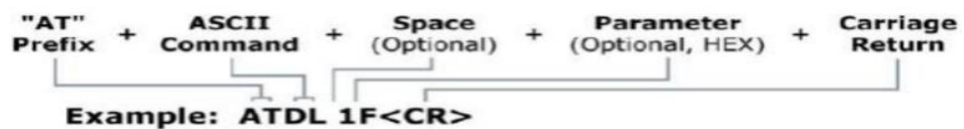


Figura 2. 15 Ejemplo comando AT  
Fuente: (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014)



Figura 2. 16 Entrada en el modo de comandos mediante el software X-CTU  
Fuente: (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014)

### **Modo transparente**

En modo transparente todo lo que ingresa por el pin 3 (DIN) se guarda en buffer de entrada y se transmite y aquello que ingresa como paquete RF se guarda en buffer de salida y se envía por el pin 2 (DOOUT) inmediatamente o tras el paso de un tiempo (parámetro RO). Este modo se destina a comunicación punto a punto, donde no es necesario ningún tipo de control.

### **Modo de operación API**

Cuando se encuentra en este modo, el módulo empaqueta en tramas toda la información que entra y sale. Estos definen operaciones y eventos del módulo.

Entre las opciones que permite la API, se definen:

- Transmitir información a múltiples destinatarios, sin entran al modo de comandos.
- Recibir estado de éxito/fallo de cada paquete RF transmitido.
- Identificar la dirección de origen de cada paquete recibido.

### **Modo IDLE**

Se encuentra en estado IDLE cuando el módulo no está en ninguno de los estados anteriormente mencionados.



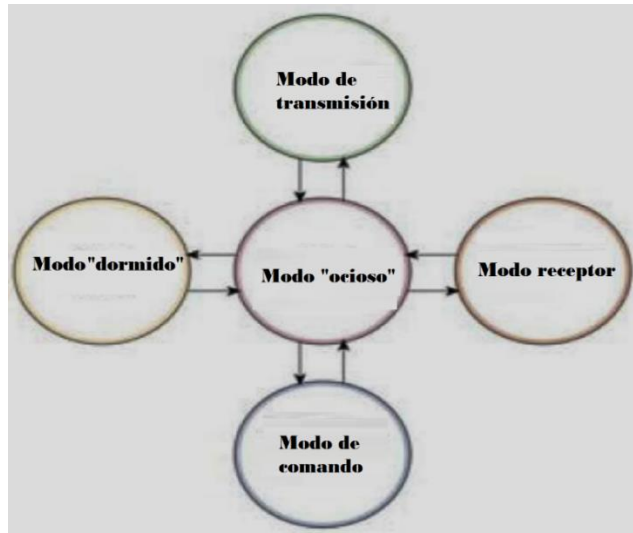


Figura 2. 17 Modos de funcionamiento del módulo Xbee

Fuente: el autor

### 2.6.2 Breakout board para el módulo Xbee

Exclusivamente se trata de una placa comercial para poner el módulo Xbee. Tiene como función convertir el molesto espaciado de pines del módulo Xbee a uno estándar de 0.1 pulgadas, ideal para el montaje en *protobards*.

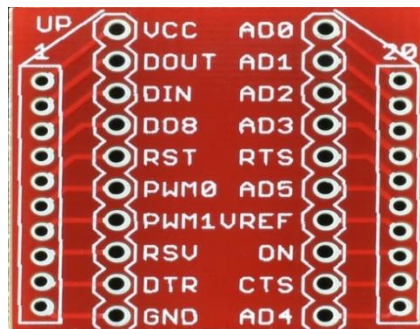


Figura 2. 18 Breakout Board de Sparkfun para Xbee

Fuente: (SparkFun Start Something, 2003)

### 2.6.3 Placa Xbee Explorer USB

Esta pequeña placa impresa contiene los pines de conexión para un módulo Xbee así como un controlador que sirve para programarlos y tomar sus datos. Sirve para todo tipo de módulos Xbee, tanto serie1 como serie2 y también para la versión Pro.

Está equipada con una entrada mini USB permitiendo conectar la placa a un computador y leer y escribir datos a partir del puerto serie.



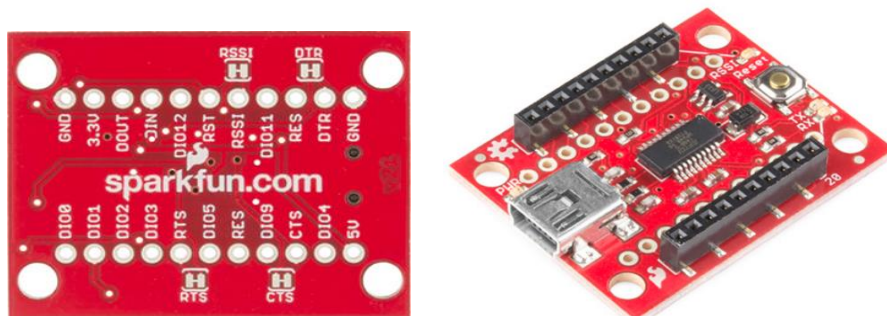


Figura 2. 19 Xbee Explorer USB  
Fuente: (SparkFun Start Something, 2003)



Figura 2. 20 Conexión del módulo Xbee al Explorer USB  
Fuente: (SparkFun Start Something, 2003)

## 2.7 Tecnología LORA

Dispositivos LPWAN (Low Power Wide Area Network), utilizan un bajo consumo de alimentación, operan en redes de alcance local, regional, nacionales o globales. LoRaWAN™ es una especificación para redes de baja potencia y área amplia, apunta a requerimientos característicos de Internet de las Cosas (IoT), tales como conexiones bidireccionales seguras, bajo consumo de energía, largo alcance de comunicación, bajas velocidades de datos, baja frecuencia de transmisión, movilidad y servicios de localización. Permite la interconexión entre objetos inteligentes sin la necesidad de instalaciones locales complejas, y además otorga amplia libertad de uso al usuario final.

La arquitectura de red típica es una red de redes en estrella, de forma que la primer estrella está formada por los dispositivos finales y las puertas de enlace, y la segunda estrella está formada por las puertas de enlace y un servidor de red central. En este caso las puertas de enlaces son un puente transparente entre los dispositivos finales y el servidor de red central.

Uno o más dispositivos finales se conectan a una o más puertas de enlace, mediante una conexión inalámbrica de un solo salto, usando tecnología RF LoRa™ o FSK, formando así una red en estrella. Una o más puertas de enlace se conectan al servidor de red central por medio de conexiones IP estándar, formando así una red en estrella.

Mantienen una velocidad de datos de 0,3 kbps a 50 kbps dependiendo del rango y duración del mensaje. Las distancias de transmisión pueden ser de hasta 15 o 20 km.

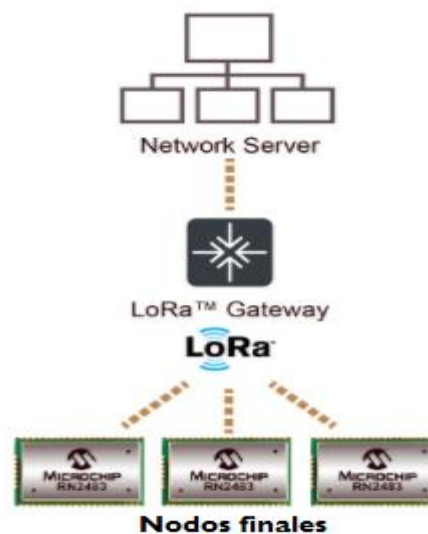


Figura 2. 21 Conexión de una red LoRa  
Fuente: (Rodríguez, 2016)

Las comunicaciones en distancias de más de 2 km se pueden conseguir incluso en ambientes urbanos muy densos. Una red bajo tecnología LoRa es de base IP compatible con IPv6 que es esencial para cualquier nuevo proyecto de desarrollo IoT.

Una red LoRa incluye portales que se conectan a un servidor de red central. Los extremos se comunican con una topología de red estrella, vía enlaces inalámbricos de un solo salto a los portales, y pueden transmitir a múltiples portales de manera simultánea ofreciendo así redundancia de enlaces. Solo se necesita una infraestructura ligera para ofrecer cobertura a un área amplia. (Rodríguez, 2016).

### 2.7.1 Módulo RN2903

Microchip Technology ofrece la serie RN2903 que es un módulo de 915 MHz totalmente certificado, basado en tecnología inalámbrica LoRa. RN2903 utiliza una modulación de espectro única dentro de la banda sub-GHz para largo alcance, baja

potencia y capacidad de la red alta. El módulo RN2903 tiene la pila de protocolos completa de LoRaWAN™ en el módem y es fácil de configurar a través de simples comandos ASCII a través del UART, lo cual reduce considerablemente el tiempo de desarrollo. RN2903 es certificado por FCC que ahorra significativos costos de certificación.



Figura 2. 22 Módulo RN2903 de Microchip

Fuente: Digikey, 2016

El módem RN2903 resuelve el dilema inalámbrico del programador de elegir entre una gama más extensa y un menor consumo de energía. Mediante el empleo del RN2903, un desarrollador puede maximizar ahora ambos, eliminando el costo de los repetidores adicionales y aumentando la duración de la batería. Con su escalabilidad, comunicación robusta, movilidad y la capacidad para operar en entornos hostiles al aire libre, el RN2903 es ideal para una amplia gama de diseños de control y monitoreo inalámbrico de baja velocidad de datos.

## 2.8 Batería en red Zigbee

Frecuentemente, a la hora de diseñar una red inalámbrica de sensores, se invierte mucho tiempo en resolver desafíos de conectividad y en pensar en las diferentes opciones de tecnología inalámbrica existentes para utilizar la mejor de todas. Sin embargo, la alimentación es un elemento del sistema tan importante como el resto. La elección de una batería adecuada puede determinar el éxito o fracaso de un proyecto de red Zigbee.

La duración de la batería va a ser un parámetro crucial en la vida útil del sensor. La capacidad total de una batería se mide en miliamperios-hora (mAh) o amperios-hora (Ah). Una capacidad de 3Ah significa que la batería puede suministrar 3A durante una hora o 1A durante 3 horas. Asimismo, es importante especificar cuándo una batería está vacía, esto es, cuando la tensión cae por debajo de cierto nivel necesario en el

exterior. Por ejemplo, en una celda de 1.5V como puede ser una pila AA, se considera vacía la batería si la tensión cae a 0.9V. (Young, 2008).

Normalmente existen dos criterios importantes a la hora de elegir una batería. Tal y como se describe a continuación:

- ✚ El primero tiene que ver con la temperatura. Las baterías frías conservan bien la electricidad y las baterías calientes suministran bien la electricidad, por tanto, es bueno conservar la batería en un lugar a baja temperatura y calentarla cuando se vaya a suministrar energía. Este hecho cobra importancia en una aplicación como la nuestra pues tratamos con sensores de temperatura. En principio no expondremos los sensores a temperaturas extremas y normalmente se tomarán datos a temperatura ambiente, por lo que se pasará por alto el diferente comportamiento de las baterías según la temperatura, sin embargo, es importante no olvidarlo para futuros trabajos. (Young, 2008).
  
- ✚ La segunda regla se refiere a la no linealidad de las baterías. La capacidad de una batería está relacionada con la corriente que se le pide suministrar y esta no es líneas. Un alto consumo de corriente hace disminuir la capacidad de la batería. Por ejemplo, una batería podría tener una capacidad de 1000mAh para un consumo de corriente a 5mA, sin embargo, la misma batería podría tener una capacidad de 500mAh para un consumo de corriente de 200mA. Esto no es muy intuitivo, pero es importante. Suponer que una batería es lineal para toda corriente es peligroso, y solo es cierto cuando los cambios de temperatura y de corriente son muy pequeños. (Young, 2008).

Además, habrá que tener en cuenta aspectos como los voltajes de alimentación de los módulos Xbee (2.8 – 3.4 V) y el tamaño de la batería.

A continuación, se puede ver los diferentes tipos de baterías que existen y seleccionar la más adecuada.

### 2.8.1. Baterías alcalinas

Las baterías alcalinas son las más conocidos en hogares y son muy adecuadas para una gran variedad de aplicaciones de electrónicas, sobre todo, porque las empresas de baterías han perfeccionado la química de las baterías de manera que lo hacen mucho mejor en el abastecimiento de grandes cantidades de corriente.

Las pilas alcalinas son de bajo costo, ampliamente disponibles y son ideales para aplicaciones de baja corriente a temperatura ambiente. Por tanto, tienen dos grandes dificultades: una, son muy malas en condiciones frías y no tienden a funcionar correctamente en condiciones de alta corriente.

En la figura 2.22 se puede apreciar el modelo de una pila alcalina de tamaño AA típica a diferentes temperaturas y corriente. Es más, se ve cómo la capacidad de una pila alcalina es excelente a bajas corrientes y a temperaturas altas. (Young, 2008)

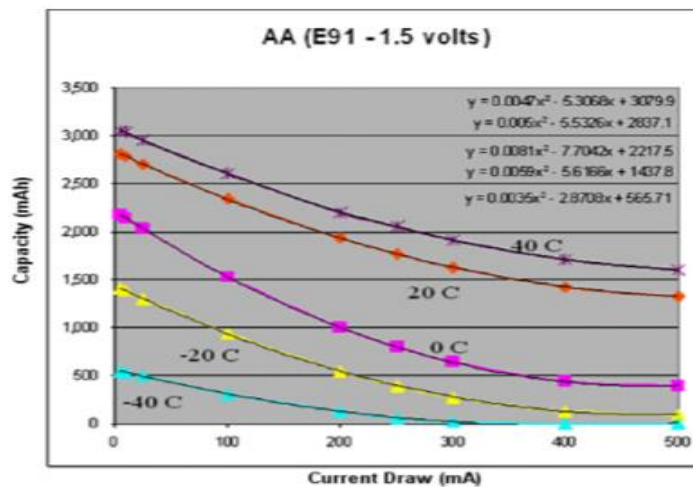


Figura 2. 23 Temperatura actual de la batería alcalina AA

Fuente: (Young, 2008)

### 2.8.2 Baterías de litio

Existen muchas variedades de baterías de litio. Sin embargo, es complicado clasificar a todas en un mismo grupo que siga un modelo común, pero sí tienen unas características comunes. En especial, nos apuntaremos en la fórmula hierro-disulfuro, porque es la batería de litio más común disponible en tamaños AA. Este tipo de batería se usa normalmente como un reemplazo de las pilas alcalinas que se requiere una vida más larga, mayor consumo de corriente o un mejor desempeño de la temperatura. Las baterías de litio-hierro disulfuro no son recargables. La gran ventaja de las baterías

desechables de litio es que lo hacen mucho mejor en condiciones de baja temperatura y condiciones de alta tasa actual (Young, 2008).

La figura 2.23 se puede observar un modelo de las baterías de hierro-disulfuro de litio de tamaño AA típicas a diferentes temperaturas y la corriente de llama. Observe también cómo los niveles de capacidad a cabo a corrientes más altas y no lo hace tan mal a bajas temperaturas.

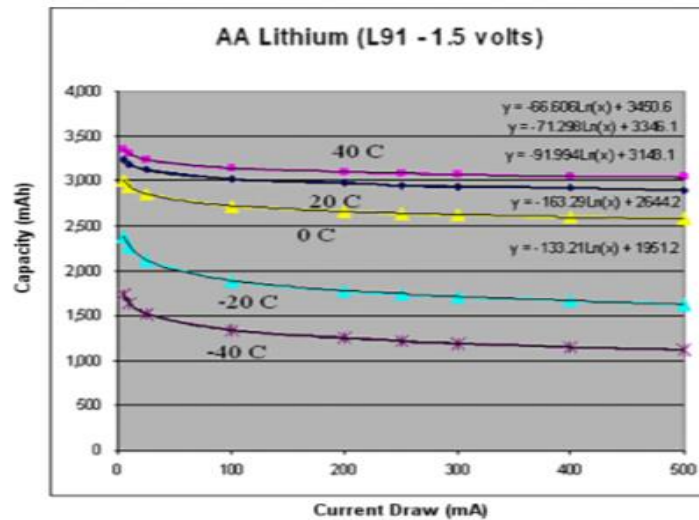


Figura 2. 24 Temperatura actual de una batería de hierro-sulfuro de litio AA  
Fuente: (Young, 2008)

### 2.8.3. Baterías níquel e hidruro metálico (NiMH)

Es una de las mejores baterías recargables. A diferencia de su pariente, la batería de níquel-cadmio (NiCad), tiende a conservar sus características tras muchas recargas. Aunque sus mayores obstáculos es que es relativamente pesado y que tiene una densidad de energía más bajo, lo que significa que una batería de NiMH típica de tamaño AA se iniciará a 1,2 V, en lugar del convencional de 1,5 V para una batería alcalina AA. (Young, 2008).

Es la batería alcalina de las recargables y su comportamiento en capacidad sigue un modelo similar detallado por un polinomio de segundo orden, con un mejor proceder a bajas temperaturas y no disminuye tan rápidamente la capacidad, a medida que aumenta la demanda de corriente. Por lo tanto, tiene un mejor rendimiento a bajas temperaturas y no disminuye tan rápidamente a medida que aumenta el consumo de corriente. (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014).

La Figura 2.24 muestra un modelo de una batería de NiMH de tamaño AA.

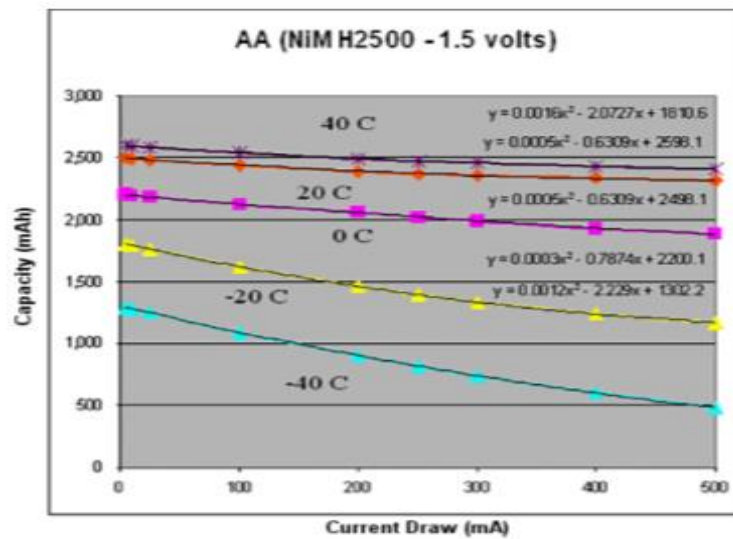


Figura 2. 25 Temperatura actual para una batería de NiMH de tamaño AA

Fuente: (Young, 2008)

#### 2.8.4 Elección de la batería

Conocida las ventajas y desventajas de cada tipo de batería, se puede determinar que para una aplicación en la cual las temperaturas no van a ser extremas; pues, la mejor elección es una batería alcalina típica de 9V, porque ofrece una muy buena calidad de precio.

Por consiguiente, es importante observar que las alimentaciones del sistema son de 5V (SHT15) y 3.3V (Xbee). El que se emplea es una pila de 9V, no va a suponer un problema porque Arduino cuenta con una entrada ( $V_{in}$ ) de alimentación a un regulador (AMS1117) que otorga salidas de 5V y 3.3V. (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014).

## **CAPÍTULO III:**

### **RECOLECCIÓN DE DATOS EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN**

El modelo de la agricultura de la precisión consiste en sensores no cableados para asistir a la recolección de datos en un entorno de cultivos, terrenos con siembras y en donde la vegetación diferente al cultivo podría impedir un modelo del control de la irrigación, de la humedad, fertilidad del suelo, índice de área foliar, temperatura de la hoja, contenido de clorofila foliar, datos del clima local, infestación de malezas de insectos, estado de las aguas de las plantas etc. En la literatura científica de la agricultura de precisión llama recopilación de datos ‘espaciales’, a la adquisición de datos disponible para la gestión eficiente del desarrollo de los cultivos, plantaciones y rendimiento de los granos.

La agricultura de precisión (AP) involucra el uso de sistemas de posicionamiento global (GPS) y de otros medios electrónicos para obtener datos del cultivo. Las tecnologías de la agricultura de precisión permiten satisfacer una de las exigencias de la agricultura moderna: el manejo óptimo de grandes extensiones. Se presenta como principal ventaja que el análisis de resultados de los ensayos se puede realizar por sectores diferentes dentro de un mismo lote, y de esta manera ajustar el manejo diferencial dentro de los mismos.

Por ejemplo, los rendimientos de dos cultivos pueden ser idénticos si se usan los promedios, pero diametralmente opuestos en una situación de loma y en una de bajo en un determinado lote. Este dato sólo podrá obtenerse mediante la realización de un mapa de rendimiento. Del mismo modo, podrán analizarse, el tipo y la dosis de fertilizante a aplicar, la densidad de semilla, la fecha de siembra, el espaciamiento entre hileras, etc. El uso de las tecnologías de la agricultura de precisión puede ayudar a mejorar los márgenes, a través de un aumento del valor del rendimiento (cantidad o calidad), de una reducción en la cantidad de insumos, o de ambos simultáneamente.

#### **3.1 Los datos en la agricultura de precisión**

Un sistema para la agricultura de precisión consta de un instrumento de recopilación de datos, un vehículo gestor, sistemas de recogida y control de datos en máquinas agrícolas. Los datos de las máquinas agrícolas son recuperados por el



instrumento de recopilación de datos a través de la red local. A continuación, se puede almacenar, analizar y transmitir al vehículo administrador a través de radio inalámbrica. Con base en esta información, el supervisor de vehículos monitorea y controla las prestaciones de las máquinas agrícolas.

El sistema de cartografía puede mejorar el rendimiento del ensilaje (alimento que resulta de la fermentación anaeróbica de un material vegetal húmedo mediante la formación de ácido láctico) y consta dicho sistema de un sensor de humedad, un módulo GPS, células de carga y módulo de comunicación inalámbrica Bluetooth.

El sistema con sensores de infrarrojos, controladores lógicos programables y transceptores de radio de baja potencia se utiliza para recoger y transmitir los datos a un receptor remoto situado fuera de la granja. El sistema de control de riego de precisión se desarrolla mediante el uso de sensores inalámbricos y se puede programar para que funcionen in situ según los datos de detección remota para una aplicación particular.

Determinar la cantidad de fertilizante que se utilizará para los cultivos y plantaciones es posible con sensado en tiempo real y con GPS. Estos datos recopilados pueden ser monitoreados por los agricultores mediante el uso de servidor web. Aplicaciones de precisión para el agro contiene información sobre plaguicidas, infestación de enfermedades y pronósticos climáticos que se pueden descargar directamente a través de internet.

La figura 3.1 y 3.2 muestra una ilustración de máquinas y equipos para el agro conectado en red, la comunicación entre sus diversos nodos sensores, puede utilizar tecnologías como; Zigbee y Bluetooth.



Figura 3. 1 Equipos y máquinas conectados para el agro

Fuente: (Marko, 2015)

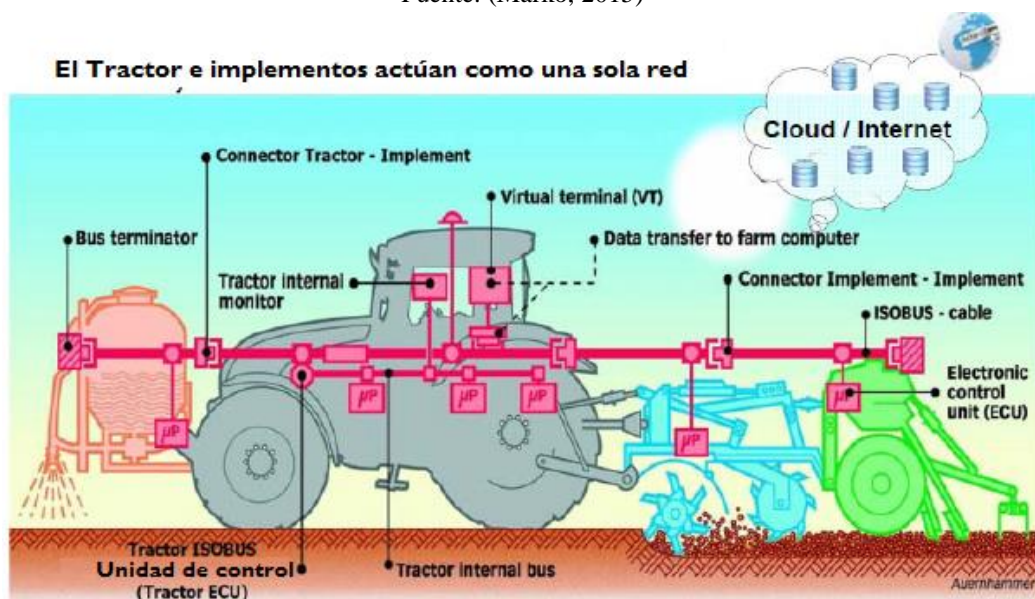


Figura 3. 2 Tractor autónomo con sensores para siembra

Fuente: (Marko, 2015)

La agricultura de precisión es una colección de tecnologías de recopilación de datos, análisis y predicción. Describe un grupo de tecnologías diseñadas para recopilar y analizar información detallada sobre el cultivo y las condiciones de cultivo que alimentan modelos complejos diseñados para proporcionar acciones o recomendaciones para mejorar los rendimientos, determinar la cantidad de fertilización y reducir los costos, con esto se alcanza productividad agrícola.

De acuerdo con Eduardo Barros, líder de productos agroalimentarios Accenture, señala que un estudio piloto de seis meses encontró que la agricultura de precisión mejoró la productividad global de los cultivos en un 15%.

Los nuevos sensores y equipos para la medición de datos granulares, la recopilación de datos, la integración con fuentes de datos de terceros como modelos meteorológicos e imágenes satelitales, y el análisis de grandes volúmenes de datos utilizan los servicios en la nube: el mismo ecualizador de tecnología que permite a las empresas de dos personas desarrollar software que utiliza cientos de servidores puede proporcionar analíticas agrícolas sofisticadas.

### 3.1.1 Computación en la nube

La computación en nube es un sistema informático basado en Internet en el que grandes grupos de servidores remotos están conectados en red para permitir el intercambio de tareas de procesamiento de datos, almacenamiento centralizado de datos y acceso en línea a servicios o recursos informáticos. Las nubes pueden ser clasificadas como públicas, privadas o híbridas.

Al combinar los aspectos de IoT y los grandes datos, la agricultura de precisión tiene mucho en común con las aplicaciones analíticas en expansión en muchas otras industrias. Los servicios en la nube pueden acelerar el análisis y reducir las barreras a los agricultores que necesitan inteligencia accionable. La agricultura de precisión será un campo interesante para supervisar tanto los avances tecnológicos como las oportunidades de inversión.

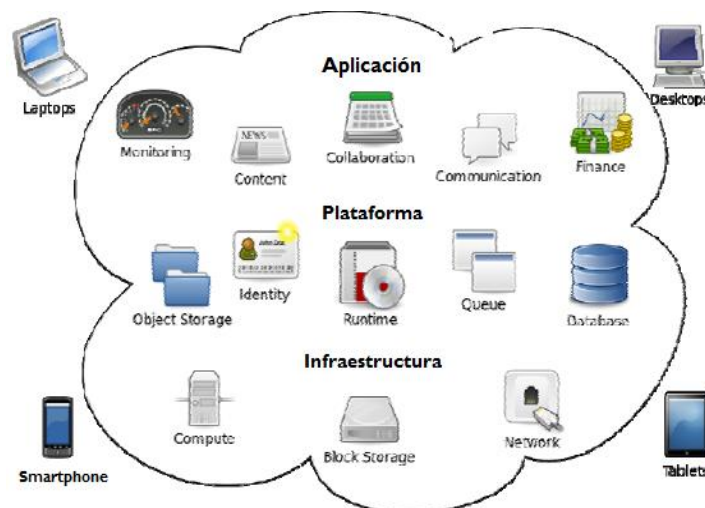


Figura 3. 3 Esquema de la computación en la nube  
Fuente: (Marko, 2015)

La aparición de redes WSN permite a los agricultores trabajar a cualquier hora del día o de la noche o en condiciones climatológicas adversas como niebla, polvo, etc., trabajan a mayor velocidad, precisión y seguridad, lo que reduce las extensas

jornadas durante los periodos de siembra. La figura 3.4 muestra la agricultura en el pasado y el futuro de la agricultura, con potencial de rendimiento eficiente con la recolección y monitoreo de datos.

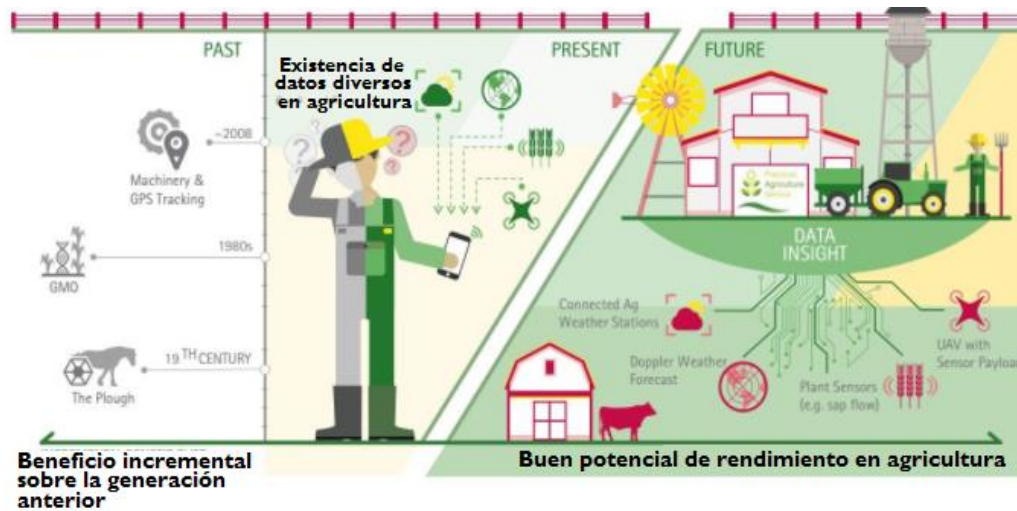


Figura 3. 4 Pasado y futuro para la agricultura  
Fuente: (Marko, 2015)

### 3.2 Caso de monitoreo de viñedo

Un caso sería un sistema para un viñedo, que realiza una recogida mecanizada diferente según la información aportada por el enólogo de las distintas zonas y calidades de la uva, en función del suelo, la topografía, el microclima o la salud de la vid. Estas sofisticadas cosechadoras incorporan además del GPS y la teledirección sensores meteorológicos y ambientales.

De este modo, la máquina es capaz de diferenciar y recoger los distintos tipos de uvas y separarlas en diferentes tolvas. Esta misma tecnología permite realizar los tratamientos fitosanitarios, la poda en verde o el abonado.

Los sistemas de telemetría son capaces de controlar las operaciones de toda una flota de maquinaria, registrando desde la posición de la máquina hasta los consumos a lo largo de la jornada, así se puede documentar y reflejar en un mapa las diferencias de producción de unas zonas a otras para en años posteriores aplicar únicamente las cantidades necesarias de fertilizantes. Este procedimiento es competente para realizar dosis de siembra variables y hacer pasadas por el mismo sitio tras cada tratamiento, evitando dañar el cultivo.

Con el fin de rentabilizar al máximo una parcela, se llevan a cabo estudios sobre el terreno en los que se recogen una serie de datos con los que se elabora un «software». Este programa informático se incorpora a los tractores y sembradoras para llevar a cabo una siembra a la carta: se adapta tanto la densidad del cultivo como la profundidad del mismo, según las características del terreno. Esta técnica lleva tiempo desarrollándose en Estados Unidos. (Nates, 2013).

### **3.2.1 Beneficios de la agricultura de precisión**

Muchos autores concuerdan que es posible implementar diversas técnicas de recolección de datos para la agricultura de precisión:

- Sistemas de guía de mecanización en predios (GPS, DGPS, RTK, Sistemas ajustados al usuario).
- Sistemas de información geográficos y su relación con manejo predial.
- Sensores de evaluación edáfica (evaluación de variación de suelo y plantas).
- Evaluación temporal de variables de producción (asociado a efectos potenciales ejercido por cambio climático).
- Estadística Espacial y datos analíticos.
- Integración de información espacial.
- Efectos del Clima y variables estáticas sobre las plantas y su relación espacial, asociado a potenciales diferenciadores del terreno o sitio.

Estas técnicas no se usan únicamente para la siembra, sino también en la cosecha. Véase en la figura 3.5 el proceso de monitoreo de un viñedo.

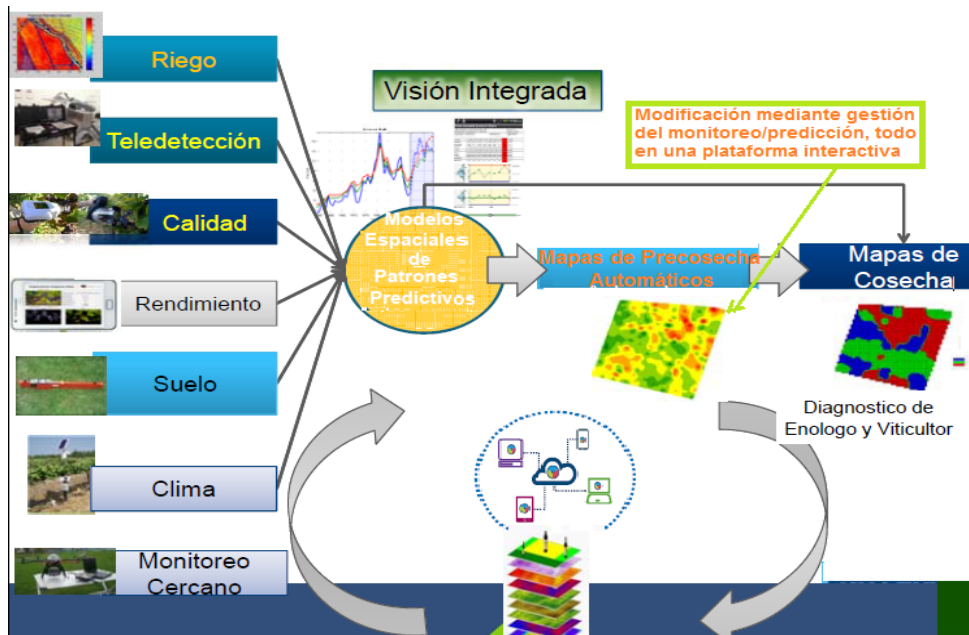


Figura 3. 5 Ejemplo de monitoreo en viñedo  
Fuente: (Marko, 2015)

En la figura 3.5 es un ejemplo puntual de la agricultura de precisión: monitoreo y control tanto en la siembra y cosecha. Las apariciones de nuevas tecnologías de censado ayudaran a conformar sistemas de monitoreo y control continuo de variables en la agricultura de precisión, estos sistemas pueden ser:

- Sistemas continuos de control de riego y desarrollo de alertas tempranas.
- Sistemas de control continuo de evolución de cultivos (dendrómetros ópticos, etc.).
- Sistemas de control continuo de actividad fisiológica de la planta.
- Sistemas de control continuo de plagas.
- Sistemas de control continuo de clima y desarrollo de alertas tempranas.



Figura 3. 6 Nuevas tecnologías para monitoreo y control continuo de variables  
Fuente: elaborado por el autor



En la figura 3.7, se muestra un sistema para monitorear cultivos pequeños y dispersos.

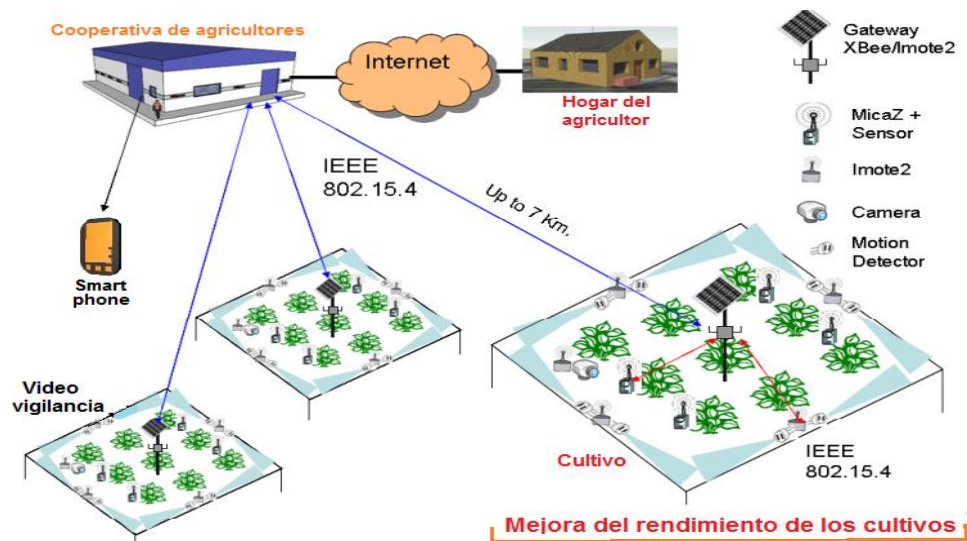


Figura 3. 7 Representación de monitoreo con red Zigbee  
Fuente: (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014)

### 3.3 Caso de monitoreo y control en invernaderos

Las aplicaciones WSN para el control y monitoreo de los parámetros en un invernadero es un escenario de la agricultura de precisión. Una red de sensores está compuesta por un gran número de pequeños dispositivos autónomos, llamados nodos sensores (motas). El objetivo principal es monitorear y controlar los ambientes según los requisitos del cultivo. Todos los sensores son reconfigurables según las etapas del crecimiento de los cultivos, cambios dinámicos en el área seleccionada, naturaleza del suelo, clima, estación y tipo de cultivo. Un invernadero típico puede ser como se muestra en la figura 3.8.

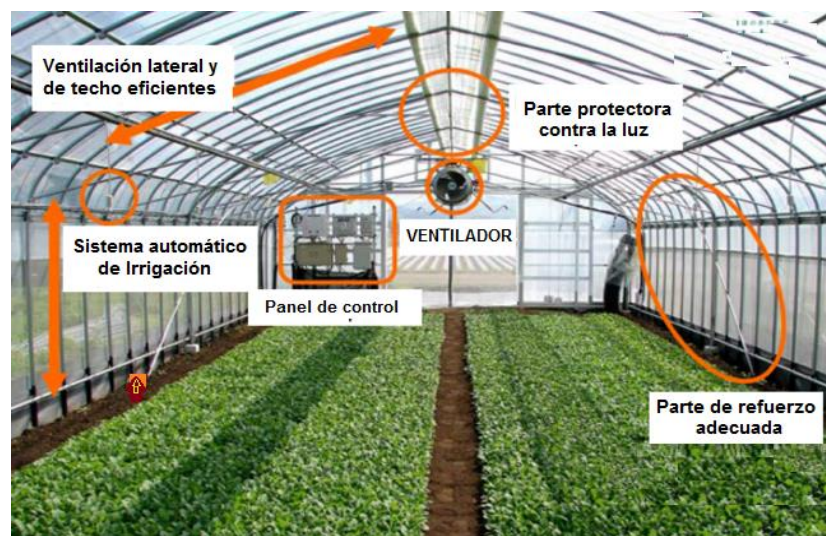


Figura 3. 8 invernadero típico  
Fuente: (Sensprout, 2017)

Según las condiciones reales del invernadero y los requisitos de la cosecha, se espera que la aplicación controle actuadores como la bomba, irrigador de agua, correderas deslizantes de techo y paredes, el ventilador etc.

### 3.3.1 Números de sensores y parámetros de entrada

El número total de nodos de sensor y actuadores depende del tamaño del invernadero. Aproximadamente 200 nodos son suficientes si el tamaño de casa verde es 35m x 200 m. Este es el tamaño físico del área de destino. Está bajo el rango de capacidad de detección del hardware. Los nodos sensores pueden clasificarse como "A", "B" y "C". Cuando el tipo 'A' es el sensor climático para el exterior, y el tipo 'B' es el sensor climático para el interior del invernadero. Máximo dos nodos son más que suficientes para el exterior.

Los sensores tipo 'B' pueden colocarse a una distancia de 10 a 15 metros de diámetro, para capturar condiciones ambientales precisas. Los sensores tipo 'C' son sensores de suelo, los cuales son recomendados para usar, según el plan de distribución de la plantación de cultivos. También pueden controlar el flujo de agua del sistema de riego utilizado en Invernadero. Se utilizan normalmente cada dos metros.

Los diferentes rangos de parámetros de control en varios modos para algunos cultivos típicos son los que se muestran en la Tabla 3. 1. Esta información se recogió de la hoja de datos sobre el cultivo.

Tabla 3. 1 Variables a controlar según tipo cultivo

Cultivo	Temperatura °C	CO <sub>2</sub> (PPM)	Luz K Lux	Humedad		Valor de pH
				Aire	Suelo	
Claveles	16-22	1000	45-50	65	16	5.5-7.0
Margaritas	27-30	1000	35-40	65	17	5.5-6.5
Anturios	24-26	1000	18-35	75	20	5.5-6.5
Tomate	16-35	1500	45-50	65	16	5.5-7.0
Rosas	15-30	1000	30-40	70	17	4.0-5.5

Fuente: Elaborado por el autor



### **3.3.2 Parámetros del sensor y su uso en el sistema**

El principal objetivo del sistema WSN para la agricultura de precisión en invernaderos, es controlar la condición climática según la hoja de datos del cultivo. El sensor exterior está diseñado para recopilar información sobre el clima exterior de la casa verde como temperatura, presión, luz, humedad, CO<sub>2</sub>, velocidad del viento y dirección del viento. Todos estos parámetros proporcionan información sobre el clima. Con la ayuda de esto, el sistema decidirá la acción sobre los controles como, en el control de flujo de aire exterior, control de cortinas/s/pantalla contra la luz solar directa y el calor del sol y rociadores (para mantener la humedad y la temperatura).

En el control típico de invernaderos, es necesario vigilar la dirección del viento y el flujo del viento. Estos dos parámetros ayudan al sistema a decidir el control de los ventiladores que se colocan en diferentes lugares para lanzar el aire interior hacia afuera o viceversa, de modo que se sincronice con el flujo exterior.

Sensores de suelo se colocan en el terreno, para medir el parámetro del suelo se utilizarán sensores basados en el reflectómetro de tiempo (TDR, Time-Domain Reflector). Así se espera obtener la humedad del suelo, la temperatura del suelo, el pH del suelo y la conductividad eléctrica del suelo. En un ambiente en tiempo real, sólo se necesita dos de ellos, la temperatura del suelo y la humedad del suelo. Esto ayudará a decidir si el rociador o el riego por deriva debe ser controlado. Otros parámetros ayudarán a mejorar la condición del suelo a través de fertilizantes u otro tratamiento del suelo o aplicación adicional para decidir el tratamiento del suelo.

### **3.3.3 Control climático del invernadero**

El crecimiento de los cultivos está influenciado principalmente por las variables climáticas ambientales circundantes, la cantidad de agua y los fertilizantes suministrados por el riego. Como el clima y la fertilización son temas independientes, tienen diferentes problemas de control. La necesidad exacta de nutrientes y cantidad de agua para diferentes especies de cultivos puede ser muy bien controlada, por la máquina automatizada que trabaja en los datos recogidos. La cantidad de agua y fertilizantes que requiere la planta es una función de las condiciones climáticas ambientales en las que el crecimiento del cultivo depende.

Las variables de control climático son el comportamiento dinámico del invernadero. El microclima es una combinación de procesos físicos que incluyen transferencia de energía (que incluye radiación y calor) y balance de masa (que incluye los flujos de vapor de agua y la concentración de CO<sub>2</sub>).

Este sistema depende de las condiciones ambientales de salida, la arquitectura del invernadero, el rendimiento de los actuadores de control y la variedad de cultivo. La ventilación adecuada y la calefacción son la principal forma de controlar el clima de la variedad del cultivo. Para controlar la temperatura interior, la humedad se utiliza luz artificial. La inyección de CO<sub>2</sub> es un control que influye en la fotosíntesis y el empañamiento.

Existen métodos para las condiciones climáticas de las estaciones para invernadero, donde la producción en invernaderos se realiza sin enriquecimiento de CO<sub>2</sub>.

Los diferentes sistemas suplementarios de distribución de aire tienden a utilizarse junto con sistemas de enfriamiento o calefacción para reducir la heterogeneidad del microclima (temperatura, humedad y CO<sub>2</sub>) como se ha dicho es uno de los factores clave para el crecimiento uniforme de los cultivos. En la figura 3.9 se muestra un esquema de variables controladas y sus perturbaciones para un invernadero típico.

Las principales variables climáticas que controlar son la temperatura y la humedad. La radiación fotosintéticamente activa que es el rango espectral de 400 a 700 W/m<sup>2</sup>. Son utilizadas por las plantas como fuente de energía en el proceso de fotosíntesis.

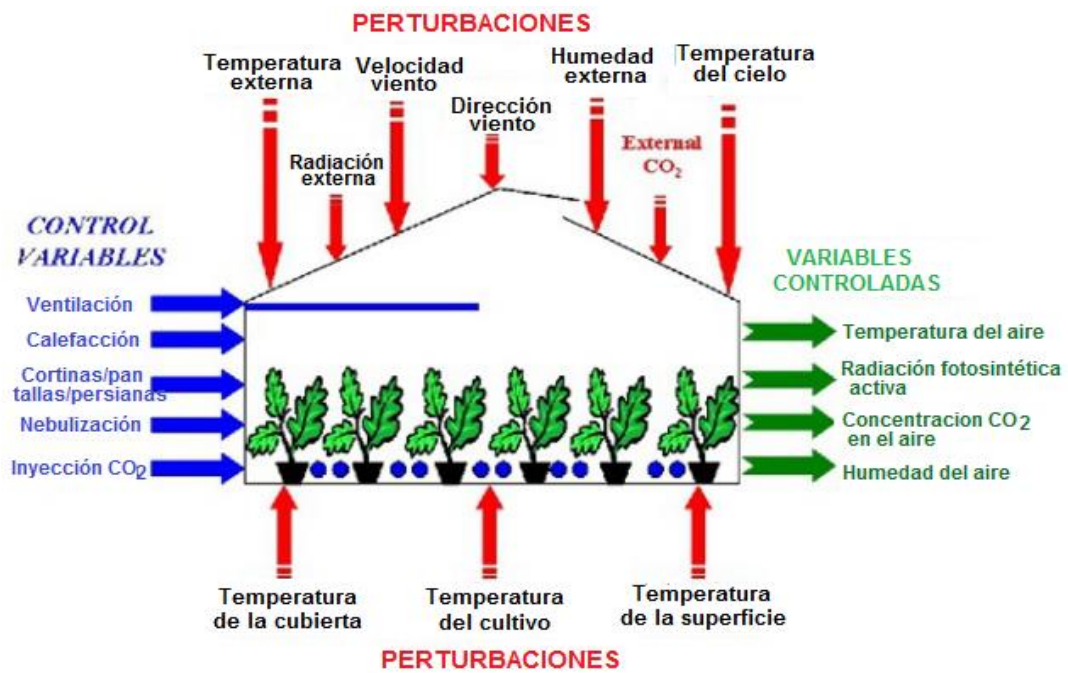


Figura 3. 9 Variables de interés a controlar y sus perturbaciones en invernadero  
Fuente: (Pawlowski, Rodríguez, Guzman, & Berenguel, 2010)

La radiación de fotosíntesis se controla con pantallas de sombra, pero su uso no se extiende mucho, solo en los países en desarrollo en el mundo, donde la agricultura es el negocio principal emplean la tecnología no solo para la calidad del producto sino para ser más productivos.

### 3.3.4 Topología Cluster-Tree

La topología Cluster-Tree es una estructura de árbol a varias estrellas, en esencia un árbol desbalanceado, en la figura 3.10 se muestra el esquema de topología árbol de racimo.

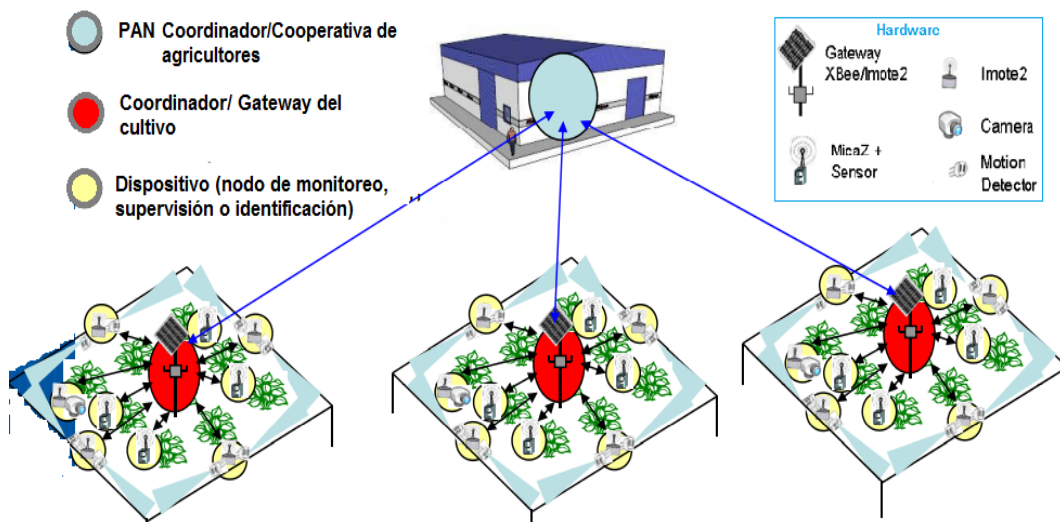


Figura 3. 10 Topología estrella de una red zigbee para agricultura de precisión  
Fuente: (Pawlowski, Rodríguez, Guzman, & Berenguel, 2010)

A veces, esta solución puede producir una gran carga de tráfico en la red (en un sistema de control de invernadero típico, todos los datos se transmiten cada minuto o incluso más rápido) e introducir retrasos en la entrega de los paquetes de datos.

Cuando la carga de la red aumenta, la probabilidad de pérdidas de datos aumenta también, y este factor puede ser muy negativo para el rendimiento del control. En algunos ejemplos extremos, el sistema de control necesita una estructura de red dedicada para minimizar el retardo de tiempo y las pérdidas de datos.

Por otro lado, el desarrollo de estructuras de red en lugares con grandes distancias, como instalaciones de invernadero, puede llegar a ser muy costoso y con una gestión complicada. Las redes inalámbricas presentan una solución económica y útil a este problema, y más concretamente, WSN para registrar datos y propósitos de control. Sin embargo, la mayoría de los transceptores en WSN están alimentados por baterías y el consumo de energía es un parámetro crítico.

Cada transmisión significa el consumo de energía y por lo tanto estos sistemas presentan el problema de la limitación en la cantidad de datos a transmitir. En la figura 3.11 se muestra la forma de comunicación entre el nodo coordinador principal ubicado en una casa (cooperativa de agricultores) y el gateway (nodo coordinador que estará comunicándose con dispositivos finales (nodos equipados con cámara, sensores, etc.).

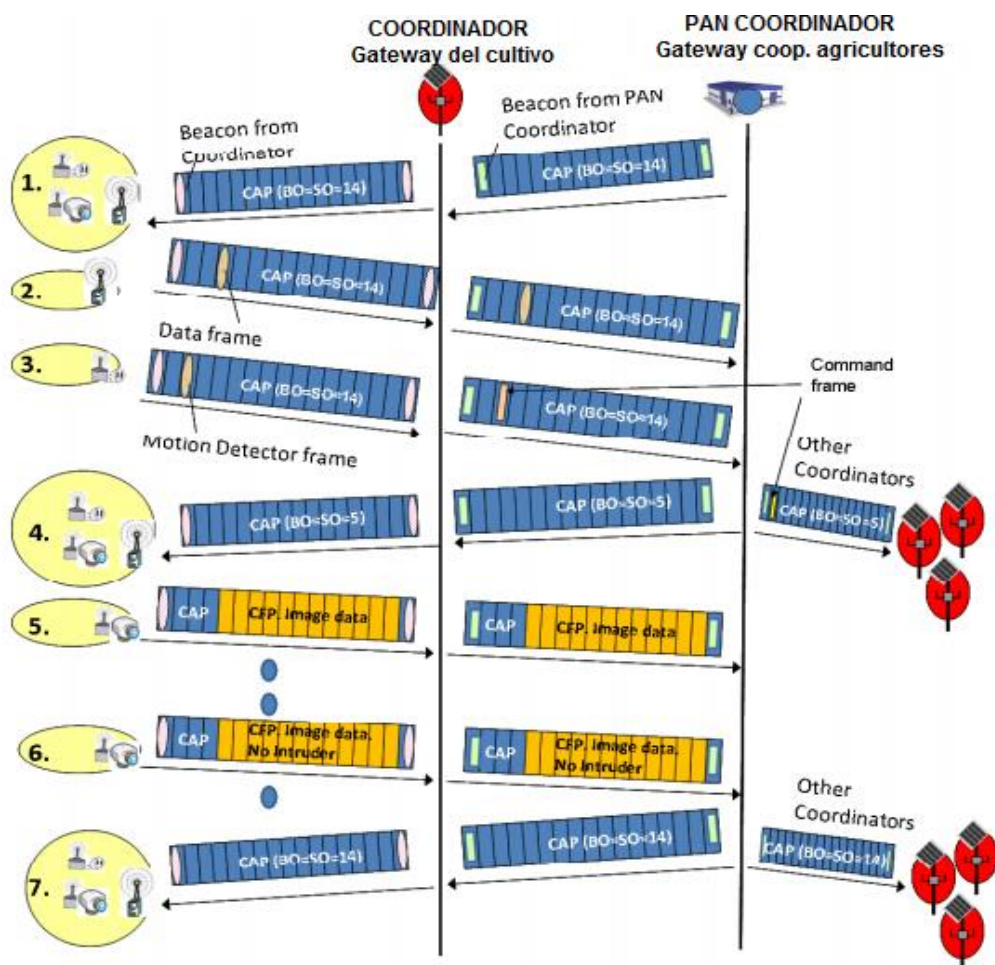


Figura 3. 11 Direccionamiento y tramas de comunicación Zigbee  
Fuente: (Pawlowski, Rodríguez, Guzman, & Berenguel, 2010)

Dos mecanismos de acceso al canal se implementan en 802.15.4. Para una red ‘sin balizas’, un estándar ALOHA CSMA-CA envía reconocimientos positivos para paquetes recibidos correctamente. En una red ‘con balizas’, una estructura de ‘supertrama’ se usa para controlar el acceso al canal. La supertrama es estudiada por el coordinador de red para transmitir ‘tramas baliza’ cada cierto intervalo (múltiples cada de 15.38 msg, hasta cada 252 seg.). Esta estructura garantiza el ancho de banda dedicado y bajo consumo. En el subcapítulo 2.3.3 se detalló la supertrama zigbee con beacon o baliza.

Los dispositivos se direccionan empleando 64-bits y un direccionamiento corto opcional de 16 bits. El campo de dirección incluido en MAC puede contener información de direccionamiento de ambos orígenes y destinos (necesarios para operar

punto a punto). Este doble direccionamiento es usado para prevenir un fallo dentro de la red. (DomoDesk, 2011).

Las redes Zigbee pueden usar el entorno ‘con balizas’ o ‘sin balizas’. Las balizas son usadas para sincronizar los dispositivos de la red, identificando la red domótica, y describiendo la estructura de la ‘supertrama’. Los intervalos de las balizas son determinados por el coordinador de red y pueden variar desde los 15msg hasta los 4 minutos.

El modo ‘sin balizas’ es sencillo: se usa el acceso múltiple al sistema en una red punto a punto cercano. Funciona como una red de dos caminos, donde cada dispositivo es autónomo y puede iniciar una conversación en donde los otros pueden interferir. El dispositivo destino puede no oír la petición o el canal puede estar ocupado.

El modo ‘baliza’ es un mecanismo de control del consumo de potencia en la red. Este modo permite a todos los dispositivos saber cuando pueden transmitir. Aquí, los dos caminos de la red tienen un distribuidor que controla el canal y dirige las transmisiones. La principal ventaja de este método de trabajo es que se reduce el consumo de potencia. (DomoDesk, 2011).

El modo ‘sin balizas’, es típicamente usado en sistemas de seguridad, donde los dispositivos, por ejemplo, sensores, detectores de movimiento o de rotura de cristales, duermen el 99,999% del tiempo. Estos elementos ‘despiertan’ de manera regular para anunciar que siguen en la red. Cuando un evento tiene lugar (se detecta algo), el sensor se ‘despierta’ instantáneamente y transmite la alarma. El coordinador de red, alimentado de la red principal todo el tiempo, recibe el mensaje y activa la alarma respectiva.

El modo ‘baliza’ es más recomendable cuando el coordinador de red trabaja con una batería. Los dispositivos escuchan al coordinador de red durante el ‘balizamiento’ (envío de mensajes a todos los dispositivos, broadcast, entre 0.015 y 252 segundos).

Un dispositivo se registra para el coordinador y mira si hay mensajes para él. Si no hay mensajes, el dispositivo vuelve a ‘dormir’, despertando según un horario

establecido por el coordinador. Una vez hecho todo el ‘balizamiento’ el coordinador mismo vuelve a ‘dormirse’. (DomoDesk, 2011).

Técnicas que permitan que sólo se transmitan los datos necesarios y, por lo tanto, sólo se consuma la potencia necesaria son desafíos actualmente. En este trabajo de titulación, se ha simulado el WSN basado en el protocolo IEEE 802.15.4 Zigbee y su combinación con el muestreo basado en eventos en el problema de control climático del invernadero.

### 3.4 Modelos Empíricos de propagación de ondas electromagnéticas

Los modelos empíricos se basan en la extrapolación estadística de resultados a partir de medidas realizadas sobre el terreno. Las influencias propias del entorno son tenidas en cuenta de manera implícita en su conjunto, sin ser reconocidas cada una de ellas de manera aislada., siendo ésta la principal ventaja de estos modelos. Por el contrario, su precisión depende no solo de la precisión de las medidas sino de la similitud entre el entorno donde fueron llevadas a cabo las medidas y el entorno a analiza. (García, 2006).

#### 3.4.1 Modelo de Propagación en el Espacio Libre

En espacio libre, la energía radiada por una antena omnidireccional se propaga por la superficie de una esfera (figura 3.12). El área de la superficie de una esfera de radio  $d$  es  $(4\pi)^2 d^2$

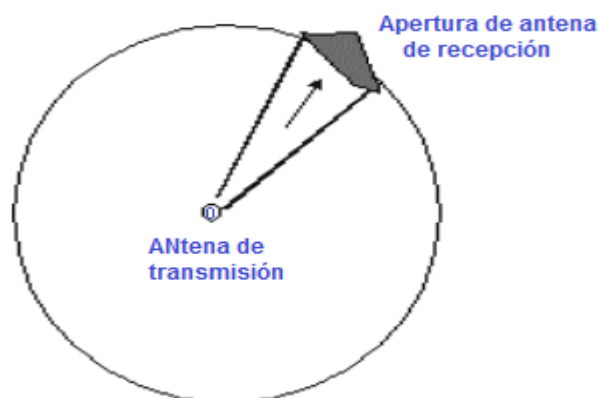


Figura 3. 12 Apertura recibida en una antena  
Fuente: (García, 2006)

El Modelo de Propagación en Espacio Libre se utiliza para predecir la potencia de la señal cuando entre el transmisor y el receptor existe una clara línea de vista. Los

sistemas de comunicación por satélite y los enlaces microondas se pueden modelar como propagación en el espacio libre.

Como la mayoría de los modelos de propagación a gran escala, el modelo del espacio libre predice que la potencia recibida decae como función de la distancia de separación entre el transmisor y receptor elevada a alguna potencia. La potencia recibida en el espacio libre por una antena receptora, la cual está separada de la antena transmisora una distancia  $d$ , está dada por la ecuación de Friis:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (\text{Ec.3.1})$$

Donde:

$P_r(d)$ : potencia recibida; la cual es función de la separación T-R (transmisor-receptor)

$P_t$ : potencia transmitida

$G_t$ : ganancia de antena transmisora

$G_r$ : ganancia de la antena receptora

$\lambda$ : longitud de onda en metros

$d$ : la distancia de separación de T-R en metros

$L$ : pérdidas del sistema no achacables a la propagación

La ganancia de la antena está dada por:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (\text{Ec.3.2})$$

La apertura efectiva  $A_e$  se relaciona con el tamaño físico de la antena y con la frecuencia de la portadora mediante:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega_c} \quad (\text{Ec.3.3})$$

Donde  $f$  es la frecuencia de la portadora en Hz,  $\omega_c$  es la frecuencia de la portadora dada en radianes por segundo y  $c$  es la velocidad de la luz en metros/segundo.

Los valores de  $P_t$  y  $P_r$  deben ser expresados en las mismas unidades, y  $G_t$  y  $G_r$  son cantidades adimensionales. Las pérdidas  $L$  son usualmente debidas a la atenuación de la línea de transmisión, a las pérdidas por filtros, y a las pérdidas de la antena en los



sistemas de comunicación. Cuando  $L=1$  significa que no hay pérdidas en el sistema. (García, 2006).

Las pérdidas por trayectoria representan la atenuación de la señal como una cantidad positiva medida en dB, y se definen como la diferencia entre la potencia radiada efectiva y la potencia recibida. Puede o no incluir el efecto de ganancia de las antenas; cuando se incluyen la ecuación es la siguiente:

$$PL(dB) = 10 \cdot \log \left( \frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \cdot \log \left( \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right) \quad (\text{Ec.3.4})$$

Cuando la ganancia de las antenas es excluida, se asume que tiene ganancia unitaria y la ecuación se convierte en:

$$PL(dB) = 10 \cdot \log \left( \frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \cdot \log \left( \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right) \quad (\text{Ec.3.5})$$

La ecuación de Friis muestra que la potencia de la señal recibida se atenúa de acuerdo al cuadrado de la distancia entre el transmisor y el receptor, lo que implica que decae 20 dB/década. Cuando se conoce la potencia recibida en una distancia de referencia  $d_0$ , la ecuación siguiente puede utilizarse para calcular la potencia recibida en una distancia más lejana:

$$P_r(d) = P_r(d_0) + 20 \log(d_0/d) \quad (\text{Ec.3.6})$$

La misma ecuación expresada como pérdida de trayecto sería

$$PL(d) = PL(d_0) + 20 \log(d/d_0) \quad (\text{Ec.3.7})$$

La ecuación de Friis sólo es válida para predecir  $P_r$  para valores de  $d$  que estén en la región conocida como far-field de la antena transmisora. La región farfield o región de Fraunhofer de una antena transmisora se define como la distancia más allá de la distancia  $d_f$ , la cual se relaciona con la dimensión mayor de la apertura numérica de la antena transmisora y con la longitud de onda de la portadora. (García, 2006). La distancia de Fraunhofer está dada por:

$$d_f = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda} \quad (\text{Ec.3.8})$$

Donde D es la dimensión física mayor de la antena. Adicionalmente para estar en la región far-field se debe satisfacer  $d_f \gg D$  y  $d_f \gg \lambda$ . Además, queda claro que la ecuación no es válida para  $d=0$ .

### 3.4.2 Modelo de pérdida: Shadowing y multipath

La potencia recibida será la suma de una serie de señales que llegan de distintas direcciones, debido a las reflexiones con objetos cercanos y objetos que bloquean parcialmente la señal. De esta manera la potencia recibida resultante puede ser mayor o menor que la potencia que encontraríamos en caso de espacio libre.

Además, si los objetos reflectantes se mueven respecto a los receptores, la potencia recibida variará con el tiempo, esto es que para una misma distancia la potencia recibida varía a lo largo del tiempo. También hay que tener en cuenta que grandes obstáculos como edificios, paredes o suelos en la línea de visión directa con el receptor atenúan la señal, reduciendo de esta manera la potencia recibida.

Estas diferencias de fase pueden provocar, en la señal recibida resultante, interferencias constructivas i/o destructivas a lo largo del tiempo. El resultado de estas interferencias es que la señal recibida, y por lo tanto la potencia recibida, varíe muy rápidamente según el modelo de propagación en espacio libre. Concretamente la variación de la potencia recibida es del orden de la longitud de onda de la señal, con lo que estas variaciones se le suelen denominar efectos de propagación a corta escala.

La figura 3.13 muestra la relación entre la potencia recibida y la transmitida en dB en función del logaritmo en base diez de la distancia, para los efectos combinados de path loss, shadowing y multipath.

Estos efectos que producen una variación de la potencia recibida o del path loss que difieren de la variación en espacio libre son conocidos como shadowing y multipath.

El path loss es causado por la disipación de potencia, radiada por el transmisor, debido a los efectos del canal de propagación. Como se observa en la ecuación (3.5) el path gain, que es el inverso del path loss, es el mismo para una distancia dada.

El shadowing es causado por los obstáculos que se encuentran entre el transmisor y el receptor y produce una atenuación de la señal a causa de la absorción, reflexión y difracción. Puede haber casos extremos donde la atenuación es lo suficientemente grande como para eliminar totalmente el nivel de señal. La variación de la potencia recibida, de forma considerable, debido al path loss ocurre a largas distancias (100 1000 metros) y debido al shadowing ocurre a distancias proporcionales al tamaño del objeto que obstruye la visión directa (10-100 metros en escenarios exteriores y menor en escenarios interiores). Dado que las variaciones debido al path loss y al shadowing ocurren a distancias relativamente largas, estas variaciones se suelen referir como efectos de propagación a gran escala. (Egea, 2009).

Por último, el multipath es causado por los objetos que reflejan la señal transmitida de forma que en el receptor se obtiene una suma de señales que han llegado por distintos caminos y por ello tienen fases distintas.

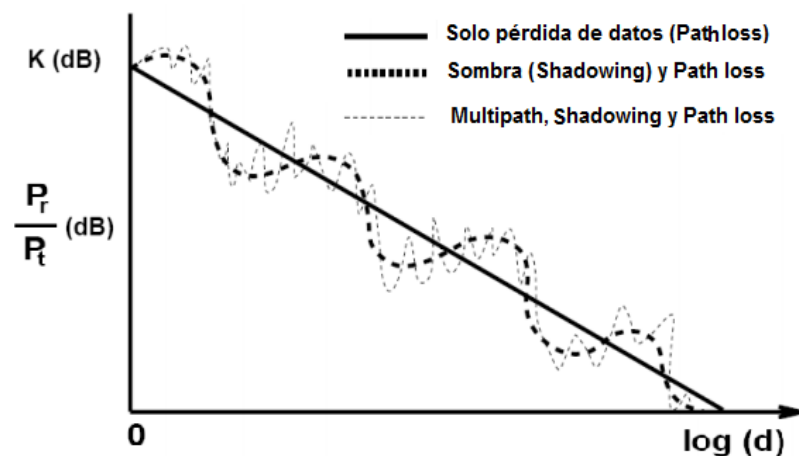


Figura 3. 13 Efectos de path loss, shadowing y multipath en función de la distancia  
Fuente: (Egea, 2009)

En la literatura científica en lo que respecta a pérdida de trayecto, concuerda que existen otras fuentes de distorsión para una señal con información, así se tiene:

- Efectos de trayectoria múltiple: Reflexión, difracción, dispersión, absorción
- Ondas rebotadas, olas nuevas, olas múltiples

- Efecto Doppler
- Cambio de frecuencia (pérdida de centro)
- Debido a movilidad o osciladores inestables
- Ruido térmico (ruido blanco), crosstalk
- Efectos de calibración del hardware
- Efectos multipath

El fading o desvanecimiento se refiere a la variación en función del tiempo puede ser lento (por ejemplo, sombreado) o rápido (por ejemplo, multitrayecto). La fiabilidad de recepción de paquetes depende de la modulación, codificación y longitud.

La detección de problemas de cobertura en redes de sensores inalámbricos es una medida de calidad de servicio (QoS). La cobertura se refiere a cuán bien un campo de detección es supervisado o rastreado por los sensores. El objetivo de analizar y evaluar un modelo de pérdida de trayecto es para obtener una estimación a priori para el número de sensores que se desplegarán en un entorno no ideal, es decir áspero para lograr la cobertura deseada.

Se ha propuesto el estudio de un modelo de canal de detección que considera el impacto combinado de los efectos de atenuación de sombra y multitrayecto. Un modelo matemático para calcular la probabilidad de cobertura en presencia de desvanecimiento por trayectos múltiples combinado con sombreado se deriva en base a la intensidad de señal recibida (RSS). Además, las derivaciones de probabilidad de cobertura obtenidas mediante el desvanecimiento de Rayleigh y el desvanecimiento de sombreado log normal se validan mediante la implementación de nodos utilizando la distribución de Poisson.

Un modelo de detección propuesto es más adecuado para un entorno realista ya que determina el número óptimo de sensores necesarios para la cobertura deseable en condiciones de desvanecimiento.

### 3.4.3 Modelo Dos Rayos

El modelo de Dos Rayos es utilidad para analizar y conocer la reflexión de la señal de onda electromagnética sobre la tierra, se basa en óptica geométrica. Las técnicas basadas en trazado de rayos se fundamentan en la Óptica Geométrica. Este método se desarrolló originalmente para analizar la propagación de la luz y considera el transporte de energía en rayos, sin precisar si la energía se propaga en forma de ondas o de partículas.

El algoritmo de trazado de rayos más empleado es el método de lanzamiento de rayos, también conocido como Ray Launching, consiste en lanzar un número finito de rayos desde el transmisor, con una distribución de rayos en el ángulo sólido uniforme, hasta alcanzar al receptor. El algoritmo calcula todos los posibles caminos entre ellos teniendo en cuenta los efectos de reflexión de las paredes, difracción, dispersión difusa y penetración a través de diversos materiales.

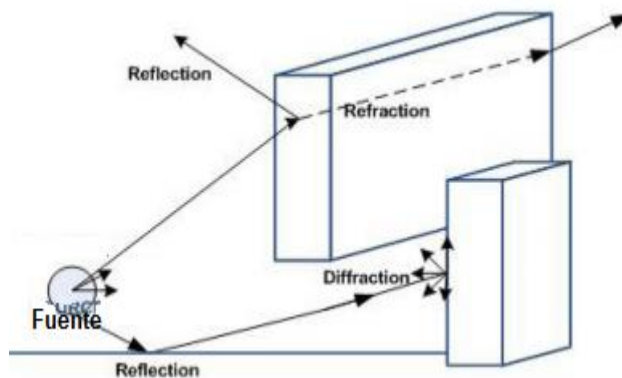


Figura 3. 14 Esquema del Modelo de 2 Rayos  
Fuente: (Led, Azpilicueta, & Aguirre, 2013)

Los rayos se lanzan desde el transmisor con un ángulo de elevación  $\theta$  y con un ángulo azimutal  $\Phi$ , tal como se define en el sistema de coordenadas usual. Los patrones de antena se incorporan para incluir los efectos del ancho de haz de la antena tanto en azimut como en elevación. Las propiedades del material para todos los elementos dentro del escenario también están teniendo en cuenta, dada la constante dieléctrica y la permitividad en la gama de frecuencia del funcionamiento del sistema bajo análisis.

El nivel de señal de un punto determinado se obtiene mediante la suma de las componentes de todos los caminos posibles existentes entre transmisor y receptor. Este modelo también puede predecir de manera fiable la dispersión en el tiempo de la señal.

Actualmente, los modelos de trazado de rayos están considerados entre los más precisos de los modelos de predicción de potencia de campo; esta precisión requiere de una representación muy detallada del área a analizar. Sin embargo, el tiempo de computación depende en modo exponencial de estos detalles.

### **3.5 Factores que afectan el rendimiento de redes inalámbricas**

En la revisión de la literatura científica, los factores que afectan las comunicaciones inalámbricas más comunes son:

#### **Obstrucciones Físicas**

Las señales inalámbricas pueden tener problemas para penetrar objetos sólidos que pueden ser cualquier número de cosas tales como colinas, edificios, paredes individuales o incluso personas. Cuantas más obstrucciones tenga entre el transmisor y el receptor, más posibilidades hay de que la intensidad de la señal se vea afectada, por lo que debe tratar de mantener la línea más clara posible del sitio. Esto obviamente no es práctico en el mundo real ya que hay casi siempre algo en el camino, pero se puede minimizar el efecto que tendrá utilizando frecuencias específicas disponibles para usted. Por regla general, cuanto menor sea la frecuencia, mejores características de penetración tendrán las ondas. Sin embargo, también se ejecuta que cuanto mayor sea la frecuencia, mejores serán las capacidades de reflexión de la onda, por lo que, en algunos casos, reflejar una señal al receptor puede funcionar mejor que tratar de enviarlo a través de objetos, es decir, paredes.

#### **Intervalo de red y distancia entre dispositivos**

Cuanto más separados estén los dispositivos en red que están intentando comunicarse entre sí, más disminuye la intensidad de la señal. Esto se debe a que las señales inalámbricas se propagan cubriendo un área más amplia a medida que avanzan y debido a esto, a medida que la señal se extiende más, más débil se vuelve. La intensidad de la señal disminuye, aproximadamente, en una relación cúbica inversa con respecto a la distancia entre los dos dispositivos.

## **Interferencia de red inalámbrica**

Las redes inalámbricas son cada vez más comunes y por lo tanto más transmisiones inalámbricas se envían a través del aire. Las señales que operan a frecuencias similares pueden causar interferencias entre sí y tener un efecto significativamente negativo en el rendimiento de la red. Esto significa que las bandas de frecuencia más utilizadas, como la banda sin licencia de 2,4 GHz, pueden verse gravemente afectadas por el hacinamiento de las señales inalámbricas hasta un punto en el que un dispositivo no funcionará a un nivel aceptable. Otras tecnologías inalámbricas pueden causar interferencias idénticas, como teléfonos móviles y hornos de microondas que operan dentro de los mismos rangos.

## **Compartición de señales**

Las redes inalámbricas permiten que más de una persona se comuniquen con otra fuente de red en cualquier momento. Este intercambio de conexión significa que cuanto más abonados utilizan la red, más dispositivos el punto de acceso tiene que tratar de comunicarse instantáneamente. El punto de acceso tiene que delegar sus recursos a cada abonado individualmente por la cantidad de radios emisoras en las que opera. El equipo con capacidad Full-Duplex puede transmitir y recibir datos simultáneamente mientras que el equipo Half-Duplex sólo puede enviar o recibir en cualquier momento.

## **Uso y carga de la red**

Cuando muchos clientes están utilizando el ancho de banda de la red, y hay que compartir entre ellos, a medida que los requisitos de ancho de banda aumentan en la red (el streaming de vídeo es una aplicación de uso intensivo de ancho de banda), se debería invertir en equipos que puedan atender velocidades de alto rendimiento para mantener el rendimiento y la confiabilidad de la red en un nivel alto.

## **Antenas mal instaladas**

Como las antenas funcionan al limitar la propagación de señales transmitidas a una dirección u orientación específica, deben instalarse y montarse correctamente para mejorar el rendimiento de la red. El más obvio es el tipo de antena altamente

direccionales que se debe apuntar directamente en el receptor para que la señal sea cogida pero otros tipos de antena deben ser orientados correctamente para asegurarse de que están transmitiendo la señal en el plano correcto. Las antenas de sector suelen tener un plano vertical u horizontal en el que operan y las antenas omnidireccionales sólo transmitirán la señal bien en un plano, pero en todas las direcciones.

### **Características del entorno local**

Lo más prominente que afecta a las redes interiores, propiedades de construcción de la pared puede ser uno de los mayores inhibidores de las señales inalámbricas. El acoplamiento de alambre dentro de las paredes puede paralizar las transmisiones de señales y los materiales utilizados tienen diferentes niveles de efecto; El hormigón tradicional dificulta las redes internas, mientras más gruesas sean las paredes, menos calidad tendrá la señal a través de ella (alta inhibición a la señal).

### **Limitaciones del canal de espectro**

Esto por lo general sólo afecta a las redes inalámbricas que operan sólo en bandas de frecuencias populares como 2,4 GHz, pero también afectaría a la banda de 5 GHz en el futuro si las personas migran en multitud (están popularizándose). Las Redes Inalámbricas operan en sub-bandas de frecuencia conocidas como canales que tienen anchos de banda más pequeños dentro de sus frecuencias operativas totales posibles. La banda de 2,4 GHz se divide en 11 canales que operan en anchos de banda de 25MHz cada uno separados 5MHz, dentro de un rango general de 2412MHz a 2462MHz. Los canales tienen que superponerse entre sí para poder encajar dentro del rango de operación general. Esta superposición causa interferencia si los dispositivos inalámbricos están utilizando canales vecinos y por lo tanto los únicos canales recomendados para su uso son 1, 6 y 11, ya que estos no se superponen.

### **Reflexión de señal**

La reflexión de la señal, conocida técnicamente como Fading Multipath o desvanecimiento multicamino, se produce típicamente en edificios que tienen diseños complejos o materiales atípicos. Los diferentes caminos que puede coger la señal



transmitida pueden ser reflejados por estos elementos y llegar desfasados/degradados hasta el receptor.

Cuando estas señales llegan al receptor pueden llegar en fase (amplificando su valor) o bien en contrafase anulando las dos señales que han llegado en contrafase perdiendo así la señal en recepción. También hay que tener en cuenta que las señales inalámbricas pueden llegar más retrasadas en el tiempo en función del camino por el que vayan ya que las distancias hasta el emisor son diferentes en cada camino. Estos retrasos en la propagación de las señales crean lo que se conoce como ISI (interferencia entre símbolos), que lo que hace es corromper los símbolos (modulación en la que se transmite la señal) en los recorridos cortos de la señal.

Estos problemas se puede solventar utilizando antenas en diversidad, es decir usando más de una antena en el receptor, de manera que si una antena está captando señal pobre, la otra debería ser capaz de recuperarla con mejores señales, sino se puede utilizar otro tipo de modulación/tecnología como OFDM que corrige este problema utilizando subcanales dentro del mismo canal (dividiendo un canal en más pequeños para minimizar pérdidas y poder reconstruirlas) (WifiSafe, 2017).

### **Restricción de señal inalámbrica**

Por razones de seguridad es posible que se desee restringir la transmisión de señal inalámbrica sólo a las áreas que desea proporcionar acceso a la red. Esto puede ser ‘problemático’, ya que controlar la propagación de la señal no es fácil, ya que puede viajar a través de las paredes a otros edificios o fuera de las áreas donde alguien podría tratar de conectarse sin autorización. La limitación de los niveles de potencia del transmisor para cubrir sólo el área requerida es un método para resolver este problema, pero tiene el efecto de que las intensidades de la señal serán más débiles para todos los dispositivos receptores. El uso de antenas direccionales para limitar la propagación de la señal también puede ser eficaz para limitar el área en la que se cubre la señal.

#### **3.5.1 Factores menos conocidos que afectan el rendimiento de redes inalámbricas**

La literatura científica destaca los siguientes factores menos conocidos que afectan el rendimiento de las redes inalámbricas:

## **Limitaciones de potencia del transmisor**

Las regulaciones establecidas por organismos públicos de control y regulación de las telecomunicaciones en cada país dictaminaran que los dispositivos que operan en ciertos rangos de frecuencia deben adherirse a los niveles máximos de potencia de salida del transmisor. Estos valores cambian dependiendo de la frecuencia con la que operan sus dispositivos, por ejemplo, en Europa, bajo lo que dictamina la ETSI en la banda de 2,4GHz la potencia máxima son 100mW EIRP y en la banda de 5GHz desde 200mW hasta los 4W de EIRP; Así un dispositivo puede funcionar en diversos niveles de energía. usar unas potencias u otras. Esto tiene un gran efecto en los niveles de la señal y en muchos casos los operadores tienden a migrar a equipos que trabajen con mayores valores de potencia que la ley permite, consiguiendo así incrementar valores de señal a largas distancias.

Hay que tener en cuenta que los valores de la ETSI combinan la ganancia de los equipos combinada con la de la ganancia de la propia antena que se utiliza, esto en muchas ocasiones hace que para no sobrepasar los valores limitados por la ETSI se tengan que bajar los valores de potencia de salida de los equipos de un proveedor.

## **Compatibilidad hacia atrás con los estándares antiguos**

En la actualidad, esto sólo tiene un efecto importante en las redes que funcionan con los estándares 802.11. Si tiene una mezcla de dispositivos que son 802.11n y algunos que son sólo 802.11b o g, la nueva tecnología tiene que limitarse a las velocidades de rendimiento máximas de los antiguos dispositivos b y g. Se recomienda que, si desea experimentar todo el potencial de los nuevos estándares de tecnología, reemplaza todos los dispositivos antiguos existentes que podrían restringir el rendimiento de su red. (WifiSafe, 2017).

Por ejemplo:

- Velocidad máxima en la red de 2.4GHz con el dispositivo 802.11b: es de 11Mbps.
- Velocidad máxima en la red 2.4GHz con el dispositivo 802.11g presente y ningunos dispositivos 802.11b: es de 54Mbps

- Velocidad máxima por flujo en redes de 2,4 GHz con dispositivos 802.11n: es de 150Mbps

### **Polarización de la señal**

Las antenas polarizan sus señales transmitidas y por lo tanto los dispositivos receptores deben estar orientados para recibir la señal en el mismo plano para el rendimiento óptimo. Esto es esencial en la instalación de enlaces de puente Ethernet punto a punto de alto rendimiento, de misión crítica.

### **Pérdida de velocidad debida a cabeceras en paquetes**

Debido a la encriptación, la traslación de paquetes y la utilización parcial del ancho de banda del canal para los datos de usuario, las velocidades de rendimiento anunciadas no son velocidades reales, estas velocidades no las conseguirá nunca el usuario final. Con todas las cabeceras del protocolo de red Wireless por regla general la velocidad máxima que se obtendrá será como mucho la mitad de la teórica, y cuantas más informaciones adicionales añadamos a los paquetes menos será esta velocidad real. En otras palabras, los *overheads* del protocolo de red inalámbrica típicamente dan lugar a rendimientos máximos de la mitad de las velocidades teóricas máximas anunciadas y esto puede entonces ser reducido aún más por otros factores relacionados con la composición de los paquetes de datos. (WifiSafe, 2017).

### **Reducción del rendimiento para estar conectado**

Algunos dispositivos de Red Inalámbrica pueden reducir las velocidades de funcionamiento a los dispositivos para permanecer conectados en áreas de baja señal debido a la mayor distancia entre dispositivos o interferencias, etc. Esto afecta a la red y a otros dispositivos que se encuentren conectados al mismo punto de acceso debido a esta bajada de velocidades con los dispositivos con bajo nivel de señal. La retransmisión de datos debidos a paquetes perdidos también limita la capacidad de los puntos de acceso con el resto de clientes. (WifiSafe, 2017).

### 3.6 Cálculo de pérdidas de trayectoria

El cálculo de la pérdida de trayectoria se suele denominar predicción, la predicción exacta es posible sólo para casos más simples, como la propagación del espacio libre antes mencionada o el modelo de tierra plana. Para casos prácticos la pérdida de trayectoria se calcula usando una variedad de aproximaciones. Así los métodos estadísticos (también llamados estocásticos o empíricos) se basan en pérdidas medias y promediadas a lo largo de clases típicas de enlaces radioeléctricos.

La pérdida de trayectoria debido a la pérdida de espacio libre probablemente será el factor más importante al planear al aire libre, el enlace de largo alcance con la fuerza de la señal se reduce en 4 veces si la distancia entre dispositivos se duplica. La pérdida de espacio libre no incluye factores tales como la ganancia de las antenas utilizadas en el transmisor y el receptor, ni ninguna pérdida asociada con imperfecciones de hardware; Se basa únicamente en el camino de LOS (línea de visión) a través del aire del espacio libre.

**La Pérdida de Espacio Libre** se puede calcular usando las siguientes ecuaciones:

$$FSL = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

Dónde,

$FSL$  = Pérdida de espacio libre

$\lambda$  = Longitud de onda de la señal (m)

$d$  = Distancia entre el transmisor y el receptor (m)

A través de alguna derivación adicional, se puede usar la siguiente ecuación más práctica para mostrar la Pérdida de Espacio Libre en dB (decibelios):

$$FSL(dB) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 92.45$$

Dónde,

$FSL(dB)$  = Pérdida de espacio libre (dB)

$d$  = Distancia entre el transmisor y el receptor (km)

$f$  = Frecuencia de señal (GHz)

#### Ejemplo 1:

Si se calcula la pérdida de espacio libre de una señal de 2,4 GHz, en el canal 6 (2,437 GHz) a una distancia de 250 m:

$$FSL(dB) = 20 \log_{10}(0.250) + 20 \log_{10}(2.437) + 92.45 = 88.1dB$$

## Ejemplo 2

Si se calcula la Pérdida de espacio libre de una señal de 70 GHz (72.000 MHz) a una distancia de 250 m:

$$FSL(dB) = 20 \log_{10}(0.250) + 20 \log_{10}(72) + 92.45 = 117.5dB$$

Se aprecia en los dos ejemplos anteriores, a medida que aumenta la frecuencia, la pérdida de espacio libre (reducción de la potencia de la señal) aumenta con respecto a la distancia.

## Presupuesto de enlace/link

Para las conexiones de redes inalámbricas se puede calcular un presupuesto de enlace que tenga en cuenta todas las ganancias y pérdidas en todo el enlace, desde el transmisor, al aire y luego al receptor. Se ve en la propagación de la señal, las ganancias de antena y otras pérdidas de factores tales como los efectos del terreno y la humedad, etc.

Una versión muy simplificada de la ecuación Link Budget se puede escribir de la siguiente manera:

$$Received Power (dBm) = Transmitted Power (dBm) + Gains (db) - Losses (dB)$$

Estas áreas simples se pueden dividir más en variables de efecto más pequeñas dando una ecuación más práctica:

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - L_{FS} - L_M + G_{RX} - L_{RX}$$

Dónde,

$P_{RX}$  = potencia recibida (dBm)

$P_{TX}$  = Salida de potencia del transmisor (dBm)

$G_{TX}$  = ganancia de la antena del transmisor (dBi)

$L_{TX}$  = Pérdidas del transmisor (cable, conectores, etc.) (dB)

$L_{FS}$  = Pérdida de espacio libre (dB) ... esto está cubierto en el capítulo anterior.

$L_M$  = Misc. Pérdidas (margen de desvanecimiento, desalineación de la polarización, etc.) (dB)

$G_{RX}$  = ganancia de la antena del receptor (dBi)

$L_{RX}$  = Pérdidas del receptor (cable, conectores, etc.) (dB)

En entornos de oficina, se dice que la propagación LoS sólo representa los primeros 3m, más allá de que las pérdidas en interiores pueden aumentar hasta 30dB por 30m.

### **Ejemplo 3**

Si calcula el Presupuesto de Enlace de dos transceptores idénticos que operan en una señal de 5 GHz (5765MHz) a una distancia de 500m con potencias de salida de transmisor de 21dBm, ganancias de antena de 14.6dBi, pérdidas de dispositivos (cable, conectores, etc.) de 1.2dB De 0dB y una pérdida de trayectoria de 101,5dB:

$$P_{RX} = 21 + 14.6 - 1.2 - 101.5 - 0 + 14.6 - 1.2 = -53.7dBm$$

A partir de este su receptor tendría que tener una sensibilidad de recepción de -53.7dBm o menor (mayor valor negativo) para su enlace para operar en absoluto.

### **Margen de funcionamiento del sistema**

Denominado en inglés como SOM (System Operating Margin) es una forma de calcular la diferencia entre la intensidad de la señal de la radio del receptor está recibiendo realmente en contraposición a lo que realmente necesita para una buena recuperación de datos. Esto se calcula restando el valor de sensibilidad del receptor (dB) de la figura del presupuesto de enlace que se explicó en el capítulo anterior.

$$SOM = P_{RX} - S_{RX}$$

Dónde,

SOM = Margen de funcionamiento del sistema (dBm)

$P_{RX}$  = potencia recibida (dBm)

$S_{RX}$  = Sensibilidad del receptor (dBm)

Para un funcionamiento óptimo, un margen de funcionamiento del sistema de 20dBm o más sería ideal sin embargo estos valores no siempre son alcanzables, pero

un valor inferior a 10dBm normalmente se considera inaceptable. A continuación, se muestra una tabla que muestra la relación entre SOM y Disponibilidad. 20dBm representa un tiempo de inactividad de alrededor de 70 horas al año.

Tabla 3. 2 Disponibilidad y tiempo inactivo según valor de SOM

SOM (dBm)	Disponibilidad%	Tiempo de inactividad (por año)
8	90	876 horas
18	99	88 horas
28	99,9	8,8 horas
38	99,99	53 minutos
48	99.999	5,3 minutos
58	99.9999	32 segundos

Fuente: (Catalogue Solutions , 2015)

### Continuación del ejemplo 3:

Si se calcula que el presupuesto de enlace tenía una potencia recibida de -53,7 dBm y el receptor tenía una sensibilidad del receptor de -75dBm:

$$SOM = -53.7 - (-75) = 21.3dBm$$

Como se puede ver, el sistema tiene un margen de operación de 21.3dBm que se relaciona con alrededor del 99.4% de disponibilidad o 2 días 4 horas 42 minutos y 15 segundos de tiempo de inactividad por año.

### Rangos máximos permitidos

Si especifica la disponibilidad deseada para su red inalámbrica y el equipo que desea utilizar, se puede calcular la distancia máxima entre dispositivos mediante ingeniería inversa de las ecuaciones descritas anteriormente.

### Ejemplo 4

Requisitos de puente inalámbrico punto a punto:

- 99,9% de disponibilidad por año (28dBm)
- 2 transceptores idénticos que funcionan a 5GHz Canal 36 (5180MHz)

- Potencias de salida reducidas a 9dBm para antenas de alta ganancia
- Sensibilidad del receptor de -67dBm
- Pérdidas en cada sistema Transceptor de 1,2dB
- 2 pies Antena Plato 28dBi Ganancia

$$SOM = P_{RX} - S_{RX}$$

$$28 = P_{RX} - (-67) \quad \therefore P_{RX} = -39dBm$$

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - L_{FS} - L_M + G_{RX} - L_{RX}$$

$$-39 = 9 + 28 - 1.2 - L_{FS} - 0 + 28 - 1.2 \quad \therefore L_{FS} = 101.6_{DB}$$

$$FSL(dB) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 92.45$$

$$101.6 = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(5.18) + 92.45 \quad \therefore 20 \log_{10}(d) = -5.1$$

$$\therefore d = 0.56km$$



## CAPITULO IV: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS DE DATOS EN RED ZIGBEE EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Se analiza un caso de estudio en vegetación densa y donde se evalúa la propagación de señales por parte de los nodos sensores. La aplicación fue desarrollada por a través de los datos obtenidos, se deberá simular el resultado en un programa como NS-3 el desempeño de la perdida de trayectoria y aspectos similares en tráfico de datos cuando se utiliza una red Zigbee.

### 4.1 Modelos de follaje

Los componentes de propagación de la señal en el follaje intermedio inciden en un exceso adicional de pérdida, como el causado por ondas directas y reflejadas. Actualmente investigadores están estableciendo métodos para incluir estos factores mediante la introducción de modelos de follaje empíricos para evitar el exceso de pérdida de varias geometrías y frecuencias. Los modelos empíricos para WSN bien conocidos se enumeran a continuación.

#### Modelo de decaimiento exponencial

El modelo de decaimiento exponencial modificado de Weissberger es aplicable cuando una trayectoria de rayos está bloqueada por árboles densos en hoja y secos, que se encuentran en climas templados. Es aplicable en situaciones donde la propagación es probable que ocurra a través de una arboleda en lugar de la difracción sobre capas de ramas de árboles. Se da por la ecuación 4.1

$$PL_w (dB) = \begin{cases} 1.33 \times f^{0.284} \times d^{0.588} & 14 \text{ m} < d \leq 400 \text{ m} \\ 0.45 \times f^{0.284} \times d & 0 \text{ m} < d \leq 14 \text{ m} \end{cases} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde  $d$  es la profundidad del follaje en metros y  $f$  es la frecuencia en GHz. El rango de frecuencia sobre el cual este modelo es válido entre 230 MHz y 95 GHz.

#### Recomendación de la UIT (UIT-R)

El modelo UIT-R se desarrolló a partir de mediciones realizadas principalmente a ultra alta frecuencia (UHF) y se propone para casos en los que el transmisor o la antena receptora está cerca de un pequeño arbolado de modo que la mayor parte de la

señal se propaga a través de la Árboles. Este modelo se utiliza comúnmente para frecuencias entre 200 MHz y 95 GHz y está representado en la Ec. (4.2), donde d es la profundidad del follaje en metros:

$$PL_{UIT-R} (dB) = 0.2 f^{0.3} x d^{0.6} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

### El modelo COST 235

El modelo COST 235 se propuso a partir de mediciones realizadas en frecuencias de ondas milimétricas (9,6-57,6 GHz) a través de un pequeño arbolado. Se presenta en la Ec. (4.3):

$$PL_{COST\ 235} (dB) = \left\{ \begin{array}{ll} 26.6 x d^{0.5} & \text{Fuera de la hoja} \\ 15.6 x f^{-0.009} x d^{0.26} & \text{En la hoja} \end{array} \right\} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Utilizando el modelo COST 235, se realizaron mediciones en árboles en hojas y fuera de hoja en dos estaciones. El modelo COST 235 es válido para el rango de frecuencias de 200 MHz a 95 GHz. La frecuencia en los modelos COST 235 y UIT-R se muestra en MHz, mientras que la profundidad de los árboles se muestra en metros.

En general, el exceso de pérdida inducida por el follaje puede simbolizarse mediante la siguiente expresión 4.4

$$PL_{veg} = A x f^B x d^C \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Los tres parámetros de (4.4), A, B y C, pueden ser calculados empíricamente.

El valor A se determina en función del tipo de follaje, y los valores B y C representan las dependencias de frecuencia y distancia, respectivamente. Adoptó el método de error de mínimos cuadrados para optimizar la estimación de valor de los parámetros numéricos utilizando numerosos conjuntos de medidas de medida. Los conjuntos de datos recolectados utilizaron frecuencias de 11,2 GHz y 20 GHz durante dos estados de foliación, en hoja y fuera de hoja.

Así, derivaron el modelo UIT-R (FITU-R) ajustado presentado en la Ec. (4.5):

$$PL_{FITU-R}(dB) = \left\{ \begin{array}{ll} 37 \times 10^{-2} x f^{0.18} x d^{0.59} & \text{Fuera de la hoja} \\ 39 \times 10^{-2} x f^{0.39} x d^{0.25} & \text{En la hoja} \end{array} \right\} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

### **Pérdida de trayectoria total (PLtot)**

Cuando una señal inalámbrica llega al receptor (Rx), ya ha sufrido una atenuación a lo largo de la trayectoria de propagación. Esta atenuación influye en la potencia recibida (Pr), que puede expresarse en función de la potencia transmitida (Pt), de las ganancias de la antena del transmisor y del receptor (Gt, Gr) y de la pérdida de trayectoria total (PLtot), como en la Ec. (4.6):

$$PL_{tot} = (P_t + G_t + G_r) - P_r \quad \text{Ecuación 4.6}$$

La pérdida total de la trayectoria se puede dividir en la pérdida de trayectoria causada por la propagación de la onda, la pérdida de la trayectoria causada por el espacio libre y la pérdida de la trayectoria causada por los obstáculos existentes dentro de la trayectoria de la difusión, como en la ecuación 4.7

$$PL_{tot} = PL_{Espacio Libre} + PL_{Veg} \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Donde PLtot es la pérdida de trayectoria total, Plespacio libre es la pérdida de trayectoria en el espacio libre y PLveg es la pérdida de trayectoria causada por obstáculos.

### **Medición en campo**

Todos los modelos de propagación fueron creados en MATLAB. Estos modelos se aplicaron a un invernadero de mango.

#### **Sitio experimental**

Las medidas recogidas se tomaron en un invernadero, las dimensiones del invernadero son 50 m x 10 m x 5 m. El invernadero se compone de tres carriles con 13 árboles de mango en cada fila. Los árboles tenían 5 años. Las características

geométricas de los árboles fueron las siguientes: una altura media máxima de 2 m ( $\sigma = 0,21$ ); Una altura del tronco principal de 1 m ( $\sigma = 0,12$ ) y un diámetro medio del tronco de 0,16 m ( $\sigma = 0,005$ ). La distancia de separación entre cada árbol en la misma fila era de aproximadamente 3,2 m, y la distancia de separación entre cada fila era de 2,2 m.



Figura 4. 1 Invernadero para arboles de mango  
Fuente: (Raheemah, Sabri, Salim, & Ehkan, 2016)

Por ejemplo, la WSN puede también supervisar temperatura del aire, la temperatura del agua, velocidad del viento, cantidad de niveles de luz solar y de pH, estas y otras variables son esenciales de monitorear en la agricultura de precisión.

Los sensores se utilizan para controlar parámetros como:

- Temperatura
- Humedad
- Presión Barométrica
- Dióxido de Carbono (CO) Gases
- Humedad del Suelo
- La acidez del suelo/pH

El software de modelado incorpora los datos de los sensores en un circuito de retroalimentación que activa la red de control. Esto proporciona las cantidades óptimas de insumos agrícolas a los lugares individuales y tiempos diferentes.

La red de Control es responsable de:

- Presión del Agua
- Válvula/Riego Operación
- Control de Animales (por ejemplo, las puertas se abren y cierran)
- Fertilizantes Dispersión
- La dispersión de pesticidas
- Calefacción/Refrigeración
- La luz del sol/sombreado (típicamente en un invernadero o área de cultivo adjunto)

Como la tendencia de costos para sensores e infraestructura de comunicaciones es a la baja, más productores están implementando redes de sensores inalámbricos para sus cultivos. Esto es cada vez más frecuente con las granjas más pequeñas, micro-granjas y fincas urbanas. En cada una de estas situaciones, los rendimientos de los cultivos son fundamentales ya que los productores sólo podrán tener un área muy pequeña. En algunos casos, las zonas agrícolas se están construyendo en paredes verticales que de 1 a 2 metros de altura que se colocan en altos tejados, o junto a una vivienda residencial. (Electrocom, 2013).

La tecnología WSN permite supervisar y orientar específicamente cada cultivo, por lo que es práctico y efectivo implementar Agricultura de Precisión, independientemente de la zona de cultivo. Este enfoque también es fácilmente escalable mediante la adición de hubs y sensores de comunicación adicionales.

#### **4.2 Configuración de la medición**

Las mediciones se realizaron utilizando nodos inalámbricos desarrollados por la compañía NXP. Este módulo de RF adopta la pila de protocolos Zigbee basada en el estándar IEEE 802.15.4.

La configuración de los módulos WSN se muestra en la Tabla 4.1. Los nodos utilizados en este trabajo constaban de dos módulos de nodos inalámbricos, uno que actuaba como coordenadas (el nodo receptor) y el otro como el dispositivo final (el nodo transmisor).

Tabla 4. 1 Configuración de los nodos inalámbricos JN5148.

Número de canal	15
Potencia de transmisión	0 dBm
Funcionamiento de frecuencia	2.245 GHz
Nivel de potencia	24
Modo de potencia	0 dB
Reintentar la cantidad	3
Velocidad de datos	250 bps
Sensibilidad del receptor:	95 dBm
Tipo de antena	Omni direccional

Fuente: el autor

En la figura 4.2, se muestra distancias entre arboles, así como niveles de altitud de un árbol promedio.

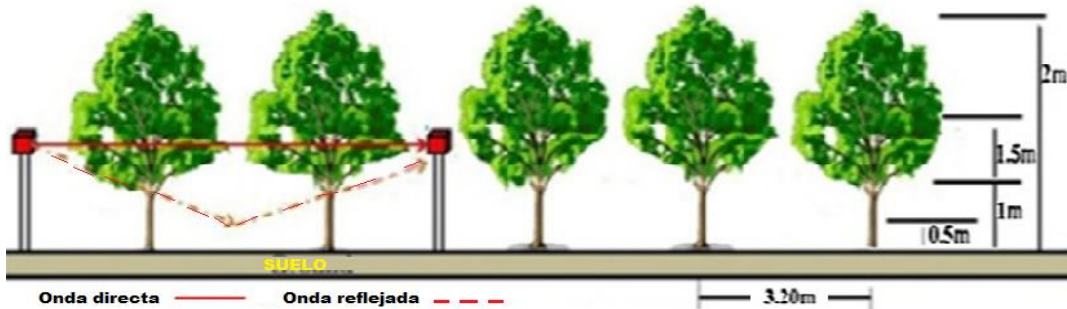


Figura 4. 2 Geometría media del árbol.

Fuente: (Raheemah, Sabri, Salim, & Ehkan, 2016)

#### 4.2.1 Resultados

La geometría media de los árboles en el invernadero de mango se muestra en la figura 4.3. Se recolectaron medidas para aproximar la energía reducida de propagación de RF dentro de una hilera de árboles en el invernadero de mango. Los nodos transmisores (Tx) se situaron frente al primer árbol en cada fila en siete elevaciones diferentes (0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2 m, 2,5 m, 3 m y 3,5 m). Los nodos receptores (Rx) se colocaron en cada árbol individual a la misma altura (Tx = Rx).

Para predecir la energía recibida, 500 paquetes se transmitieron a una velocidad de datos RF de 250 Kbps. El nodo receptor estaba conectado a una computadora portátil, donde todas las lecturas RSSI se registraron directamente en un indicador de calidad de enlace (LQI). Este proceso se representa en la figura 4.3.

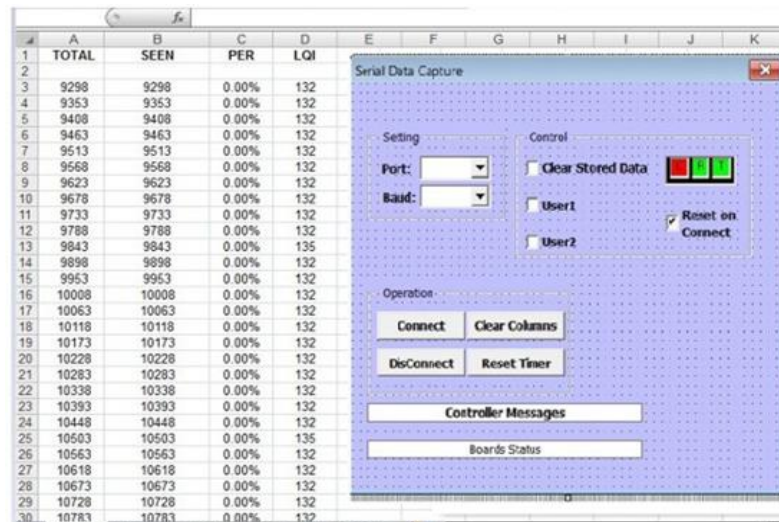


Figura 4. 3 Datos en serie de los nodos de la red inalámbrica  
Fuente: (Raheemah, Sabri, Salim, & Ehkan, 2016)

La ecuación 4.8 se utilizó para calcular los valores de la RSS en dB basado en la medición LQI. A continuación, se utilizó el valor medio de la medición RSS para calcular la pérdida de trayectoria total, que se consideró independiente, es decir, existente fuera de los parámetros del sistema transmisor y receptor.

Es una cantidad positiva que representa la atenuación de señal, y se utiliza para medir la degradación en la intensidad de la señal en función de la distancia. En aras de la simplicidad, el enfoque de la discusión para el resto de este documento se sitúa en la pérdida de trayectoria en lugar de en el RSS. El modelo está representado en la Ec 4.8.

$$RSS (dB) = \left( \frac{LQI}{2.5} - R_{sen} - 30 \right) \quad \text{Ecuación 4.8}$$

Donde Rsen es la sensibilidad del receptor y es igual a (-95 dBm) en el experimento. Generalmente, la relación entre la pérdida de trayectoria, la potencia transmitida y la potencia recibida puede expresarse mediante la Ec. 4.7. El valor de pérdida de trayectoria total (PLtot) en cada punto medido viene dado por la Ec. 4.9, ya que la potencia transmitida (Pt) es 0 dB:

$$PL_{tot} (dB) = -RSS (dB) \quad \text{Ecuación 4.9}$$

#### 4.2.2 Comparación de mediciones reales y la pérdida de trayectoria

En la Fig. 4.4 representa las mediciones reales de RF en el invernadero de mango en siete elevaciones diferentes del transceptor (0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2 m, 2,5 m, 3 m y 3,5 m). El receptor (Rx) se localizó en cada árbol individual a la misma altura (Tx = Rx).

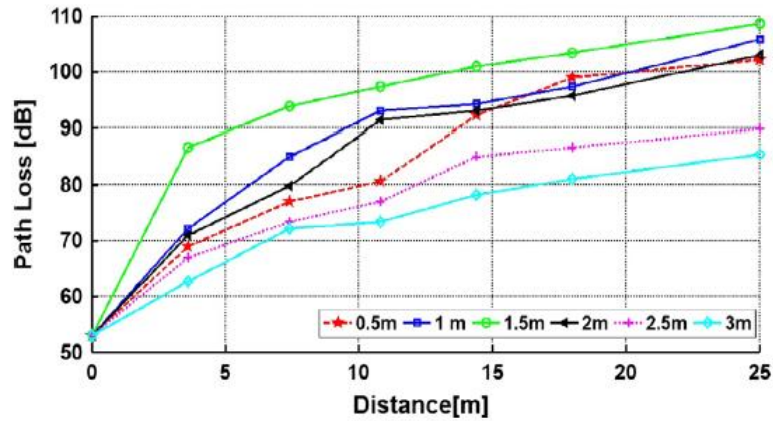


Figura 4. 4 Mediciones empíricas de pérdida de trayectoria.

Fuente: el autor

Como se muestra en la Fig. 4.4, los efectos de vegetación más grandes aparecen dentro de 1,5 m de profundidad de vegetación, donde la pérdida de trayectoria es 86,6 dB a una distancia de 3,6 m y muestra un valor creciente hasta 108,6 dB a una distancia de 21,5 m. Esta altura fue adoptada en esta investigación para estudiar y analizar los modelos de vegetación en el invernadero de mango utilizando WSNs.

La Tabla 4.2 representa la pérdida de trayectoria predicha por los modelos de propagación a gran escala (FSPL y 2-Ray) a una altura de 1,5 m para las antenas transmisoras y receptoras (Tx = Rx = 1,5 m).

Tabla 4. 2 Path loss por FSPL y modelos de 2-Ray en dB.

Modelo	Distancia (m)					
	3.6	7.4	10.8	14.4	18	21.5
Pérdida de trayectoria a gran escala	3.6	7.4	10.8	14.4	18	21.5
FSPL	51.27	57.53	60.81	63.31	65.25	66.79
2 Rayos	15.21	27.73	34.29	39.29	43.17	46.25

Fuente: el autor

En la figura 4.5 se muestra resultados de pérdida de trayectoria por modelos de propagación a gran escala y mediciones empíricas.



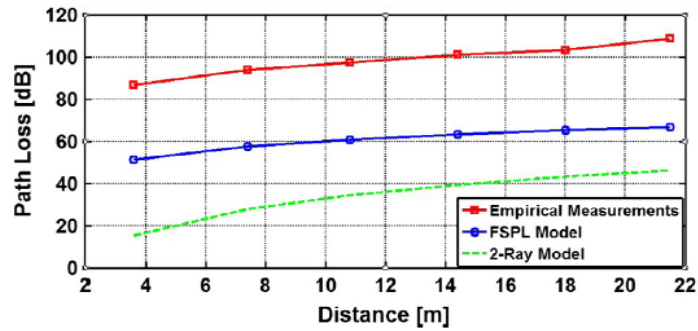


Figura 4. 5 Pérdidas de trayectoria de 3 modelos de trayectoria  
Fuente: el autor

Como se muestra en la figura 4.5, existen grandes diferencias entre la pérdida de trayectoria predicha por los modelos de propagación a gran escala (FSPL y 2-Ray) y las mediciones empíricas.

Las diferencias en la predicción de pérdidas de trayecto se pueden calcular utilizando el porcentaje de error absoluto y el porcentaje de error absoluto medio. El primero representa la diferencia entre los valores aproximados y reales como un porcentaje del valor real. Está dado por la ecuación.

$$\% \text{ ErrorAbsoluto} = \left( \frac{X_{i \text{ modelo}} - X_{i \text{ actual}}}{X_{i \text{ actual}}} \right) \times 100 \% \quad \text{Ecuación 4.10}$$

Donde  $X_i$ , modelo es el valor de pérdida de trayectoria predicho por los modelos y  $X_i$ , real es el valor de pérdida de trayectoria real obtenido por mediciones empíricas.

El porcentaje de error absoluto medio mide la precisión de predicción de un método de expectativa en las estadísticas y se considera un buen método para medir la exactitud de los modelos de propagación. La Tabla 4. 3 representa el porcentaje de error absoluto de la pérdida de trayectoria por modelos de propagación a gran escala (FSPL y 2-Rayos) y el de las mediciones empíricas.

La comparación anterior entre los modelos de propagación a gran escala ampliamente utilizados (FSPL y 2-Rayos) y las mediciones empíricas produce % de Error absoluto medio grandes (38,20% y 65,74%). El % de Error absoluto medio mayor entre FSPL, modelos de 2-Rayos y las mediciones empíricas indican su inadecuación como una herramienta de predicción de pérdida de trayectoria interior.

Tabla 4. 3 % Error absoluto y % Error absoluto medio de modelos de propagación a gran escala y mediciones empíricas (%).

Modelo	Distancia (m)					
	3.6	7.4	10.8	14.4	18	21.5
FSPL	40.80	38.67	37.57	37.32	36.90	38.50
2 Rayos	82.44	70.44	64.79	61.10	58.25	57.41

Fuente: el autor

El ambiente de invernadero, ya que ambos modelos se basan en enfoques simplistas. El entorno del invernadero se compone de varios factores, como la reflexión, la difracción y la dispersión, que no se consideran precisamente por estos modelos. Además, el modelo de 2 Rayos considera sólo rayos principales y reflejados, mientras que el ambiente de invernadero involucra rayos de trayectos múltiples.

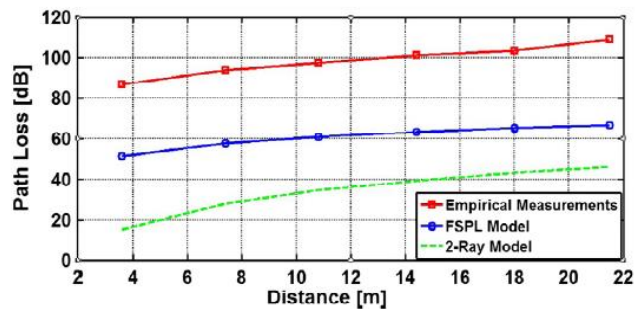


Figura 4. 6 Pérdida de trayectoria de propagación a gran escala

Fuente: el autor

#### 4.2.3 Comparación de medición real combinados con modelos de vegetación

Las tablas 4.4 y 4.5 muestran el cálculo de  $PL_{tot}$  basado en la ecuación 4.7, que representa la pérdida de trayectoria total calculada combinando la pérdida de trayectoria predicha por los modelos FSPL y 2 Rayos con modelos de follaje. Los transceptores tienen 1,5 m de alto, y con diferentes distancias de separación entre Tx y Rx.

Tabla 4. 4 Pérdida de la trayectoria total por ( $PL_{FSPL} + PL_{Veg}$ ) (dB).

Modelo	Distancia (m)					
	3.6	7.4	10.8	14.4	18	21.5
WES+FSPL	53.35	61.81	67.06	71.52	74.61	77.18
ITU-R+FSPL	55.74	64.42	69.45	73.58	76.99	79.85
FITU-R+FSPL	62.50	70.97	75.59	79.19	82.03	84.34
COST 235+FSPL	71.56	82.00	87.81	92.41	96.08	99.09

Fuente: el autor

Tabla 4. 5 Pérdida de trayectoria total por ( $PL_{2\text{-Rayos}} + PL_{\text{veg}}$ ) (dB).

Modelo	Distancia (m)					
	3.6	7.4	10.8	14.4	18	21.5
WES+2 Rayos	17.29	32.01	40.54	47.50	52.53	56.64
ITU-R+2 Rayos	19.68	34.61	42.93	49.56	54.91	59.31
FITU-R+2 Rayos	26.43	41.17	49.07	55.17	59.95	63.80
COST 235+2 Rayos	35.50	52.20	61.29	68.39	74.00	78.55

Fuente: el autor

La comparación de la pérdida de trayectoria total obtenida en las Tablas 4.4 y 4.5 con la pérdida de trayectoria total empírica en la Fig. 4.4 muestra que el modelo COST 235 tuvo el resultado más próximo a la prueba empírica, como se muestra en la figura 4.7 y 4.8

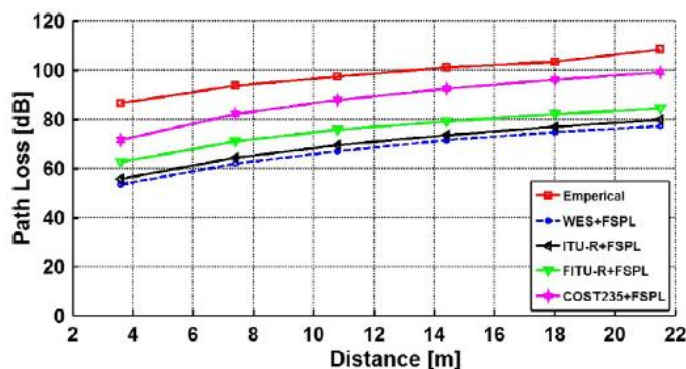


Figura 4. 7 Pérdida de trayectoria por la combinación de modelos de vegetación con modelo FSPL.

Fuente: el autor

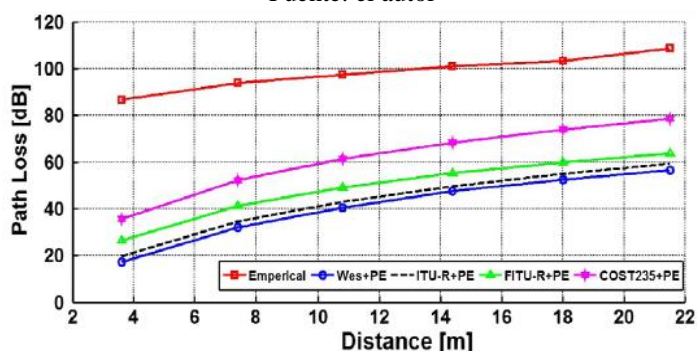


Figura 4. 8 Pérdida de trayectoria por combinación de modelos de vegetación con modelo 2-Rayos

Fuente: el autor

Como se muestra en las Figs. 4.7 y 4. 8, existen grandes diferencias entre la pérdida de trayectoria predicha por los modelos de propagación a gran escala combinados con los modelos de vegetación y los resultados empíricos.

El % de Error absoluto y % Error absoluto medio para ambos se muestran en la Tabla 4. 6.

Tabla 4. 6 % Error absoluto y % Error absoluto medio

Modelo	Distancia (m)					
	3.6	7.4	10.8	14.4	18	21.5
FSPL + COST 235	17.37	12.58	9.84	8.51	7.08	8.76
2 Rayos+ COST 235	59.01	44-35	37.07	32.29	28.43	27.67

Fuente: el autor

La comparación anterior entre los resultados de (FSPL + COST 235) y (2-Ray + COST 235) y las mediciones empíricas produce % de error absoluto medios grandes (10,69% y 38,14%, respectivamente). (FSPL + COST 235) tiene mejores resultados que (2-Rayos + COST 235), pero todavía no es adecuado como herramienta de predicción de pérdida de trayecto dentro del ambiente de invernadero.

#### 4.2.4 Optimización de nuevos modelos

Si bien la combinación del modelo COST 235 con el modelo FSPL da una buena predicción de la pérdida de vegetación en el ambiente de invernadero, todavía existe un error significativo entre la pérdida de trayectoria medida y prevista, como se muestra en la figura 4.7. Con el fin de mejorar la pérdida de trayecto Predicción dentro del invernadero de mango, se deriva y se evalúa un nuevo modelo. La Fig. 4.9 representa la pérdida de trayectoria total real y la línea de regresión lineal de las mediciones.

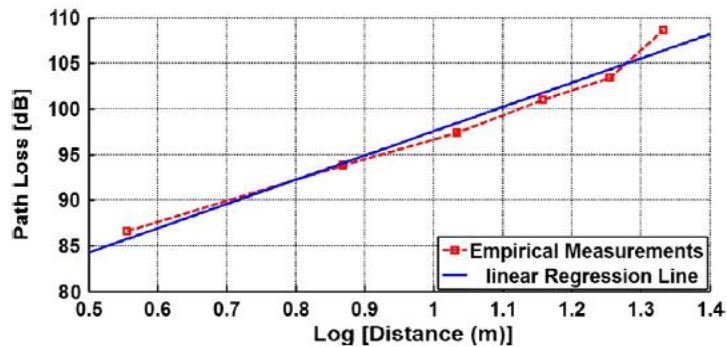


Figura 4. 9 pérdida de trayectoria total real y la línea de regresión lineal de las mediciones.

Fuente: el autor

La relación de la pérdida de trayecto con la medida de distancia logarítmica se modela utilizando métodos de regresión lineal. La regresión lineal intenta modelar los efectos mutuos de dos variables ajustando una ecuación lineal a los datos empíricos o observados. Funciona encontrando la línea recta de ajuste óptimo sobre el mensurando. Por lo tanto, se usa una ecuación lineal simple en forma de  $(Y = a + bX)$ , donde X es la variable descriptiva e Y depende de la variable. La pendiente de la línea está definida por  $b$ , y  $a$  es la intersección, es decir, el valor de  $y$  cuando  $x = 0$ .

Se pueden usar varios paquetes de software para encontrar ecuaciones de regresión lineal basadas en datos observados. En esta investigación, los autores utilizaron MATLAB y Microsoft Excel, que tiene una función integrada para encontrar la regresión lineal. Ambos programas de software dieron la misma ecuación de regresión lineal. Eq. (4.11) representa la ecuación de regresión lineal para las mediciones empíricas:

$$y = 27x + 71 \quad \text{Ecuación 4.11}$$

Para modelar la pérdida de trayectoria para la propagación de RF en el invernadero de mango, el modelo de distancia log-normal se correlacionó con la Ec. (4.11), lo que da como resultado la ecuación de pérdida de trayectoria y los parámetros en la ecuación (4.12):

$$PL_{LRCFM} = 71 + 27 \log(d) \quad \text{Ecuación 4.12}$$

Verificación del rendimiento del nuevo modelo propuesto

La Tabla 4.7 representa las mediciones reales y el PL<sub>Tot</sub> obtenido del nuevo modelo de ajuste de curva de regresión lineal (LRCFM).

La Tabla 4.8 muestra el % de Error absoluto y % de Error absoluto medio entre el PL<sub>Tot</sub> obtenido por las mediciones reales y el PL<sub>Tot</sub> predicho por el nuevo modelo propuesto en la Ec. (4.12). Una comparación entre los dos valores de PL<sub>Tot</sub> da como resultado una MAPE pequeña de 2,75%.

Así, el % de Error absoluto medio indica que el nuevo modelo propuesto es una herramienta de predicción de pérdida de trayectoria adecuada en el ambiente de invernadero de mango.

Tabla 4. 7 PL<sub>Tot</sub> por mediciones empíricas y el modelo PL<sub>LRCFM</sub> (dB).

Modelo	Distancia (m)					
	3.6	7.4	10.8	14.4	18	21.5
PL <sub>Tot</sub>	86.6	93.8	97.4	101	103.4	108.6
PL <sub>LRCFM</sub>	79.35	94.46	98,90	102.27	104.89	106.97

Fuente: el autor

Donde  $P(d_0) = 71$  m,  $a = 2,7$  m y  $d_0 = 1$  m.

Tabla 4. 8 % de Error absoluto y % de Error absoluto medio: mediciones reales y valores de  $PL_{TOT}$  por el nuevo modelo (%).

Modelo	Distancia (m)					
	3.6	7.4	10.8	14.4	18	21.5
$PL_{LRFCM}$	6.85	3.77	2.83	1.44	0.91	2.47

Fuente: el autor

Para el análisis final, se realizó el estudio estadístico de los resultados obtenidos sobre el tráfico (tasa de entrega de paquetes y throughput de la red), consumo energético y cobertura de las simulaciones.

Existen varios modelos de propagación de señales inalámbricas que permiten diseñar escenarios de agricultura de precisión, determinar el más adecuado se vuelve una tarea compleja debido a la gran variedad de obstáculos y la vegetación que existen en los terrenos y bosques, el poder tener una aproximación a través de la simulación computacional permite un análisis de programación, cobertura y consumo energético, permite seleccionar la mejor tecnología de Zigbee para su implementación. Además, mediante el modelo de Weissberger se pudo obtener valores de las pérdidas

Las métricas preexistentes de la agricultura de precisión se pueden aplicar más fácilmente, maximizando los beneficios ya conocidos de las prácticas establecidas (saber qué tipos de cultivos plantar cuando, saber cuándo y cuándo regar, etc.).

La tecnología WSN hace posible monitorear y dirigir específicamente cada cultivo, haciéndolo práctico y costo-efecto para implementar agricultura de precisión sin importar el área de cultivo. Este enfoque también es fácilmente escalable agregando centros de comunicación y sensores adicionales.

Este trabajo se efectuó mediante el método no experimental, basado en la medición sobre las variables específicas de desempeño en la red tales como: tasa de entrega de paquetes, tasa de transferencia. Mediante el apoyo del software Simulator NS-2 así como el Modelo de Weissberger se evaluó las variables antes mencionadas.

## Conclusiones

Zigbee está especialmente diseñada para grandes redes de sensores, con las características inherentes a ellas: fiabilidad, larga duración de las baterías de los dispositivos, bajos costes, tamaño diminuto y complejidad reducida, sin requerimientos de calidad de servicio importantes.

Si la distancia entre la estación principal y la estación de cultivo es muy grande, es necesario utilizar estaciones de que actúen como repetidor. El tipo de trama o datagrama se envía para llamados generales (CQ), balizas (beacons) o cuando no se necesita que haya una corrección de errores en la Capa Enlace.

Aunque Zigbee maneja un protocolo de paquetes diseñado para redes con poca carga de tráfico. Utiliza el protocolo CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access con Collision Avoidance), similar al utilizado en WIFI, y con una opción para ranurar el tiempo GTS para los datos de alta prioridad.

Zigbee tiene una seria limitación cuando la aplicación requiere un ancho de banda considerable, por ejemplo, para aplicaciones de voz o vídeo.

Un modelo de pérdida de trayecto sirve para predecir la propagación de señales de nodos de sensores inalámbricos desplegados en entornos de agricultura de precisión permitirá optimizar la red, sin sobredimensionar con nodos ni lo contrario en subdimensionar nodos.

Se ha evaluado datos de un caso de estudio de parcelas irrigadas, estos datos de variables controladas se analizan para determinar pérdida de trayectoria de la señal en una red WSN basada en tecnología Zigbee.

Los modelos de propagación a gran escala (FSPL y 2-Rayos) son inexactos cuando se usan con modelos de follaje para predecir la pérdida de trayectoria total en ambientes de vegetación. El % de error absoluto medio de estos modelos difirieron en 10.69% y 38.14% de las mediciones reales, respectivamente.

Un análisis de los datos medidos muestra que el modelo de pérdida de trayectoria basado en los modelos COST 235 y FSPL tuvo el mejor rendimiento en comparación con las mediciones empíricas en comparación con otros modelos de follaje.

Sin embargo, este modelo de pérdida de ruta aún no es óptimo, ya que el % de error absoluto medio fue del 10,69%. Por lo tanto, este estudio presentó un nuevo modelo de pérdida de trayectoria empírica, el LRCFM, para el invernadero de mango.

Los parámetros de LRCFM se derivan de experimentos empíricos en los que se utilizó el modelo.

Para determinar el rendimiento del modelo LRCFM, se calculó el % de error absoluto medio. El resultado fue 2,75% comparado con el 10,69% del modelo FSPL combinado con el modelo COST 235. Con base en los resultados teóricos y empíricos, el modelo LRCFM es el modelo de pérdida de trayectoria total más eficaz para representar la pérdida de vegetación en este entorno.



## **Recomendaciones**

Se recomienda que las aplicaciones de redes Zigbee se integren a redes de sensores inalámbricos con conexión a la red 3G de operadores de telefonía celular para monitorear variables en tiempo real y con mayor cobertura de señal.

Difundir alcances del monitoreo de variables a agricultores del país, con el fin de que optimicen recursos en plantación y cosecha.

Asesorar a agricultores que se puede optimizar recursos como el consumo de agua a través de reducir la cantidad sin comprometer la calidad del crecimiento del cultivo o crecimiento de una planta, árbol etc.

Se recomienda que la recogida de datos se haga en base a horas. Cualquier frecuencia mayor no suministra información útil para el modelo de software y se convierte en una carga para la red de sensores inalámbrica en términos de consumo, energía y transmisión de datos.

Un monitoreo de baja frecuencia puede ser aceptable para algunos cultivos de crecimiento lento y áreas que tienen, las condiciones climáticas uniformes muy estables.

Emplear plataformas informáticas con procesamiento rápido para interpretar los datos recopilados y resuelvan el problema concreto del modo más óptimo.

Realizar investigaciones con redes implementadas con el objetivo de medir y comparar las predicciones estadísticas que resultan de las simulaciones.

## **Glosario**

APL Application Layer

APSDE Application Support Sublayer Data Entity

APSME Application Support Sublayer Management Entity

CAP Contention Access Period

CBC-MAC Cipher Block Chaining Message Authentication Code

CCA Clear Channel Assessment

CCM Counter with CBC-MAC

CCM\* CCM versión extendida.

CFP Contention Free Period

CSMA-CA Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

DES Data Encryption Standard

DSSS Direct Sequence Spread Spectrum

ED Energy Detection

FCS Frame check Sequence

FFD Full Function Device

GTS Guaranteed Time Slot

ISM Industrial, Scientific and Medical

LQI Link Quality Indicator

LR-WPAN Low-Rate Wireless Personal Area Network

MAC Medium Access Control

MIC Message Integrity Code

MPDU MAC protocol Data Unit

MSDU MAC Service Data Unit

MLME MAC Layer Management Entity

MLME-SAP Mac Layer Management Entity Service Access Point

NLDE Network Layer Data Entity  
NLME Network Layer Management Entity  
NPDU Network Protocol Data Unit  
NSDU Network Service Data Unit  
OSI Open System Interconnection  
PAN Personal Area Network  
PD Physical Data  
PHY Physical Layer  
PLME Physical Layer Management Entity  
POS Personal Operating Space  
PPDU Physical Protocol Data Unit  
PSDU Physical Service Data Unit  
RFD Reduced Function Device  
RX Receptor  
SAP Service Access Point  
SNR Signal to Noise Ratio  
SSP Secure Service Provider  
WLAN Wireless Personal Area Network  
WPAN Wireless Personal Area Network  
ZDO ZigBee Device Object

## Bibliografía

- Agudelo Quiroz, S. (2011). *REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS UTILIZANDO ZIGBEE/802.15.4*. Obtenido de [https://nelwibaez.files.wordpress.com/2014/01/a\\_redes\\_de\\_sensores\\_inalambricos\\_utilizando\\_zigbee802154\\_a05yzx\\_.pdf](https://nelwibaez.files.wordpress.com/2014/01/a_redes_de_sensores_inalambricos_utilizando_zigbee802154_a05yzx_.pdf)
- Alfvin, R. (2011). *Webmaster IEEE 802.15*. Obtenido de Institutos de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, Inc.: <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/Contacts.html>
- ANT+Alliance. (2016). *El Protocolo ANT*. Obtenido de <https://www.thisisant.com/developer/ant-plus/ant-antplus-defined>
- Barbolla Asenjo, D. (2009). *Desarrollo de una aplicación de comunicación Bluetooth entre una PDA y sensores*. . Obtenido de Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior. Ingeniería en Informática.: <https://core.ac.uk/download/pdf/30043084.pdf>
- Cianca, K. (2012). *WSN*. Obtenido de [http://lasredesconsensores.blogspot.com/2012\\_07\\_01\\_archive.html](http://lasredesconsensores.blogspot.com/2012_07_01_archive.html)
- Dementyev, A., Hodges, S., Taylor, S., & Smith, J. (2016). *Power Consumption Analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee and ANT Sensor Nodes in a Cyclic Sleep Scenario*. Obtenido de Department of Electrical Engineering, University of Washington, Seattle, WA, USA: <https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2016/02/IWS20201320wireless20power20consumption.pdf>
- Dignani, P. (2011). *Análisis del protocolo Zigbee*. Obtenido de [http://postgrado.info.unlp.edu.ar/Carreras/Especializaciones/Redes\\_y\\_Seguridad/Trabajos\\_Finales/Dignanni\\_Jorge\\_Pablo.pdf](http://postgrado.info.unlp.edu.ar/Carreras/Especializaciones/Redes_y_Seguridad/Trabajos_Finales/Dignanni_Jorge_Pablo.pdf)
- DomoDesk. (2011). *A fondo Zigbee*. Obtenido de <http://www.domodesk.com/a-fondo-zigbee>
- Egea, D. (2009). *Posicionamiento con una red de sensores inalámbricos (WSN): implementación para una aplicación real*. Obtenido de

[http://www.recercat.cat/bitstream/handle/2072/97337/PFC\\_DanielEgeaRoca.pdf?sequence=1](http://www.recercat.cat/bitstream/handle/2072/97337/PFC_DanielEgeaRoca.pdf?sequence=1)

García, N. (2006). *Modelo de cobertura en redes inalámbricas basado en radiosidad por refinamiento progresivo*. Obtenido de <http://di002.edv.uniovi.es/~cueva/investigacion/tesis/Nestor.pdf>

Iraceburu González, J., & Goicoechea Fernández, J. (2014). *Desarrollo e implementación de una red inalámbrica de sensores de temperatura y humedad*. Obtenido de Universidad Pública de Navarra. Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicación: [http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/11846/TFG\\_IraceburuGonzalezJulen2014.pdf?sequence=1](http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/11846/TFG_IraceburuGonzalezJulen2014.pdf?sequence=1)

Kulkarni, A., Forster, A, & Kumar, G. (2011). "*Computational Intelligence in Wireless Sensor Networks*". Obtenido de IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 13.

Lore Heba. (2011). *Compututorials: computación, Electrónica y programación*. Obtenido de Módulos de XBee: <http://compututorials.blogspot.com/2011/11/modulos-xbee-lo-basico.html>

Machado, K., Rosário, D., Cerqueira, E., Loureiro, A., Neto, A., & Souza, J. d. (2013). A Routing Protocol Based on Energy and Link Quality for Internet of Things Applications. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). Base de Datos Digital NCBI. DOI: 10.3390/sl30201942, 1942-1964.*

Marko, K. (2015). *Precision Agriculture Eats Data, CPU Cycles: It's A Perfect Fit For Cloud Services*. Obtenido de <https://www.forbes.com/sites/kurtmarko/2015/08/25/precision-ag-cloud/2/#64ed834c16e6>

Meneses, G. (2015). *Wireless sensor networks for structural health monitoring applications*. Obtenido de [https://www.academia.edu/18124441/Redes\\_inal%C3%A1mbricas\\_de\\_sensores\\_aplicadas\\_al\\_monitoreo\\_de\\_integridad\\_estructural](https://www.academia.edu/18124441/Redes_inal%C3%A1mbricas_de_sensores_aplicadas_al_monitoreo_de_integridad_estructural)

- Nates, J. (2013). *La tecnología punta de la agricultura*. Obtenido de <http://www.abc.es/natural-biodiversidad/20130412/abci-agricultura-tecnologia-punta-201304121101.html>
- NSR, National Simulation Resource. (2015). *JSim*. Obtenido de University of Washington Department of Bioengineering, provides the following tools in support of the Physiome Project:: <http://nsr.bioeng.washington.edu/jsim/>
- OMNeT++ . (2016). *OMNeT++ Discrete Event Simulator*. Obtenido de <https://omnetpp.org/>
- Oyarce, A. (2010). *Guía del usuario. XBEE Series 1*. Obtenido de Ingeniería MCI Ltda.: [http://olimex.cl/website\\_MCI/static/documents/XBee-Guia\\_Usuario.pdf](http://olimex.cl/website_MCI/static/documents/XBee-Guia_Usuario.pdf)
- Pawlowski, A., Rodríguez, F., Guzman, J., & Berenguel, M. (2010). *Study of Event-Based Sampling Techniques and Their Influence on Greenhouse Climate Control with Wireless Sensors Network*. Obtenido de <https://www.intechopen.com/books/factory-automation/study-of-event-based-sampling-techniques-and-their-influence-on-greenhouse-climate-control-with-wire>
- Raheemah, A., Sabri, N., Salim, M., & Ehkan, P. (2016). *New empirical path loss model for wireless sensor networks in mango*.
- Rodriguez, A. (2016). *Tecnología LoRa para sistemas IoT*. Obtenido de <http://www.comunicacionesinalambricashoy.com/tecnologia-lora-sistemas-iot/>
- Sensprout. (2017). *Low-cost by using smart agriculture sensor* . Obtenido de <http://sensprout.com/en/2017/02/06/749>
- TuElectrónica. (2016). *Telecomunicaciones, Electrónica e Informática*. Obtenido de ¿Qué es Arduino IDE?: <http://www.tuelectronica.es/noticias/que-es-arduino-ide.html>
- Wexler, J. (2012). *Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4)*.
- WifiSafe. (2017). *FACTORES QUE AFECTAN AL FUNCIONAMIENTO DE LAS REDES WIRELESS*. Obtenido de <https://www.wifisafe.com/blog/factores-afectan-al-funcionamiento-de-las-redes-wireless/>
- XBee. (2016). *¿Qué es XBee?* Obtenido de Ingeniería MCI Ltda.: <http://xbee.cl/que-es-xbee/>



## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Kevin Mauricio Choez Márquez** con C.C: 0926961715 autor del Trabajo de Titulación: **Análisis y evaluación de pérdidas de datos en redes Zigbee para la agricultura de precisión** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 15 de Agosto de 2017

---

Choez Márquez, Kevin Mauricio

C.C: 0926961715

## **REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS DE DATOS EN REDES ZIGBEE PARA LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN		
<b>AUTOR(ES)</b>	Choez Márquez, Kevin Mauricio		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	M. Sc. Daniel Bohórquez Heras		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería en Telecomunicaciones		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero en Telecomunicaciones		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	15 de Agosto de 2017	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	107
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Sistemas telemáticos, radio frecuencia, propagación		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Zigbee, WPAN, pérdida datos, modelo dos rayos, espacio libre.		
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>			
<p>El estándar IEEE 802.15.4, define todo lo relacionado con las redes inalámbricas de área personal de bajo tráfico (Low Rate Wireless Personal Area Networks LR-WPAN). Tecnologías de dicho estándar son; Xbee de Digi y MiWi de Microchip pero la más implementada es Zigbee, esta opera en la banda 2.4 GHz de la ISM (Industrial, Scientific and Medical) bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en áreas industrial, científica y médica. Con un rango de cobertura aproximado de 100 metros y una tasa de bits de 250 kbps sobre 15 canales posibles. Zigbee es un estándar emergente diseñado específicamente para redes de área personal inalámbricas de bajo índice (LR-WPAN) pero existen muchas limitaciones, en donde el primer desafío es el desvanecimiento de la señal, retardo de propagación que incrementan pérdidas de la señal en el receptor. La evaluación de pérdidas de datos en estos tipos de redes se efectúa con varias experimentaciones obtenidas de la literatura científica en los dos últimos años, así se tiene resultados de tasa de pérdida de paquetes, y el rendimiento de transmisión. La aportación del trabajo de titulación, indica que redes desarrolladas en Zigbee podrían funcionar bien bajo transmisión multi-salto durante un largo período de tiempo.</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-4-2898202 +593-98 890 4527	E-mail: kmauro7@hotmail.com	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE</b>	<b>Nombre:</b> Córdova Rivadeneira Luis Silvio		
	<b>Teléfono:</b> +593-9-92305262		
	E-mail: <a href="mailto:luis.cordova@cu.ucsg.edu.ec">luis.cordova@cu.ucsg.edu.ec</a>		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			