



## **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

### **TÍTULO DE LA TESIS**

**“ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS WIFI Y ZIGBEE QUE OPTIMICE LAS COMUNICACIONES INALÁMBRICAS PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA DE UN INVERNADERO”.**

**SANDRA ELIZABETH CASTILLO RODRÍGUEZ**

Tesis presentada ante la Escuela de Postgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de Magíster en **INTERCONECTIVIDAD DE REDES**

**RIOBAMBA - ECUADOR  
2012**

## CERTIFICACIÓN

El Tribunal de Tesis certifica que:

El trabajo de investigación titulado: **“ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS WIFI Y ZIGBEE QUE OPTIMICE LAS COMUNICACIONES INALÁMBRICAS PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA DE UN INVERNADERO”**, de responsabilidad de la señorita Sandra Elizabeth Castillo Rodríguez ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

### Tribunal de Tesis:

Ing. Msg. Gloria Miño  
**PRESIDENTE TRIBUNAL**

---

Ing. Msg. Diego Ávila. P.  
**TUTOR**

---

Ing. Msg. Marco Viteri B.  
**MIEMBRO**

---

Ing. Msg. Gloria Arcos M.  
**MIEMBRO**

---

**Escuela Superior Politécnica de Chimborazo  
Riobamba, Junio del 2012**

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

Yo, Sandra Elizabeth Castillo Rodríguez, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis; y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.

---

Ing. Sandra Elizabeth Castillo R.

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

### A

<b>ACK</b>	Acknowledge
<b>ACL</b>	Access Control List.
<b>AP</b>	Access Point

### B

<b>BSS</b>	Basic Service Set
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying

### C

<b>CCK</b>	Complementary Code Keying
<b>CCM</b>	Counter Mode with (CBC) Message Authentication Code (MAC)
<b>CCMP</b>	Counter Mode—CBC MAC Protocol
<b>CRC</b>	Cyclic Redundancy Check

### D

<b>DSSS</b>	Direct Sequense Spread Spectrum
<b>DHCP</b>	Dynamic Host Configuration Protocol
<b>DCF</b>	Distributed Cordination Function

### E

<b>EEPROM</b>	Electrically Erasable Programmable Read – Only Memory
<b>EIRP</b>	Effective Isotropic Radiated Power
<b>ESS</b>	Extended Service Set

### F

<b>FFD</b>	Full Function Device
------------	----------------------

### I

<b>ISM</b>	Industrial, Scientific and Medical
<b>IBSS</b>	Independent Basic Service Set
<b>ICMP</b>	Internet Control Message Protocol
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers

### L

<b>LAN</b>	Local Area Network
<b>LR - WPAN</b>	Low Rate – Wireless Personal Area Network

<b>LLC</b>	Link Layer Control
<b>M</b>	
<b>MAC</b>	Medium Access Control (the meaning used in this book)
<b>MAC (alt)</b>	Message Authentication Code (cryptographic community use)
<b>MOTE</b>	Nodo Inalámbrico
<b>MPDU</b>	MAC Protocol Data Unit
<b>MSDU</b>	MAC Service Data Unit
<b>O</b>	
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>OSI</b>	Open Systems Interconection
<b>P</b>	
<b>PSK</b>	Pre-shared Key
<b>PRNG</b>	Pseudo Random Number Generator
<b>Q</b>	
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase Shift Keying
<b>R</b>	
<b>RFD</b>	Reduced Function Device
<b>S</b>	
<b>SHM</b>	Structure Health Monitoring
<b>SMTP</b>	Simple Mail Transfer Protocol
<b>SSID</b>	Service Set Identifier
<b>V</b>	
<b>VLAN</b>	Virtual Local Area Network
<b>W</b>	
<b>WIFI</b>	Wireless Fidelity
<b>WLAN</b>	Wireless local Access Network
<b>WPA</b>	Wi-Fi Protected Access
<b>WPA2</b>	Wi-Fi Protected Access versión 2
<b>WSN</b>	Wireless Sensor Network

# INDICE GENERAL

CERTIFICACION	
DERECHOS DE AUTORIA	
INDICE DE ABREVIATURAS	
INDICE GENERAL	
INDICE DE TABLAS	
INDICE DE FIGURAS	
AGRADECIMIENTO	
DEDICATORIA	
RESUMEN	
SUMARY	

## CAPITULO I

1	INTRODUCCION.....	14
1.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	14
1.2	JUSTIFICACION.....	15
1.3	OBJETIVOS.....	18
1.3.1	GENERAL.....	18
1.3.2	ESPECIFICO.....	18
1.4	HIPOTESIS .....	18

## CAPITULO II

2	REVISION DE LITERATURA.....	19
2.1	INTRODUCCION A LA RED DE SENSORES.....	19
2.2	REDES INALAMBRICA DE SENSORES (AD-HOC).....	20
2.3	CARACTERISTICAS DE UNA RED DE SENSORES.....	24
2.4	HARDWARE DE UN NODO SENSOR.....	24
2.4.1	PARTES DE UN NODO SENSOR .....	26
2.5	SOFTWARE DE UN NODO SENSOR .....	30
2.5.1	PaIOS .....	31
2.5.2	SOS .....	31
2.5.3	TinyOS.....	32
2.6	DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES.....	34
2.7	APLICACIONES .....	42
2.7.1	MILITAR.....	41
2.7.2	MEDIO AMBIENTE .....	41
2.7.3	SALUD .....	41
2.7.4	ESTRUCTURAS.....	41
2.7.5	AUTOMOCIÓN .....	41
2.7.6	DOMOTICA.....	41
2.7.7	AGRICULTURA.....	41
2.8	ESTANDAR IEEE 802.11 – WIFI .....	43
2.8.1	INTRODUCCION.....	43
2.8.2	OBJETIVOS.....	44
2.8.3	COMPONENTES DE UN RED IEEE 802.11 a/b/g .....	45

2.8.4	TOPOLOGIAS DE RED.....	45
2.8.5	ARQUITECTURA DEL ESTANDAR IEEE 802.11 .....	47
2.9	ESTANDAR IEEE 802.15.4 - ZIGBEE .....	50
2.9.1	INTRODUCCION.....	50
2.9.2	OBJETIVOS.....	50
2.9.3	COMPONENTES DE UNA RED IEEE 802.15.4 .....	51
2.9.4	TOPOLOGIAS DE RED.....	51
2.9.5	ARQUITECTURA DEL ESTANDAR IEEE 802.15.4.....	52

### CAPITULO III

3	MATERIALES Y TECNICAS .....	56
3.1	DISEÑO DE LA INVESTIGACION .....	56
3.2	TIPO DE LA INVESTIGACION .....	57
3.2.1	METODOS, TECNICAS E INSTRUMENTOS.....	58
3.3	POBLACION Y MUESTRA .....	60
3.4	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION .....	61
3.5	ESCENARIOS DE PRUEBA .....	64
3.5.1	IMPLEMENTACION DE ESCENARIOS DE PRUEBA .....	65
3.5.2	ESCENARIO 1: PROTOTIPO IMPLEMENTADO CON WIFI.....	66
3.5.3	ESCENARIO 2: PROTOTIPO IMPLEMENTADO CON ZIGBEE .....	67
3.6	PLANTEAMIENTO DE LA HIPOTESIS .....	68
3.6.1	OPERACIONALIZACIÓN CONCEPTUAL DE LAS VARIABLES .....	69
3.6.2	OPERACIONALIZACIÓN METODOLÓGICA .....	69
3.6.2.1	OPERACIONALIZACIÓN METODOLÓGICA DE LA VARIABLE INDEPENDIENTE.....	70
3.6.2.2	OPERACIONALIZACIÓN METODOLÓGICA DE LA VARIABLE DEPENDIENTE .....	71

### CAPITULO IV

4	ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS .....	73
4.1	DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE COMPARACIÓN .....	83
4.2	ANALISIS Y PRESENTACION DE RESULTADOS .....	84
4.2.1	ANALISIS DE LA VARIABLE INDEPENDIENTE.....	84
4.2.1.1	PUNTAJE ALCANZADO VARIABLE INDEPENDIENTE.....	89
4.2.2	ANALISIS DE LA VARIABLE DEPENDIENTE .....	91
4.2.2.1	VALORACION DE INDICADORES DE LA VARIABLE DEPENDIENTE .....	98
4.2.2.2	PUNTAJE ALCANZADO VARIABLE DEPENDIENTE.....	102
4.3	COMPROBACION DE LA HIPOTESIS DE LA INVESTIGACION.....	103

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Recursos Hardware .....	59
<b>Tabla 2</b> Operacionalización Conceptual de Variables .....	61
<b>Tabla 3</b> Operacionalización Metodológica de la Variable Independiente.....	62
<b>Tabla 4</b> Operacionalización Metodológica de la Variable Dependiente.....	63
<b>Tabla 5</b> Escala de Puntuación para calificación de índices .....	76
<b>Tabla 6</b> Escala de valoración para el procesamiento de información de la variable dependiente e independiente .....	77
<b>Tabla 7</b> Resumen de la Evaluación del Indicador N. 1, variable independiente.....	78
<b>Tabla 8</b> Resumen de la Evaluación del Indicador N. 2, variable independiente.....	79
<b>Tabla 9</b> Resumen de la Evaluación del Indicador N. 3, variable independiente.....	81
<b>Tabla 10</b> Resumen de la Evaluación del Indicador N. 4, variable independiente.....	82
<b>Tabla 11</b> Resumen de la Evaluación del Indicador N. 5, variable independiente.....	84
<b>Tabla 12</b> Resumen de la Evaluación del Indicador N. 6, variable independiente.....	85
<b>Tabla 13</b> Resumen de la Evaluación del Indicador N. 7, variable independiente.....	87
<b>Tabla 14</b> Esquema General de Resultados.....	89
<b>Tabla 15</b> Factor (n) para distintos entornos .....	92
<b>Tabla 16</b> Datos tomados en escenarios de prueba N°1 para el indicador 1 de la variable dependiente.....	93
<b>Tabla 17</b> Datos tomados en escenarios de prueba N°2 para el indicador 1 de la variable dependiente.....	93
<b>Tabla 18</b> Resumen de paquetes transmitidos correctamente .....	94
<b>Tabla 19</b> Distancias entre nodos.....	94
<b>Tabla 20</b> Factores de consumo de corriente de los sensores proporcionado por el fabricante.....	94
<b>Tabla 21</b> Cálculo de la Potencia (mW) .....	95
<b>Tabla 22</b> Sensibilidad de la Señal de acuerdo a la distancia.....	95
<b>Tabla 23</b> Relación de tablas 20 y 24.....	98
<b>Tabla 24</b> Disponibilidad de Servicio.....	98
<b>Tabla 25</b> Datos tomados en escenarios de prueba N°1 y 2 para el indicador 3 de la variable dependiente..	99
<b>Tabla 26</b> Resumen Datos Tabla 27.....	99
<b>Tabla 27</b> Conexión de Nodos.....	99
<b>Tabla 28</b> Transmisión de paquetes en una red wifi según el voltaje.....	99
<b>Tabla 29</b> Transmisión de paquetes en una red zigbee según el voltaje.....	100
<b>Tabla 30</b> Resumen Datos Tabla 30 y 31.....	101
<b>Tabla 31</b> Transmisión de Información según Voltaje .....	101
<b>Tabla 32</b> Resumen Consumo de baterías Tx y Reposo.....	101
<b>Tabla 33</b> Consumo de Baterías Tx 100%.....	101
<b>Tabla 34</b> Resumen de Sensores Inalámbricos WIFI.....	102
<b>Tabla 35</b> Resumen de Sensores Inalámbricos ZIGBEE .....	102
<b>Tabla 36</b> Presentación de Resultados .....	104
<b>Tabla 37</b> Frecuencias Observadas en la Investigación.....	105
<b>Tabla 38</b> Tabla de Frecuencias Esperadas .....	106
<b>Tabla 39</b> Cálculo de $\chi^2$ .....	106

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Diagrama de prototipo propuesto	17
<b>Figura 2</b> Diagrama de WSN AD-HOC	21
<b>Figura 3</b> Partes de un Nodo Sensor	25
<b>Figura 4</b> Estructura Interna de un Sensor Inalámbrico Inteligente	25
<b>Figura 5</b> Modelo de componentes TinyOS e interacción de componentes	33
<b>Figura 6</b> Distribución de una red de sensores	36
<b>Figura 7</b> Topología en Estrella	39
<b>Figura 8</b> Topología en Malla	39
<b>Figura 9</b> Topología Híbrida	40
<b>Figura 10.</b> Canales en la Banda 2.4 GHz	43
<b>Figura 11</b> Conjunto independiente de servicios básicos	45
<b>Figura 12</b> Conjunto de servicios básicos	46
<b>Figura 13</b> Conjunto de servicios extendidos	47
<b>Figura 14</b> Arquitectura MAC	49
<b>Figura 15</b> Diagrama de capas IEEE 802.15.4	52
<b>Figura 16</b> Trama de sincronización MAC	55
<b>Figura 17</b> Comparativa de WIFI y ZIGBEE	58
<b>Figura 18</b> Invernadero tipo Parral	67
<b>Figura 19</b> Invernadero tipo Raspa y Amagado	68
<b>Figura 20</b> Invernadero tipo Capilla	69
<b>Figura 21</b> Diagrama Lógico Prototipo WIFI	70
<b>Figura 22</b> Diagrama Lógico Prototipo ZIGBEE	71
<b>Figura 23</b> Evaluación de indicador N°1, variable independiente	79
<b>Figura 24</b> Evaluación de indicador N°2, variable independiente	80
<b>Figura 25</b> Evaluación de indicador N°3, variable independiente	82
<b>Figura 26</b> Evaluación de indicador N°4, variable independiente	83
<b>Figura 27</b> Evaluación de indicador N°5, variable independiente	85
<b>Figura 28</b> Evaluación de indicador N°6, variable independiente	86
<b>Figura 29</b> Evaluación de indicador N°7, variable independiente	88
<b>Figura 30</b> Diagrama General de Resultados	90
<b>Figura 31</b> Diagrama de Resultados del Análisis Comparativo Tecnologías Inalámbricas WIFI y ZIGBEE	90
<b>Figura 32</b> Resumen Valoración de Sensores Inalámbricos para la variable dependiente	102
<b>Figura 33</b> Gráfica de la Función $X^2$	107
<b>Figura 34</b> MPR2400 Micaz con antena estandar	109
<b>Figura 35</b> Supertrama IEEE 802.15.4	110
<b>Figura 36</b> Medidas aproximadas de un invernadero tipo capilla en nuestro medio.	111
<b>Figura 37</b> Distribución de sensores en el invernadero	113
<b>Figura 38</b> Niveles de Seguridad en IEEE 802.15.4	115
<b>Figura 39</b> MICA2 / MPR400	116
<b>Figura 40</b> Plataforma Mica2 / MPR2400	117
<b>Figura 41</b> Modulo Estación base Gateway	118
<b>Figura 42</b> Software de trabajo para una WSN	119
<b>Figura 43</b> Datos de sensores	120
<b>Figura 44</b> Datos Análisis Comunicación Sensor – Gateway	122
<b>Figura 45</b> Topología de Red	123

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios y a la Virgen Dolorosa por obrar y vivir en mí.

A los Ingenieros Diego Ávila, Marco Viteri y Gloria Arcos, a todos mis amigos y compañeros por sus valiosos criterios y apoyo en el desarrollo de esta tesis.

## **DEDICATORIA**

A mis queridos padres, Miguel Castillo y María Rodríguez que han luchado día a día por alcanzar junto a mí, cada uno de mis objetivos.

A mi hermanita preciosa Geovanna que en todo momento ha sido mi apoyo y refugio.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo realizar un análisis de las tecnologías wifi y zigbee que optimice las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero, el estudio de las tecnologías wifi y zigbee está basado en investigaciones técnicas, realizadas en trabajos de investigación similares, en donde se evaluó las soluciones, mediante parámetros como: topología, tasa de transferencia, frecuencia, cobertura, tamaño de la red, duración de batería y seguridad. De esta comparación se determinó que la mejor alternativa para la implementación dentro de una red inalámbrica en un invernadero fue zigbee con una diferencia de 10 puntos en total de la valoración frente a wifi.

Con los ambientes de pruebas implementados se evaluó la optimización de las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero, los indicadores definidos para este análisis fueron: distancia de nodos, disponibilidad de servicio, conexión de nodos, transmisión de paquetes según voltaje y consumo de baterías, se evaluaron estos parámetros cuantitativamente y cualitativamente, comprobándose que existe una mejora del 93,33 % al implementar la solución con sensores inalámbricos zigbee en un invernadero quedando así demostrada la hipótesis.

Finalmente se realiza una propuesta de una guía de referencial para el diseño y configuración de una red inalámbrica de sensores utilizando la tecnología zigbee.

## SUMARY

The present research was to carry out an analysis of the technologies that optimize zigbee wifi and wireless communications to control temperature of a greenhouse study and zigbee wireless technology is based on research techniques, research conducted in like, wherein the solutions was evaluated by parameters such as topology, transfer rate, frequency, coverage, network size, battery life and safety. From this comparison it was determined that the best option for implementation within a wireless network in a greenhouse was zigbee with a difference of 10 points in total valuation to wifi.

With the implemented test environments were evaluated for optimization of wireless communications to control temperature of a greenhouse, the indicators defined for this analysis were: distance of nodes, service availability, connection nodes, packet transmission and consumption by voltage batteries, these parameters were assessed quantitatively and qualitatively, proving that there is a 93,33% improvement in implementing the solution using zigbee wireless sensors in a greenhouse and proved the hypothesis being.

Finally there is a proposal of a reference guide for the design and configuration of a wireless sensor network using zigbee technology.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desarrollo de protocolos y arquitecturas para el diseño de redes de sensores inalámbricos se ha convertido en un campo de investigación muy importante en los últimos años. El desarrollo de estas tecnologías ha venido de la mano de nuevos estándares inalámbricos de comunicación, que han permitido la aparición de nuevos paradigmas como la computación ubicua. Dentro de este nuevo escenario se prevé un futuro en el que minúsculos sensores monitoricen el medio continuamente y reporten su información a los nodos próximos y a una estación base central, formando una arquitectura computacional en grid. El número de situaciones en los que este tipo de tecnología es susceptible de aplicación es enorme, siendo algunos de los ejemplos típicos: domótica y control inteligente de edificios, medicina, agricultura, sistemas de control industrial, etc.

Los requerimientos de estos sistemas están mayormente encaminados a situaciones donde no es necesario un gran ancho de banda, pero el posicionamiento de los nodos restringe su consumo de potencia, ya que muchas veces deberán estar alimentados por baterías. Los estándares inalámbricos más extendidos hoy en día son IEEE 802.15.4, Bluetooth e IEEE 802.11. Cada uno de ellos nació con un objetivo distinto y por lo tanto tiene un rango de aplicación y unas características diferentes.

Una red de sensores inalámbrica (WSN por sus siglas en inglés Wireless Sensor Networks) consiste en una gran cantidad de pequeños dispositivos con cierto poder computacional, comunicación inalámbrica y capacidades de sensado. Estos nodos de sensores generalmente se diseminan sobre la región en estudio, donde cada nodo sensor es responsable de extraer datos del entorno tales como humedad, temperatura, presión, luminosidad, etc., procesando y enviando estos datos a través de uno o más nodos sumideros, los cuales se encargan de la transmisión de los datos al usuario final. Los retos en el desarrollo del hardware y el software en una red de este tipo se acentúan al hacerse necesarias consideraciones respecto al consumo energético, puesto que los nodos deben subsistir el mayor tiempo posible con baterías o con fuentes de energía de prestaciones limitadas, como celdas solares. Esto tiene implicaciones sobre los tipos de sensores y transductores que pueden ser operados, los tiempos utilizados en la captura de los datos, los cálculos que pueden realizarse en cada nodo, y particularmente en los tiempos y rangos presentes en los procesos de comunicación.

El objetivo de las redes de sensores es proveer una forma ágil y eficiente de capturar los valores de estas variables en el tiempo y en el espacio, de modo que sirvan de entrada a procesos de análisis automatizados y manuales para establecer los modelos que permitan pronosticar el rendimiento del cultivo, así como el comportamiento de/ante plagas y enfermedades.

Considerando el modelo será entonces posible predecir posibles problemas y así tomar las medidas correctivas correspondientes, por tanto se desea presentar una propuesta de Redes Inalámbricas de Sensores utilizando la mejor tecnología para aplicarla al control de temperatura de un invernadero.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

Los continuos avances tecnológicos han incentivado el desarrollo de dispositivos con capacidades de comunicación inalámbrica cada vez más pequeños, más potentes y con un consumo de batería más eficiente donde las características de las redes inalámbricas pueden ofrecer una gran flexibilidad al sistema de comunicaciones.

Las tecnologías de la información están viviendo una continua transformación. Son cada día más, los productos nuevos y servicios ofertados, así como la demanda de éstos por parte de los usuarios. Dicha evolución es particularmente significativa en el ámbito de las comunicaciones móviles y sistemas inalámbricos.

A medida que la convergencia entre la informática, las comunicaciones y la electrónica de consumo sea más potente en la vida de los usuarios, va a existir una mayor necesidad de comunicaciones inalámbricas a alta velocidad que puedan interactuar en los diferentes dispositivos, lo que al mismo tiempo va a ofrecer a los usuarios todos los beneficios de la producción a gran escala.

En este sentido, los distintos sectores de la industria están impulsando una plataforma común basada en estándares para la tecnología inalámbrica, que haga posible que múltiples aplicaciones funcionen con un canal de radio común, y que facilite que los diferentes dispositivos puedan comunicarse sin necesidad de hilos. Las redes de área personal WPAN y redes WLAN representan la solución más factible a los problemas de accesibilidad de corto alcance que hoy afectan a las nuevas tecnologías.

Se han establecido ventajas de utilizar redes de sensores sobre sensores aislados o recolectores de datos (data loggers) en aplicaciones agronómicas, particularmente en el caso de invernaderos: aun en relativamente pequeñas extensiones menores a una

hectárea las redes requieren menos tiempo de instalación y de recolección de datos, y son además más fáciles de mantener.

Estos proveen además capacidades de reaccionar en tiempo real, de acuerdo a los datos recolectados, ya sea disparando alarmas sobre situaciones que deben ser atendidas manualmente, o activando dispositivos que puedan compensar eventos no deseados, por medio de mecanismos de irrigación, sistemas de ventilación, iluminación, temperatura, etc.

El presente desarrollo de tesis busca comparar las tecnologías WIFI y ZIGBEE, luego de lo cual se pueda determinar cuál es la más apta para su aplicación e implementación en un invernadero, considerando ciertos parámetros en su elección, para lo cual se propone el siguiente modelo referencial de simulación.



Figura 1 Diagrama de prototipo propuesto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Aginova wifi sensors

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. General**

- Analizar las tecnologías WIFI y ZIGBEE para optimizar las comunicaciones inalámbricas en el control de temperatura de un invernadero.

#### **1.3.2. Específicos**

- Estudiar los estándares inalámbricos IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4 para determinar los principales elementos de proceso y funcionamiento.
- Analizar y comparar los sensores inalámbricos en base a parámetros que permitan determinar la mejor opción para la implementación en un invernadero.
- Crear un ambiente de pruebas para demostrar la comunicación inalámbrica en el control de temperatura en un invernadero.
- Desarrollar un modelo de simulación que sirva como escenario para comparar diferentes tecnologías, determinando sus ventajas y desventajas utilizando sensores inalámbricos.

### **1.4. HIPÓTESIS**

- El análisis de tecnologías WIFI Y ZIGBEE, permitirá optimizar las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero.

# **CAPÍTULO II**

## **REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 INTRODUCCIÓN DE LAS REDES DE SENSORES**

Las redes de sensores provienen de la utilización de sensores durante las guerras con la detección de los atacantes por mar. Es por esto que empezaron a utilizar el “SONAR”, acrónimo de Sound Navigation And Ranging, (‘navegación y alcance por sonido’) que es una técnica que usa la propagación del sonido bajo el agua (principalmente) para navegar, comunicarse o detectar otros buques.

Las redes inalámbricas de sensores hoy en día, permiten dar a conocer de forma inmediata a un sistema informático, características físicas, tales como temperatura, humedad, luz, nivel de sonido, radiación, movimiento, etc., de un determinado entorno.

En este caso, el interés por estas tecnologías se centra en su aplicación dentro de la agricultura y más exactamente en la agricultura basada en el uso de invernaderos. Campo en el que hay enormes posibilidades, pero que actualmente hay pocas aplicaciones desarrolladas.

Para entender las relaciones y los cambios que producen la alteración de cualquier parámetro, se requiere de la observación durante ciertos intervalos de tiempo. El poder registrar de modo simultáneo, distintos parámetros en distintas ubicaciones, le aporta un enorme potencial a las WSN para realizar modelos y predicciones sobre medio ambiente y agricultura.

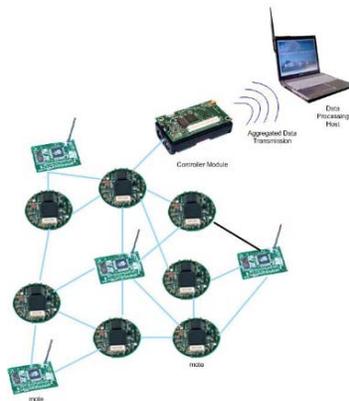
Las variables: espacio y tiempo son fundamentales en los modelos de la agricultura. Algunos experimentos requieren que los datos se obtengan en pocos segundos y otros necesitan obtenerse en pocos días. La obtención de datos puede ser también disparada por algún estímulo ambiental (alarma).

Los sensores inalámbricos permiten disponer de cientos incluso miles de dispositivos tomando datos de una manera no invasiva y con bajo costo. Para extender una red de sensores en el ámbito de la agricultura, obviamente la opción inalámbrica es mas adecuada por cuestiones de costos (entre un 40 y 80 % de ahorro), y por razones de movilidad de ubicaciones.

Las redes de sensores tienen un campo de desarrollo muy grande, razón por la cual son la única alternativa tecnológica para certificar de manera segura los procedimientos necesarios para las certificaciones de productos ecológicos, al garantizar la exactitud y veracidad de los datos suministrados por los sensores de forma continua y en tiempo real.

## **2.2 REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES (AD-HOC)**

La expresión ad-hoc hace referencia a una red en la que no hay un nodo central, sino que todos los dispositivos están en igualdad de condiciones. Ad-hoc es el modo más sencillo para crear una red, un tipo de red formada por un grupo de nodos móviles que forman una red temporal sin la ayuda de ninguna infraestructura externa. Para que esto se pueda llevar a la práctica es necesario que los nodos se puedan ayudar mutuamente para conseguir un objetivo común: que cualquier paquete llegue a su destino aunque el destinatario no sea accesible directamente desde el origen. El protocolo de encaminamiento es el responsable de descubrir las rutas entre los nodos para hacer posible la comunicación.



**Figura 2 Diagrama de WSN AD-HOC**

<sup>2</sup>Las redes de sensores son un concepto relativamente nuevo en adquisición y tratamiento de datos con múltiples aplicaciones en distintos campos, tales como entornos industriales, domótica, entornos militares, detección ambiental, etc.

Esta clase de redes se caracterizan por su facilidad de despliegue y por ser auto configurables, pudiendo convertirse en todo momento en emisor, receptor, ofrecer servicios de encaminamiento entre nodos sin visión directa, así como registrar datos referentes a los sensores locales de cada nodo. Otra de sus características es su gestión eficiente de la energía, que les permite obtener una alta tasa de autonomía que las hacen plenamente operativas.

Las redes de sensores dependen fundamentalmente de las técnicas ad-hoc en las redes wireless. Aunque muchos protocolos y algoritmos han sido diseñados para las redes tradicionales wireless ad-hoc, estas no son convenientes para las características únicas que tienen las redes de sensores.

Para resaltar este punto se muestran diferencias entre redes de sensores y redes ad-hoc:

- El número de nodos sensores en una red de sensores pueden estar varias órdenes de magnitud por encima de los nodos en las redes ad-hoc.

<sup>2</sup> <http://www.cs.ucsb.edu/~nchohan/rrc/>

- Los nodos sensores pueden ser densamente desplegados.
- Los nodos sensores son más propensos a los fallos.
- La topología de la red de sensores cambia frecuentemente.
- Los nodos sensores utilizan principalmente la comunicación por difusión mientras que la mayoría de las redes ad-hoc están basadas en la comunicación punto a punto.
- Los nodos sensores están limitados en cuanto a potencia, capacidad computacional y memoria.

Desde que un gran número de nodos sensores pueden desplegarse densamente, los nodos vecinos pueden estar muy cerca unos de otros. De ahí, que la comunicación multitop en redes de sensores exige un menor consumo de energía que las tradicionales comunicaciones. Además, las transmisiones a bajos niveles de energía pueden mantenerse así, lo cual es deseable en operaciones secretas.

Las redes de sensores ad-hoc consideradas altamente distribuidas, están constituidas por nodos pequeños (inalámbricos) y de peso ligero que se despliegan en un área específica. Son redes sin infraestructura, flexibles en las cuales todas las estaciones ofrecen servicios de encaminamiento para permitir la comunicación de estaciones que no tienen conexión inalámbrica directa.

La principal característica de las redes móviles ad-hoc es que todos los dispositivos que forman parte de la red, además de funcionar como terminales finales, realizan también funciones de retransmisión de paquetes típicamente asociadas a routers. Su función es proveer una infraestructura de comunicación inalámbrica que puede servir para poder monitorear algo en específico (temperatura, presión, movimiento de objetos, etc.).

La construcción de estos nodos sensores con los cuales se conforma la red ha sido posible debido a los avances en el área de sistemas micro electromecánicos (MEMS). Los MEMS son dispositivos miniatura fabricados con capacidad de sensado, comunicación y procesamiento.

Cada uno de estos nodos, se divide en tres subsistemas:

- El subsistema del sensor: sensa (mide un parámetro) el medio ambiente.
- El subsistema de procesado: lleva a cabo el cómputo de la información recabada por el sensado.
- El subsistema de comunicación: es el responsable del intercambio de mensajes con los nodos sensores vecinos

Por otra parte, mientras que un nodo individual tiene una región de sensado, una potencia de procesamiento y una cantidad de energía limitada, teniendo un gran número sensores se da un aumento en la robustez, confiabilidad y precisión en el área de cobertura de dicha red. Esto se da, ya que al tener más nodos sensores que cooperan y colaboran entre si en una región determinada, la adquisición de la información es múltiple. Brindándonos así, más seguridad en el sensado y reafirma el buen desempeño de la red.

Los retos que involucra una Red Inalámbrica de Sensores son el tipo de arquitectura, la diseminación y recolección de la información, las técnicas adoptadas por los nodos sensores para localización y aumentar la eficiencia en el consumo de energía. Este último es factor primario que limita la vida útil de la red.

### **2.3 CARACTERÍSTICAS DE UNA RED DE SENSORES**

Entre las características más importantes que podemos encontrar en cualquier red de sensores, tenemos:

- Están compuestas por un gran número de nodos, pudiendo llegar al orden de los miles (hasta 65.536, por restricciones de direccionamiento).
- Muestran un flujo asimétrico de datos, desde los nodos de captura de datos (sensor node) a una estación base.
- Las comunicaciones son originadas por consultas o eventos.
- En cada nodo existe una cantidad limitada de energía al ser alimentados por baterías, que en muchas aplicaciones es imposible de remplazar o recargar ya que por ejemplo, pudieron ser esparcidos desde un avión en un terreno de difícil acceso.
- Los nodos están propensos a fallar por distintas razones y esto debe ser tolerado por el sistema.
- Se emplean principalmente las comunicaciones de difusión (Broadcast) en lugar de las comunicaciones punto a punto.
- Los nodos no poseen un identificador único universal, tal como lo es un número IP.
- La seguridad, tanto física como a nivel de la comunicación, es mas limitada que en los enfoques de redes inalámbricas convencionales, como en WiFi.

### **2.4 HARDWARE DE UN NODO SENSOR**

Los nodos inalámbricos se llaman motas, del ingles 'mote', por su ligereza y reducido tamaño. Son dispositivos electrónicos capaces de captar información proveniente del entorno en el que se encuentran, procesarla y transmitirla inalámbricamente hacia otro destinatario.

Diseñar una mota no se reduce a miniaturizar un ordenador personal. Hay que tener en cuenta que queremos un espacio reducido, un consumo muy bajo de energía y un coste de los dispositivos reducido. Y en contraposición a esto una potencia de ejecución de programas elevadas y una transmisión de datos eficaz y con amplia longitud de emisión.

Un nodo sensor es un elemento computacional con capacidad de procesamiento, memoria, interfaz de comunicación y puede formar conjuntos de sensores.

El Hardware básico de un nodo sensor se compone de un transceptor (transmisor/receptor), procesador, uno o más sensores, memoria y batería. Los componentes brindan la opción de comunicación (enviar/recibir información), ejecutar tareas que requieren procesamiento mas allá de efectuar funciones de sensado.



Figura 3 Partes de un Nodo Sensor<sup>3</sup>

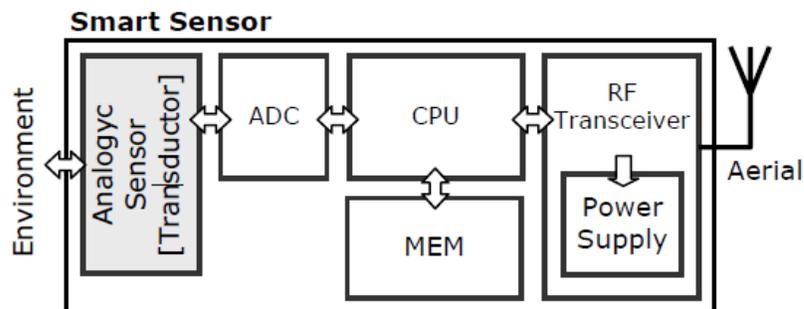


Figura 4 Estructura Interna de un Sensor Inalámbrico Inteligente<sup>3</sup>

<sup>3</sup> <http://www.dtic.ua.es/grupoM/recursos/articulos/JDARE-06-H.pdf>

La capacidad de procesamiento depende del tipo de microprocesador que se emplee. Así mismo, posee una memoria interna en el microcontrolador. La comunicación se realiza mediante un transceptor (transmisor/receptor). Además, se tiene la fuente de alimentación que varía dependiendo del tipo de tecnología con la cual la batería es fabricada. En cuanto al sensor, este es el responsable de monitorear el parámetro de interés e informar del mismo. Los motes o partículas, son pequeños dispositivos inalámbricos basados en tecnología MEMS, que detectan factores físicos.

#### **2.4.1 PARTES DE UN NODO SENSOR**

##### *PROCESADOR:*

[5] Es el componente que interpreta y procesa los datos para transmitirlos a otra estación, también gestiona el almacenamiento de datos en la memoria, puesto que de un nodo sensor se espera una comunicación y una recolección de datos mediante sensores, debe existir una unidad de procesamiento, que se encargue de gestionar todas estas operaciones.

##### *ALIMENTACIÓN:*

Normalmente la fuente de alimentación son baterías difícilmente sustituibles o transformadores con salida adecuada para el nodo si se dispone de toma de corriente. Para las situaciones en donde no se dispone de red eléctrica y la posibilidad de sustituir las baterías es muy complicada, se están estudiando diferentes técnicas para alimentar el sensor, como puede ser mediante placas solares. Ante la limitación de la vida útil del dispositivo hay que realizar una gestión eficiente del consumo energético.

---

<sup>5</sup> Wireless Sensor Networks, TPR2400/2420 Quick Start Guide, Document 7430-0380-01, Rev. A, May 2005

El consumo de energía viene dado por lo que consumen los sensores, la comunicación y el procesado. La mayor cantidad de energía es consumida en la transmisión de información, siendo menor en el procesado y uso de los sensores. Por ejemplo el coste de transmisión de 1 Kb. a una distancia de 100 metros es aproximadamente el mismo que ejecutar 3 millones de instrucciones por un procesador de 100 millones de instrucciones por segundo. Las baterías son la principal fuente de energía de estos motes, pudiendo ser recargables o no recargables.

Están clasificados según el material electroquímico usado para el electrodo como pueden ser NiCd (níquel-cadmio), NiZn (níquel -zinc), Nimh (níquel metal hidruro), y Litio-Ion.

Actualmente se están estudiando sistemas basados en energía renovables para solucionar el problema de la energía en estos nodos, basados en energía solar, termo generación, energía basada en vibraciones, etc.

### *COMUNICACIÓN INALÁMBRICA*

El dispositivo de comunicación se trata de un dispositivo vía radio que permite enviar y recibir datos para comunicarse con otros dispositivos dentro de su rango de transmisión.

Los nodos usan la banda ISM que son bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en áreas industriales, científicas y médica.

El uso de estas bandas de frecuencia está abierto a todo el mundo sin necesidad de licencia, respetando las regulaciones que limitan los niveles de potencia transmitida.

Los medios a elegir para realizar una comunicación inalámbrica son varios: radio frecuencia, comunicación óptica mediante laser e infrarrojos. La comunicación por laser es la que menos energía consume pero requiere de una comunicación visual entre emisor y receptor, y además también depende de las condiciones atmosféricas. Los infrarrojos como el láser, no necesitan antena, aunque es bastante limitado en su capacidad de

transmisión. La radio frecuencia, RF, es la más adecuada para usar en aplicaciones inalámbricas. Las WSN usan las frecuencias de comunicación que se encuentran entre 433 MHz y 2.4 Ghz.

Las funcionalidades de emisión y recepción se combinan en un solo aparato que es llamado transceptor. Los estados de operación son emitir, recibir, dormir e inactividad. En los actuales modelos de transceptor, el modo inactivo consume casi igual que el modo recepción. Por lo que es mejor tener completamente apagado las comunicaciones radio, en el modo inactivo, cuando no se esta emitiendo ni recibiendo.

También es significativa la cantidad de energía consumida cuando cambia de modo durmiente a transmisión de datos. Los sistemas mas populares dentro de los sistemas de comunicación de radio para nodos de redes inalámbricos son:

- Chipcon CC1000 <http://www.chipcon.com/>
- Chipcon CC1020
- Chipcon CC2420
- Xemics XE1205 <http://www.semtech.com/>
- 802.15.4 Chipsets and SoC <http://www.jennic.com/>

## *MEMORIA*

Desde un punto de gasto de energía, las clases mas relevantes de memoria son la memoria integrada en el chip de un microcontrolador y la memoria flash, la memoria RAM fuera del chip es raramente usada. Las memorias flash son usadas gracias a su bajo coste y su gran capacidad de almacenamiento.

La memoria flash es una forma desarrollada de la memoria EEPROM que permite que múltiples posiciones de memoria sean escritas o borradas en una misma operación de programación mediante impulsos eléctricos, frente a las anteriores que solo permite

escribir o borrar una única celda cada vez. Por ello, flash permite funcionar a velocidades muy superiores cuando los sistemas emplean lectura y escritura en diferentes puntos de esta memoria al mismo tiempo.

Las memorias flash son de carácter no volátil, esto es, la información que almacena no se pierde en cuanto se desconecta de la corriente, una característica muy valorada para la multitud de usos en los que se emplea este tipo de memoria.

Los requerimientos de memoria dependen mucho de la capacidad que necesite nuestra aplicación. Hay dos categorías de memorias según el propósito del almacenamiento:

- Memoria usada para almacenar los datos recogidos por la aplicación.
- Memoria usada para almacenar el programa del dispositivo.

## *SENSORES*

Los sensores son dispositivos hardware que producen una respuesta medible ante un cambio en un estado físico, como puede ser temperatura o presión. Los sensores detectan o miden cambios físicos en el área que están monitorizando. La señal analógica continua detectada es digitalizada por un convertidor analógico-digital y enviada a un controlador para ser procesada.

Las características y requerimientos que un sensor debe tener son un pequeño tamaño, un consumo bajo de energía, operar en densidades volumétricas altas, ser autónomo y funcionar desatendidamente y tener capacidad para adaptarse al ambiente.

Los sensores pueden estar clasificados en tres categorías:

**Sensores pasivos omnidireccionales:** Los sensores pasivos captan los datos sin necesidad de manipular el entorno. Son autoalimentados y solo usan la energía para

amplificar la señal analógica captada. No hay ninguna noción de 'dirección' involucrada en estas mediciones.

**Sensores pasivos unidireccionales:** Son sensores pasivos que tienen bien definida la dirección desde donde deben captar la información. Un ejemplo típico es una cámara.

**Sensores activos:** Este tipo de sensores sondan el ambiente, por ejemplo un radar o un sonar o algún tipo de sensor sísmico que generan ondas expansivas a través de pequeñas explosiones.

Cada nodo sensor puede ser equipado con dispositivos sensores tanto como acústicos, sísmicos, infrarrojos, video cámaras, mecánicos, de calor, temperatura, radiación, entre otros. La tendencia es producir sensores a gran escala, a precios bajos, con mejor capacidad de cómputo y de tamaño reducido.

## **2.5 SOFTWARE DE UN NODO SENSOR**

Numerosos y variados son los sistemas operativos existentes hoy para sistemas embebidos, mas no todos satisfacen las restricciones que imponen las Redes de Sensores Inalámbricas (RSI), motivo por el cual muchos de ellos quedan descartados inmediatamente. De esta forma nuestro extenso espacio de decisión se reduce a unos pocos elementos. A continuación se presentaran tres de los principales Sistemas Operativos para redes de sensores, que cumplen con los requisitos.

Los tres sistemas presentan capas de abstracciones para independizar al programador de los niveles inferiores (hardware). Mediante Drivers se comunican aplicación y hardware, al igual que los sistemas operativos para arquitecturas x86. El estudio se basara en como manejan las tareas y eventos que ocurren en cada nodo.

### **2.5.1 PaIOS**

Es un sistema operativo desarrollado por la UCLA (Universidad de California).

Cada tarea mantiene una propia cola de eventos, la tarea puede interactuar con una entrada o salida física. En la fase de inicialización del programa, cada tarea registra una tarea de eventos en la programación del sistema y éste se comunica a través de una cola de eventos generada.

### **2.5.2 SOS**

SOS fue desarrollado en la universidad de UCLA específicamente en el Networked and Embedded Systems Lab (NESL). Implementa un sistema de mensajería que permite múltiples hebras entre la base del sistema operativo y las aplicaciones, las cuales pasan a ser módulos que pueden ser cargadas o descargadas en tiempo de ejecución sin interrumpir la base del sistema operativo. Además procura remediar algunos de las limitaciones propias de la naturaleza estática de muchos de los sistemas precursores a este (por ejemplo TinyOS).

El principal objetivo de SOS es la reconfigurabilidad. Esta se define como la habilidad para modificar el software de nodos individuales de una red de sensores, una vez que estos han sido desplegados físicamente e inicializado su funcionamiento.

La capacidad de dinámicamente de agregar o remover módulos, permite la construcción de software mucho más tolerante a fallos. Esto presenta dos grandes ventajas: uno es el hecho de poder realizar actualizaciones de forma fácil, el otro es la capacidad de anular el funcionamiento de algún modulo defectuoso, de algún nodo que pertenece a la red.

### 2.5.3 TinyOS

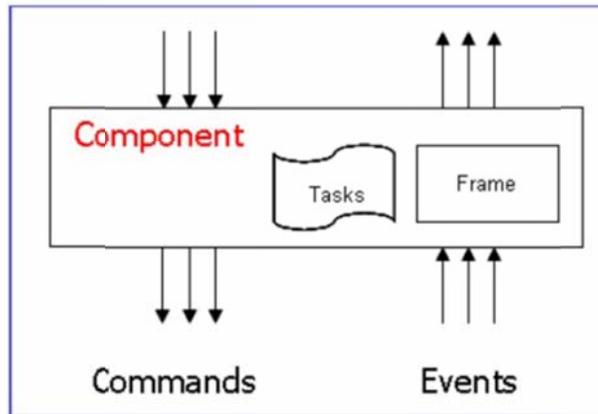
TinyOS, fue desarrollado por la Universidad de Berkeley (California). TinyOS puede ser visto como un conjunto de programas avanzados, el cual cuenta con un amplio uso por parte de comunidades de desarrollo, dada sus características de ser un proyecto de código abierto (Open Source). Este “conjunto de programas” contiene numerosos algoritmos, que nos permiten generar enrutamientos, así como también aplicaciones pre-construidas para sensores.

Esta basado en un modelo de programación por componentes, lo cual propaga las abstracciones del hardware en el software. Tal como el hardware responde a cambios de estado en sus pines de entrada/salida, sus componentes responden a eventos y a los comandos en las interfaces de entrada/salida.

En resumen TinyOS consiste en un pequeño scheduler y un grafico de componentes, los cuales son detallados a continuación:

1. Manejador de comandos.
2. Manejador de eventos
3. Un frame de tamaño fijo y estáticamente asignado, en el cual se representa el estado interno de la componente. Un frame es un bloque que proporciona el contexto en el cual se ejecuta el programa y se almacenan variables.
4. Un bloque con tareas simples.

Su buen desempeño y su desarrollo abierto, han afectado positivamente en el mejoramiento del sistema en si, e influido en la creación de herramientas que facilitan el diseño y trabajo, tales como simuladores, administradores de bases de datos, maquinas virtuales que permiten reprogramación en línea, etc.



antes

Además destaca el hecho de contar con una cantidad numerosa de aplicaciones pre construidas, las que implementan procesamientos de datos y algoritmos de enrutamiento.

## 2.6 FACTORES A CONSIDERAR EN UN DISEÑO DE RED DE SENSORES

Los factores que se deben considerar en el diseño de una red de sensores son aquellos a través de los cuales se puede lograr eficiencia en la utilización de los recursos disponibles.

Los parámetros más importantes que se deben tener en cuenta para el diseño de las redes de sensores son:

### ***TOLERANCIA A FALLOS:***

Es la capacidad de mantener las funcionalidades de red sin ninguna interrupción debido a fallas de los nodos sensores. La tolerancia a fallas puede superarse a través de las redundancias en los enlaces, procesamiento conjunto y comunicación colaborativa de las señales.

### ***ESCALABILIDAD:***

Es un factor crítico que garantiza que el desempeño de la red no se degradará cuando se incrementa la densidad de los nodos sensores, o el número de sus elementos.

***BAJO COSTO:***

Debido a que una red de sensores puede consistir de un gran número de nodo sensores, el costo de cada nodo es importante para justificar los costos totales. Si el costo de la red es más alto que el de una red de sensores tradicional, está injustificado el empleo de una red de sensores inalámbrica.

Para hacer posible este objetivo, el protocolo de comunicaciones y el diseño de red, deben evitar la necesidad de utilizar componentes de alto costo.

***CONSUMO DE POTENCIA:***

En las redes de sensores inalámbricos se requiere un bajo consumo de energía debido a que existirán aplicaciones en las que no se podrá dar mantenimiento a los nodos sensores, por lo que se requiere una alta duración de las baterías.

***LATENCIA:***

Existen aplicaciones que requieren que se entreguen los datos lo más pronto posible y otras que requieren cierto retardo en la entrega de los datos sensados. Por lo tanto, esta característica debe adaptarse según las necesidades.

***CAPACIDAD DE TRANSPORTE:***

Por lo general en las aplicaciones se requiere entregar los datos sensados a una estación central, por lo tanto, los nodos más cercanos deben ser capaces de manejar el tráfico generado por los demás nodos sensores que no tienen el alcance para entregar directamente los mensajes.

***RUTEO:***

La responsabilidad de un protocolo de ruteo es el intercambio de información, encontrando el camino más confiable para alcanzar el destino deseado teniendo en consideración la distancia, el requerimiento mínimo de energía y el tiempo de vida del

enlace inalámbrico; búsqueda de la información en el caso de que la conexión falle; reparación de los enlaces caídos gastando el mínimo de potencia de procesamiento y ancho de banda.

### ***SINCRONIZACIÓN:***

Los nodos sensores deberán ser capaces de sincronizarse uno con otro de manera completamente distribuida, para que la calendarización del multiplexado en tiempo pueda ser impuesta, y ordenada de forma temporal la detección de eventos sin ninguna ambigüedad. Dado que los nodos en una red inalámbrica de sensores operan de forma independiente, sus relojes podrán o no, estar sincronizados. Esto podría causar dificultades cuando se trate de integrar e interpretar información sensada en diversos nodos.

### ***CALIDAD DE SERVICIO:***

La calidad del servicio puede interpretarse en las redes de sensores por enlace, por flujo de información o por funcionamiento de nodo. En estas redes, tanto la red como el host pueden tener situaciones que requieren de una buena coordinación.

La falta de coordinación central y de un límite de recursos puede desencadenar un problema. El nivel de servicio y sus parámetros están asociados al tipo de aplicación. La comunicación en tiempo real sobre una red de sensores deberá de ser garantizada a pesar de tener un máximo de retraso, un ancho de banda mínimo y otros parámetros involucrados en la calidad del servicio.

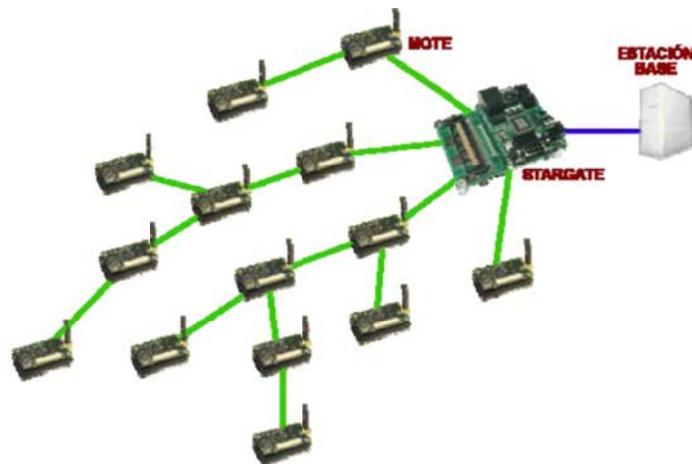
Las redes de sensores están formadas por un conjunto de pequeños dispositivos denominados nodos sensores, con capacidad limitada de computo y comunicación, cuyo tiempo de vida depende de una batería adjunta al dispositivo. El tiempo de vida de la red de sensores dependerá por tanto del tiempo de vida de la batería de sus nodos. Estos

dispositivos se encuentran dispersos de manera ad-hoc en una determinada área a monitorizar.

Típicamente, el modelo seguido por las aplicaciones es el siguiente: realizar una serie de mediciones sobre el medio, transformar dicha información en digital en el propio nodo y transmitirla fuera de la red de sensores vía un elemento Gateway a una estación base, donde la información pueda ser almacenada y tratada temporalmente para acabar finalmente en un servidor con mayor capacidad que permita componer un histórico o realizar análisis de datos.

En una red de sensores inalámbricos, por lo tanto, podemos encontrarlos:

- Nodos inalámbricos
- Puertas de enlace
- Estaciones base



## **2.7 ELEMENTOS PARA LA INTERCONEXIÓN DE REDES DE SENSORES**

### ***PUERTA DE ENLACE:***

Es el elemento para la interconexión entre la red de sensores y una red de datos (TCP/IP). Es un nodo especial sin elemento sensor, cuyo objetivo es actuar como puente entre dos redes de diferente tipo.

En este tipo de aplicaciones donde se usan redes de sensores, estas no pueden operar completamente aisladas y deben contar con alguna forma de monitoreo y acceso a la información adquirida por los nodos de la red de sensores. De aquí surge la necesidad de conectar las redes de sensores a infraestructuras de redes existentes tales como Internet, redes de área local (LAN) e intranets privadas. Los dispositivos que realizan la función de interconectar dos redes de diferente naturaleza se les llama dispositivo puerta de enlace; pero el término más conocido en el ambiente de las redes es Gateway.

### ***ESTACIÓN BASE:***

Recolector de datos basado en un ordenador común o sistema empotrado. En una estructura normal todos los datos van a parar a un equipo servidor dentro de una base de datos, desde donde los usuarios pueden acceder remotamente y poder observar y estudiar los datos.

### ***TOPOLOGÍAS:***

Hay varias arquitecturas que pueden ser usadas para implementar una aplicación de WSN como pueden ser estrella, malla o una híbrida entre ellas dos. Cada topología presenta desafíos, ventajas y desventajas.

Para entender las diferentes topologías es necesario conocer los diferentes componentes de la WSN.

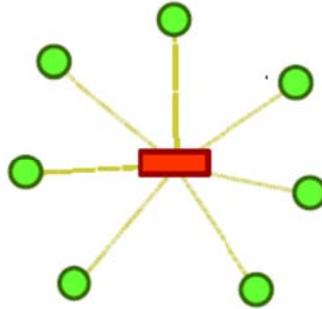
- Nodos finales: Compuesto por sensores y actuadores donde se capturan los datos sensores. Para las redes basadas en ZigBee son llamados RFD (Reduced Functional Devices).
- Routers: Dan cobertura a redes muy extensas pudiendo salvar obstáculos, problemas de congestión en la emisión de la información y posibles fallos en alguno de los aparatos.
- Puertas de enlace: Recoge los datos de la red, sirve como punto de unión con una red LAN o con Internet.



Topología se refiere a la configuración de los componentes hardware y como los datos son transmitidos a través de esa configuración. Cada topología es apropiada bajo ciertas circunstancias y puede ser inapropiada en otras. La idea de una red de sensores surge gracias a las posibilidades que nos da la tecnología.

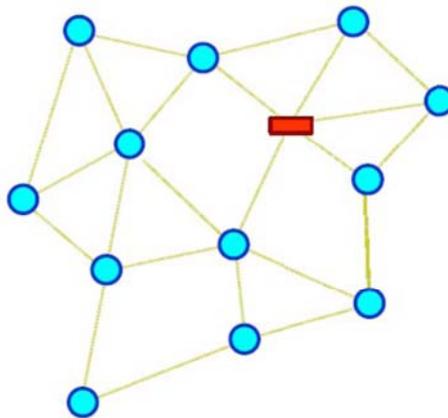
- **Topología en estrella (monosalto)** es un sistema donde la información enviada solo da un salto y donde todos los nodos sensores están en comunicación directa con la puerta de enlace, usualmente a una distancia de 30 a 100 metros.

Todos los nodos sensores son idénticos, nodos finales, y la puerta de enlace capta la información de todos ellos. La puerta de enlace también es usada para transmitir datos al exterior y permitir la monitorización de la red. Los nodos finales no intercambian información entre ellos, sino que usan la puerta de enlace para ello, si es necesario.



La topología en estrella es la que menor gasto de energía desarrolla, pero por el contrario esta limitada por la distancia de transmisión vía radio entre cada nodo y la puerta de enlace. Tampoco tiene un camino de comunicación alternativo en caso de que uno de los nodos tenga obstruido el camino de comunicación, lo que lleva a que en este caso la información de ese nodo sea perdida.

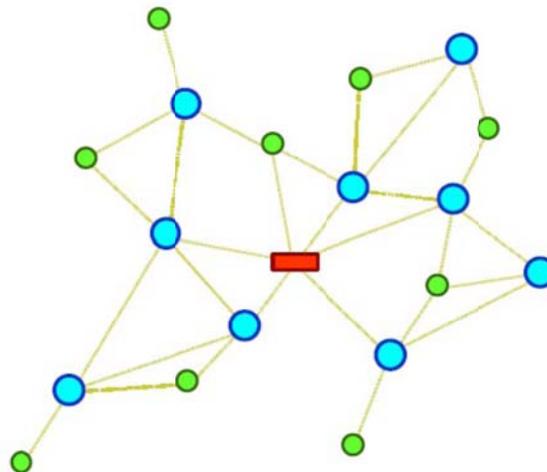
- **Topología en malla** es un sistema multisalto, donde todos los nodos son routers y son idénticos. Cada nodo puede enviar y recibir información de otro nodo y de la puerta de enlace. A diferencia de la topología en estrella, donde los nodos solo pueden hablar con la puerta de enlace, en esta los nodos pueden enviarse mensajes entre ellos.



La propagación de los datos a través de los nodos hacia la puerta de enlace hace posible, por lo menos en teoría, crear una red con una extensión posible ilimitada. Este tipo, también es altamente tolerante a fallos ya que cada nodo tiene diferentes caminos para comunicarse con la puerta de enlace. Si un nodo falla, la red se reconfigurara alrededor del nodo fallido automáticamente. Dependiendo del número de nodos y de la distancia entre ellos, la red puede experimentar periodos de espera elevados a la hora de mandar la información.

- **Topología híbrida estrella-malla** busca combinar las ventajas de los otros dos tipos, la simplicidad y el bajo consumo de una topología en estrella, así como la posibilidad de cubrir una gran extensión y de reorganizarse ante fallos de la topología en malla.

Este tipo crea una red en estrella alrededor de routers pertenecientes a una red en malla. Los routers dan la posibilidad de ampliar la red y de corregir fallos en estos nodos y los nodos finales se conectan con los routers cercanos ahorrando energía.



## **2.8 APLICACIONES**

El ámbito de aplicación de las redes de sensores es muy amplio y diverso, en particular cabe destacar las siguientes áreas de aplicación

### **2.8.1 MILITAR**

El apoyo militar fue el primer propósito por el cual empezó a investigarse esta área.

Tener conocimiento en tiempo real del campo de batalla es esencial para el control, las comunicaciones y la toma de decisiones. La red de sensores puede ser rápidamente desarrollada sin tener que realizar una infraestructura como puede suceder en otros casos como un radar, y pasar a recoger información inmediatamente.

### **2.8.2 MEDIO AMBIENTE**

Los sensores se emplean para el medio ambiente en el caso de incendios forestales, detección de inundaciones y exploración de animales en su hábitat natural.

### **2.8.3 SALUD**

En el ámbito de la salud, las redes de sensores pueden llevar a cabo acciones que monitoreen pacientes, diagnostiquen enfermedades, administren la medicina, monitoreen el movimiento de pacientes dentro del hospital y demás funciones.

### **2.8.4 ESTRUCTURAS**

En cuanto al monitoreo de estructuras, las redes de Sensores tiene un gran aplicación.

La tecnología denominada SHM (Structure Health Monitoring) trabaja con la identificación y monitoreo de fallos en estructuras como puentes, edificios y otras construcciones.

### **2.8.5 AUTOMOCIÓN**

Con las características de las WSN, los coches podrán pronto estar disponibles para hablar unos con otros y con infraestructuras dentro de carreteras y autopistas. Los sensores pueden aplicarse en las ruedas del vehículo para dar asistencia al conductor y avisar de posibles mensajes de alerta.

### **2.8.6 DOMÓTICA**

Su tamaño, economía y velocidad de despliegue, las hacen una tecnología ideal para automatizar tareas cotidianas en el hogar a un precio asequible.

### **2.8.7 AGRICULTURA**

La agricultura constituye una de las áreas donde se prevé que pueda implantarse con mayor rapidez este tipo de tecnología. Por ejemplo, las redes de sensores favorecen una reducción en el consumo de agua y pesticidas, contribuyendo a la preservación del entorno. Adicionalmente, pueden alertar sobre la llegada de heladas, así como ayudar en el trabajo de las cosechadoras. Gracias a los desarrollos que se han producido en las redes de sensores inalámbricos en los últimos años, especialmente la miniaturización de los dispositivos, han surgido nuevas tendencias en el sector agrícola como la llamada agricultura de precisión.

Esta disciplina cubre múltiples prácticas relativas a la gestión de cultivos y cosechas, arboles, flores y plantas, ganado, etc. Entre las aplicaciones más interesantes se encuentra el control de plagas y enfermedades.

Por medio de sensores estratégicamente situados, se pueden monitorizar parámetros tales como el clima, la temperatura o la humedad del ambiente o dentro de invernaderos, con el fin de detectar rápidamente situaciones adversas y desencadenar los tratamientos apropiados. La gran ventaja del uso de esta tecnología es la detección a tiempo y la aplicación óptima de las soluciones, únicamente en aquellas zonas donde resulta realmente necesario.

Basados en el análisis de diversos estudios y con lo mencionado anteriormente en el diseño de una red de sensores, en esta investigación se analizan las dos soluciones principales de tecnologías inalámbricas WIFI y ZIGBEE.

## 2.9 ESTÁNDAR IEEE 802.11 - WIFI

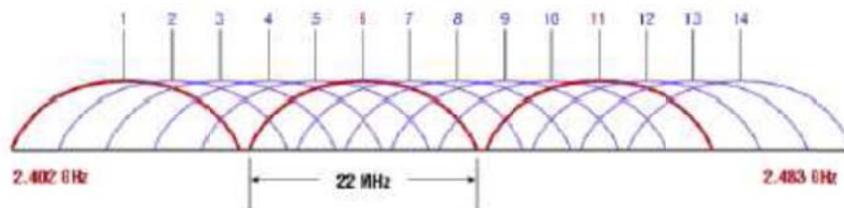
### 2.9.1 INTRODUCCIÓN

El estándar 802.11 o también llamado Wifi fue definido por el IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) en 1997 con el propósito de reemplazar la conexión alámbrica Ethernet. La primera extensión es 802.11a, opera en la banda de 5Ghz, menos congestionada y con menos interferencias y con un alcance limitado a 50m, con 12 canales de frecuencia separados. Como resultado, se disponen de 12 puntos de acceso para diferentes canales en la misma área sin interferencia.

El 802.11a, utiliza división de frecuencias ortogonales multiplexadas (OFDM), la cual divide una señal de datos a través de 48 portadoras separadas con un canal de 20 MHz para proveer transmisiones en rangos de 6, 9 12, 18, 24, 36, 48 o 54 Mbps.

La segunda extensión es 802.11b y es la base de la mayoría de LAN's inalámbricas que existen en la actualidad, opera en la banda de 2.4 Ghz y utiliza DSSS (Direct Sequense Spread Spectrum) con modulación CCK (Complementary Code Keying) para dispersar la señal de datos sobre una porción aproximadamente de 30 MHz. Los rangos de datos que soporta 802.11 b son 1, 2, 5.5 y 11 Mbps.

La Capa Física del estándar especifica el uso de modulación DSSS en la banda de 2.4 GHz, el ancho de banda de 83.5 MHz se dividió en 11 canales de 22 MHz, los cuales se solapan entre sí, existiendo solamente 3 canales independientes (canal 1, 6 y 11).



Los niveles de potencia permitidos varían de acuerdo a la región en que nos encontremos, en Estados Unidos de América la FCC permite niveles de hasta 36 dbm para la potencia efectiva radiada isotrópicamente (en inglés Effective Isotropic Radiated Power -EIRP-), en Europa el Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones (en inglés European Telecommunications Standards Institute -ETSI-) establece el nivel máximo para la EIRP en 20 dBm, mientras que para Ecuador la Comisión Nacional para las Telecomunicaciones (CONATEL) permite una EIRP máxima de 30 dBm.

La tercera extensión y de las más recientes es 802.11g, de forma similar que 802.11b opera en la banda de 2.4 GHz y las señales transmitidas utilizan aproximadamente 30 MHz, lo que es un tercio de la banda. Esto limita el número de puntos de acceso 802.11g no empalmados a tres, lo cual es lo mismo que 802.11b. El estándar 802.11g es compatible con el 802.11b, capaz de alcanzar una velocidad doble, decir 22Mbps/s o llegar incluso a 54 Mbps/s para competir con los otros estándares que prometen velocidades mucho más elevadas pero incompatibles con equipos 802.11b ya instalados, aunque pueden coexistir en el mismo entorno debido a que las bandas de frecuencias que emplean son distintas.

## **2.9.2 OBJETIVOS**

El estándar IEEE 802.11 define los protocolos de las capas del método de acceso al medio (Media Access Control MAC) mediante escucha pero sin detección de colisión (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) y la capa física (PHY) para una LAN con conectividad inalámbrica. El estándar WLAN define el establecimiento de una red de área local donde los dispositivos conectados se comunican a través de radiofrecuencias a otros dispositivos que estén muy próximos uno del otro, es decir se esta hablando de un estándar similar en la mayoría de los aspectos al de Ethernet 802.3.

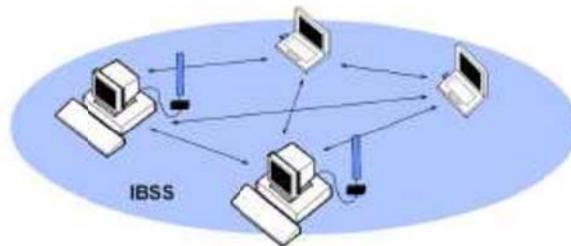
### 2.9.3 COMPONENTES DE UNA RED IEEE 802.11 a/b/g

### 2.9.4 TOPOLOGÍAS DE RED

El estándar contempla tres topologías de red básicas:

#### ***Independent Basic Service Sets (IBSS)***

Consiste en un grupo de estaciones que se comunican entre sí directamente sin necesidad de un AP, cada estación debe estar dentro del rango de señal de la otra para poder establecer la comunicación, estas redes no tienen dispositivos para su administración, por lo que una de las estaciones se encargará de realizar ésta tarea. La topología IBSS se usa frecuentemente para compartir datos en reuniones o conferencias, las mismas son equivalentes a las redes Ad-Hoc. En la figura se observa una red donde las terminales utilizan esta topología, la comunicación se realiza directamente de un equipo a otro.



#### ***Basic Service Sets (BSS)***

Se basa en un conjunto de estaciones que se comunican entre sí por medio de un AP, el cual se encarga de realizar las tareas de administración de la red.

En este tipo de topología cada terminal debe asociarse a la red, en este proceso el AP verifica si la terminal tiene permiso de unirse a la red y decide si la asocia o no. Una de las ventajas que presenta el uso de un AP, es que este puede percatarse de que la estación

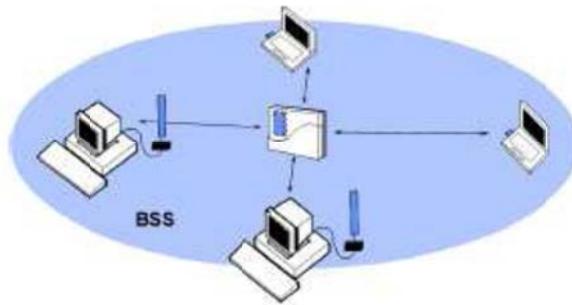
---

<sup>4</sup> <http://gsyc.es/~mortuno/rii/02-802.11.pdf>

ha entrado al modo de ahorro de energía (en inglés Power Save) y guardar los paquetes de dicho equipo en memoria hasta que el equipo se active nuevamente.

Cada red BSS tiene un Service Set ID (SSID) o nombre de red que la identifica, este permite diferenciar redes que se encuentran en una misma zona geográfica. El SSID es publicado por el AP y se muestra al usuario de la terminal móvil.

Las redes BSS son equivalentes a las redes de infraestructura, en la *figura* se aprecia como cada uno de los equipos pertenecientes a la red envía sus paquetes al AP.

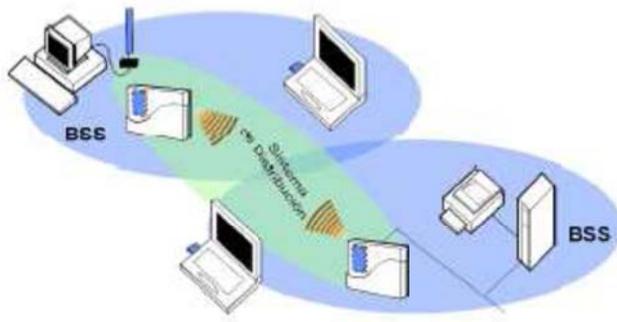


### ***Extended Service Set (ESS)***

Se trata de un grupo de redes BSS conectadas entre sí mediante un sistema de distribución (en inglés Distribution System DS), la conexión de las redes BSS se puede realizar por medios cableados o inalámbricos, de esta manera se logran cubrir áreas geográficas mayores a las obtenidas mediante redes BSS o IBSS. En este tipo de red se puede presentar solapamiento de señales de distintos AP (cada BSS debe poseer un AP), por lo que se debe seleccionar la frecuencia de operación de cada AP de tal manera de no interferir con las redes BSS adyacentes.

Las estaciones pueden desplazarse a través de toda la red ESS sin preocuparse por perder la conexión, ya que esta se comporta como una red única, gracias a que los AP se encargan de las tareas de administración necesarias para conectar la terminal móvil al AP

de la celda a la cual se esta mudando. En la *figura* se puede ver como el área de cobertura de la red aumenta gracias al uso de dos AP.



### 2.9.5 ARQUITECTURA DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11

A continuación se revisa la arquitectura de la capa de nivel físico, se describe el funcionamiento de la capa de convergencia, fundamentalmente resaltando el proceso de transmisión y recepción de las técnicas de modulación utilizadas por 802.11 y 802.11b.

La capa física proporciona una serie de servicios a la capa MAC o capa de acceso al medio. Diferentes tecnologías de capa física se definen para transmitir por medio inalámbrico.

#### Capa Física o PHY

La Capa Física establece las especificaciones que permiten transformar los paquetes de datos provenientes de la Capa MAC en señales eléctricas analógicas apropiadas para ser transmitidas al medio, que en este caso es el aire. También debe realizar el proceso inverso cuando se recibe información, es decir, captar señales presentes en el aire y transformarlas en paquetes de datos binarios que serán entregados a la Capa MAC.

La capa física de servicios consiste en dos protocolos:

- *Una función de convergencia de capa física*, que adapta las capacidades del sistema físico dependiente del medio (PMD). Esta función es implementada por el protocolo PLCP2, que define una forma de mapear MPDUs3, en un formato de tramas susceptibles de ser transmitidas y recibidas entre diferentes estaciones a través de la capa PMD.
- *Un sistema PMD*, cuya función define las características y un medio de transmitir y recibir a través de un medio sin cables entre dos o más estaciones.

La comunicación entre MAC's de diferentes estaciones se realizará a través de la capa física de una serie de puntos de acceso al servicio, donde la capa MAC invocará las primitivas de servicio. Además de estas capas, se puede distinguir la capa física de gestión. En esta capa podemos distinguir la estructura MIB (Base de datos de la información de gestión), que contienen las variables de gestión, los atributos, las acciones y las notificaciones requeridas para administrar una estación.

La modulación de una señal se realiza en dos etapas, una en banda base y la otra en pasa banda. En la primera se realiza la codificación de línea, la cual consiste en tomar los PDU y convertirlos en formas de onda binarias utilizando algún tipo de código de línea (Manchester, NRZ, Bipolar etc.), el espectro de la señal resultante se encuentra contenido en frecuencias muy bajas, alrededor de 0 Hz.

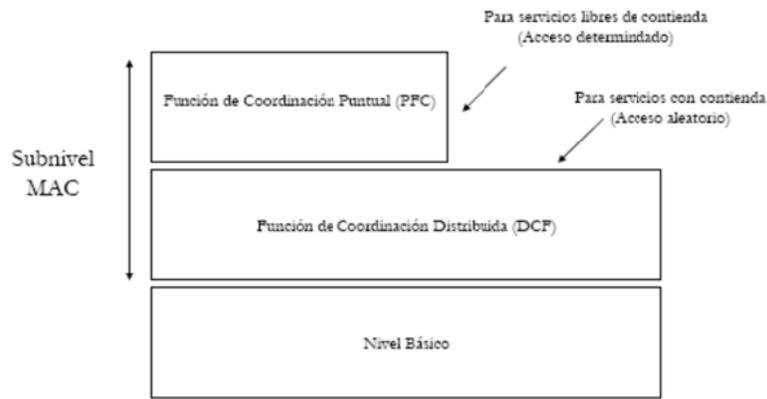
En la segunda etapa se lleva a cabo la modulación pasa banda, ésta consiste en mapear la forma de onda binaria en una portadora de alta frecuencia, con esto se logra elevar la frecuencia de la señal resultante para así poder transmitirla haciendo uso de antenas de tamaños físicamente realizables.

## Nivel de Acceso al Medio (Media Access Control MAC)

Los métodos de acceso IEEE 802 están diseñados según el modelo OSI y se encuentran ubicados en el nivel físico y en la parte inferior del nivel de enlace o subnivel MAC.

La arquitectura MAC del estándar 802.11 se compone de dos funcionalidades:

- La función de coordinación distribuida (DCF)
- La función de coordinación Puntual (PCF)



5

## Función de Coordinación Distribuida (DCF)

Se define como Función de coordinación distribuida (Distributed Coordination Function) como la funcionalidad que determina, dentro de un conjunto básico de servicios (BSS), cuando una estación puede transmitir y/o recibir unidades de datos de protocolo a nivel MAC a través del medio inalámbrico.

En el nivel inferior del subnivel MAC se encuentra la función de coordinación distribuida y su funcionamiento se basa en técnicas de acceso aleatorias de contienda por el medio.

El tráfico que se transmite es asíncrono ya que estas técnicas de contienda introducen retardos aleatorios y no predecibles ni tolerados por servicios síncronos.

<sup>5</sup> <http://es.wikitel.info/wiki/WiFi>

## **2.10 ESTÁNDAR IEEE 802.15.4 - ZIGBEE**

### **2.10.1 INTRODUCCIÓN**

Una red inalámbrica de área personal con baja tasa de transmisión - llamada LRWPAN (Low Rate -Wireless Personal Área Network) - es una red de comunicación simple que permite conectividad inalámbrica de aplicaciones con restricciones de energía y un ancho de banda relajado. El Grupo de Trabajo de Redes Inalámbricas de Área Personal IEEE 802.15.4, ha trabajado arduamente en la estandarización de las LP-WPAN.

De hecho se ha establecido como el estándar de facto para las redes inalámbricas de sensores. La mayoría de los Motes disponibles en el mercado incorporan este estándar como mecanismo de comunicación.

### **2.10.2 OBJETIVOS**

Una LR-WPAN busca ser una red de fácil instalación que proporcione transferencia confiable de datos, muy bajo costo, razonable tiempo de vida de las baterías y corto rango de operación, mientras mantiene un protocolo simplificado y flexible.

Las principales metas del estándar son:

- **Muy Bajo consumo de potencia:** En prácticamente cualquier dispositivo inalámbrico, el radio o componente de transmisión y recepción, es lo que más energía consume, incluso por encima del CPU y cualquier otro estado de activación de la tarjeta. Estos dispositivos conocidos como motes tienen grandes limitaciones de consumo eléctrico, al tener que operar en exteriores con una pequeña batería por periodos de meses o años.
- **Muy Bajo costo de implementación:** El costo final de los componentes que implementen una LP-WPAN debe ser muy pequeño, ya que por el tipo de aplicaciones al que se espera que apliquen, estas redes deben estar compuestas

de numerosos dispositivos, tan baratos que incluso lleguen a ser considerados como desechables.

### **2.10.3 COMPONENTES DE UNA RED IEEE 802.15.4**

Dos tipos de dispositivos pueden participar en una red IEEE 802.15.4:

Un dispositivo que dispone todas las funcionalidades llamado FFD (Full-Function Device) y un dispositivo de funciones reducidas llamado RFD (Reduced-Function Device).

El primero puede operar en la red en tres modos distintos, como coordinador de la red (PAN), coordinador o dispositivo. Un FFD puede hablar con RFD o con otros FFD, mientras que un RFD solo puede hablar con un FFD. Los RFD son interesantes en aplicaciones extremadamente simples, como un interruptor de luz o un sensor infrarrojo pasivo que no necesitan enviar grandes cantidades de datos y se asocian con un solo FFD a la vez.

Un sistema de acuerdo a este estándar requiere de por lo menos dos dispositivos donde uno de ellos debe ser FFD para que opere como coordinador PAN.

### **2.10.4 TOPOLOGÍAS DE RED**

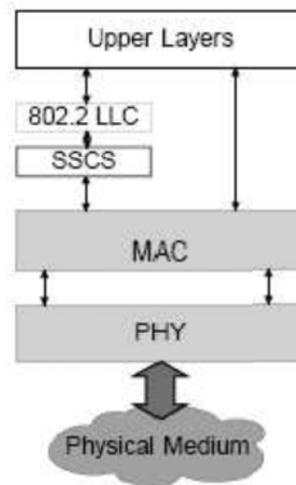
Dependiendo de los requerimientos de la aplicación, una LR-WPAN puede operar utilizando una topología estrella o una topología punto a punto. En la topología estrella, la comunicación es establecida entre los dispositivos y un controlador central llamado coordinador PAN. En ambas topologías los nodos utilizan una dirección única de 64 bits. Sin embargo, una vez que el dispositivo se asocia puede negociar con el coordinador PAN una dirección corta de 16 bits.

La topología punto a punto también tiene un coordinador PAN, sin embargo, cualquier dispositivo puede comunicarse con otro siempre que este a su alcance. Esta topología permite implementar formaciones de red mucho más complejas. Utilizando múltiples saltos es posible que exista comunicación entre cualquier par de dispositivos de la red aun cuando no exista alcance de radio directo entre ellos.

#### 2.10.5 ARQUITECTURA DEL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4

Para simplificar el estándar se ha definido en capas (ver Figura 15) de forma similar a la estructura del modelo OSI (Open Systems Interconnection) donde cada capa es responsable de una parte del estándar y ofrece servicios a las capas superiores.

Un dispositivo LR-WPAN está compuesto por una capa física (PHY) que controla a bajo nivel la transmisión de radio frecuencia (RF) y una capa MAC que provee acceso al canal físico para todos los tipos de transferencia.



Existe una propuesta adicional al estándar realizada por ZigBee Alliance, organización conformada por un grupo de empresas, en la cual incorporan una especificación para las capas de red (NWK) y de aplicación (APL) basadas en el estándar IEEE-802.15.4 y que

solo esta disponible para sus miembros. Su objetivo es ofrecer soluciones interoperables en el área de las redes de sensores.

**Capa Física (PHY)** La especificación IEEE802.15.4 indica que esta capa debe cumplir con las siguientes funciones:

- Activación y desactivación de nodos.
- Detección de energía
- Indicador de calidad del enlace
- Detección de actividad del canal
- Recepción y Transmisión de datos

Ofrece la capacidad de operar en tres bandas de frecuencias libres, no sujetas a las regulaciones y reservación explícita de los canales:

- 868 MHz (banda libre Europea), lo que permite un canal de 20 Kbps.
- 902-928MHz que por ser más ancha (26 MHz) permite 10 canales de 40 Kbps.
- 2.4-2.48 GHz con la posibilidad de ofrecer 16 canales de 250 Kbps.

Las distancias posibles pueden llegar hasta 300 metros pero, por el bien conocido fenómeno de aumento exponencial de la potencia con respecto a la distancia, el consumo de energía sería enorme. Así que, mientras más corta sea la distancia entre los dispositivos, menor será el consumo de energía, en las transmisiones de información.

En la banda de 2.4 GHz se modula el canal con O-QPSK, el cual define una constelación de 4 fases (45, 135, 225 y 315 grados) por lo que se transmite en el enlace de última milla a dos bits por baudio. La banda de 868MHz se modula con BPSK. En ambos casos

transforma los bits que circulan por el canal en chips o secuencias de 0 y 1. Los chips son definidos pseudo-aleatoriamente de mutuo acuerdo entre el emisor y el receptor.

En términos sencillos, el emisor multiplica la señal recibida por el chip, envía la señal, y luego el receptor extrae de la portadora el mismo chip y al hacerlo, puede recuperar la información codificada, descartando al resto de las señales presentes en el canal.

**Capa de Acceso al Medio (MAC)** Esta capa, también definida en IEEE802.15.4, asegura el control de las conexiones punto a punto entre nodos para brindar confiabilidad a la transferencia de datos. Las funciones que debe realizar son:

- Transmisión de la trama de sondeo o baliza
- Sincronización de la trama baliza dentro de la supertrama
- Asociación y des-asociación de nodos
- CDMA/CA a dos vías (sin CTS ni RTS)
- Transmisión en periodos de contención (CAP) y garantizado (GTS)

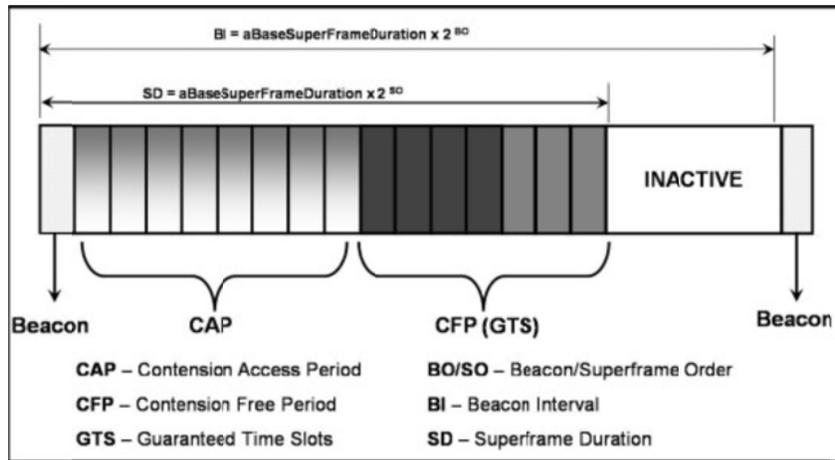
<sup>6</sup>Mediante el uso de una supertrama que es enviada por el coordinador, es posible lograr multiplexar la comunicación de todos los tipos de nodos presentes en la red. Esta funciona por multiplicación de tiempo, con 16 ranuras del mismo tamaño, para que los nodos coloquen sus datos en el medio de la transmisión.

Durante el periodo de bloqueo o inactividad todos los nodos, hasta el coordinador, duermen para ahorrar energía. Estos intervalos pueden ir desde 15 mseg. hasta 4 min.

La supertrama esta dividida en 4 periodos de tiempo como se puede observar en la figura 16.

---

<sup>6</sup> <http://ldc.usb.ve/~wpereira/PDF/ZigBeeJornadasTelecom.pdf>



# CAPÍTULO III

## MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se enmarca dentro de un estudio **Cuasi-Experimental** en los cuales los sujetos o grupos de sujetos de estudio no están asignados aleatoriamente, es decir, los valores a ser enviados en el ambiente de pruebas no serán tomados al azar, sino que se los tendrá definidos antes de realizar dicho ambiente por el investigador.

Además se manipula la variable independiente y su correspondiente efecto en la variable dependiente. Su validez se conseguirá a medida que se demuestre la optimización de las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero, escogiendo la tecnología adecuada luego de ejecutado el análisis comparativo. Por lo que se han realizado las siguientes consideraciones:

- Se plantea la investigación en base a la optimización de las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero.
- Se trazan los objetivos de la investigación que permitirán optimizar las comunicaciones inalámbricas.
- Se justifican los motivos por los cuales se propone realizar la siguiente investigación.
- Se elabora un marco teórico que ayude a forjar una idea general para la realización del trabajo de tesis, y así tener un horizonte más amplio.

- Se plantea una hipótesis la cual es una posible respuesta al problema planteado y posee una íntima relación entre el problema y el objetivo.
- Se propone la operacionalización de las variables en base a la hipótesis planteada.
- Se realiza la recolección de datos, y se observa el comportamiento del ambiente de pruebas en la optimización de las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero.
- Se realiza la prueba de la hipótesis con los resultados obtenidos.
- Se elabora las conclusiones y recomendaciones, producto de la investigación realizada.

### **3.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

Por la naturaleza de la investigación se considera que el tipo de estudio que se va a realizar es una **investigación descriptiva y aplicada** ya que se utilizará el conocimiento para realizar un estudio comparativo de tecnologías inalámbricas wifi y zigbee, de tal modo de encontrar la mejor tecnología para ser aplicada en redes de sensores inalámbricos para el control de temperatura de un invernadero.

### **3.3 TÉCNICAS**

En este estudio utilizaremos las siguientes técnicas:

- Observación.
- Recolección de Información
- Comparación
- Análisis.
- Pruebas

### 3.4 MÉTODOS

Para este proyecto se utilizarán los siguientes métodos de investigación.

**Método Científico:** Servirá para recopilar la información necesaria para encontrar la tecnología adecuada a ser aplicada en el ambiente de pruebas a ser construido, ya que las ideas, conceptos, y teorías expuestas en este anteproyecto de tesis son verificables como válidos.

**Método Deductivo:** Debido que al estudiar en forma general las tecnologías inalámbricas WIFI y ZIGBEE se tratará de encontrar la tecnología que contenga las mejores características para la optimización de las comunicaciones inalámbricas

### 3.5 FUENTES DE INFORMACIÓN

Revisión de información de fuentes bibliográficas como:

- Textos
- Revistas
- Documentos
- RFC's
- Estándares
- Otros

### 3.6 RECURSOS

#### 3.6.1 Recursos Humanos

Dentro de la parte humana intervienen:

- Ejecutor de la Tesis.
- El Tutor
- Miembros
- Proveedores de Equipos

### 3.6.2 Recursos Materiales

- Hojas de Papel Bond
- CD's
- Flash Memory
- Bibliografía
- Libros
- Internet (meses)

### 3.6.3 Recursos Técnicos

#### Hardware

Tabla 1. Recursos Hardware

RECURSO	CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
<b>Laptop</b>	CPU: HP Pavilion dv4-1413la Memoria: 3 GB Disco Duro: 300 GB DVDROM, Puertos usb2.0	Destinado a la auditoria, scaneo y sniffing de los protocolos
<b>Tarjeta Inalámbrica USB</b>	Alfa Network AWUS036H Chipset reltec8187 Soporte modo monitor	Tarjeta que usa herramientas inalámbricas bajo Linux compatible IEEE 802.11b/g
<b>Aginova Sentinel Sensors</b>	WIFI Temperature Sensor Tecnología: 802.11b Frecuencia: 2.4 GB Battery Powered	Sensores inalámbricos que funcionan con el protocolo IEEE 802.11b
<b>Access Point</b>	WIFI Access point Estándar 802.11b	Dispositivo inalámbrico que funciona como Access Point en los ambientes de prueba
<b>Crossbow Sensors</b>	ZIGBEE Temperature Sensor Tecnología: 802.15.4 Frecuencia: 2.4 GB Battery Powered	Sensores inalámbricos que funcionan el protocolo IEEE 802.15.4.
<b>Crossbow Gateway</b>	Nodo Central Gateway Estándar 802.15.4	Dispositivo inalámbrico que funciona como Access Point en los ambientes de prueba

## **Software**

- Windows XP SP3
- MoteView
- MoteWorks 2.0F Xsniffer
- Aginova
- Sensor Gold Desktop
- Software editor de textos
- VMware con Live cds: Backtrack, wifislax, wifiway,
- Herramientas Wireless (auditoria, scaneo, etc)

## **Otros**

- Bibliografía
- Internet

### **3.7 PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS**

“El análisis de las tecnologías wifi y zigbee permitirá la optimización de las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero”

#### **Variable Independiente:**

- ✓ Análisis de tecnologías WIFI y ZIGBEE.

#### **Variable Dependiente:**

- ✓ Optimización de las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero

### 3.8 OPERACIONALIZACIÓN CONCEPTUAL DE LAS VARIABLES

Tabla 2. Operacionalización Conceptual de las Variables

VARIABLE	TIPO	DEFINICIÓN
Análisis de tecnologías WIFI y ZIGBEE	Independiente	Especificación que define la mejor solución para comunicaciones inalámbricas
Optimización de las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura en un invernadero	Dependiente	Seleccionar la mejor tecnología que se adecue al control de temperatura en un invernadero

### 3.9 OPERACIONALIZACIÓN METODOLÓGICA DE VARIABLES

### 3.9.1 Operacionalización metodológica de la variable independiente

Tabla 3. Operacionalización Metodológica de la Variable Independiente

HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	ÍNDICES	TÉCNICAS	INSTRUMENTO
El análisis de las tecnologías WIFI y ZIGBEE, permitirá optimizar las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura en un invernadero.	<b>INDEPENDIENTE</b>  Análisis de tecnologías WIFI y ZIGBEE	<b>TOPOLOGÍA</b>	1.1 Punto a Punto	Observación	Criterio de expertos  Tablas de comparación  Datos del fabricante
			1.2 Punto Multipunto	Comparación	
			1.3 Malla	Análisis	
		<b>TASA DE TRANFERENCIA</b>	2.1 Entre 0 y 1 Mbps	Observación	
			2.2 Mayor a 1 Mbps	Comparación	
		<b>FRECUENCIA</b>	3.1 Entre 0 y 1 Gbps	Observación	
			3.2 Entre 1 y 2.4 Gbps	Comparación	
<b>COBERTURA</b>	4.1 Entre 0 y 30 m	Observación			
	4.2 Entre 30 y 100 m	Recopilación de Información			
<b>TAMAÑO DE LA RED</b>	5.1 Entre 1 y 32 nodos	Recopilación de Información			
	5.2 Entre 32 y 65 000 nodos				
<b>DURACIÓN BATERÍA</b>	6.1 Entre 0 y 1 año	Observación			
	6.2 Más de un año	Recopilación de Información			
<b>SEGURIDAD</b>	7.1 Datos Encriptados	Observación			
	7.2 Soporte de Trasmisiones seguras	Comparación			

### 3.9.2 Operacionalización metodológica de la variable dependiente

Tabla 4. Operacionalización Metodológica de la Variable Dependiente

HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	ÍNDICES	TÉCNICAS	INSTRUMENTO
El análisis de las tecnologías WIFI y ZIGBEE, permitirá optimizar las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura en un invernadero.	<b>DEPENDIENTE</b>  Optimización de las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero	<b>DISTANCIA DE NODOS</b>	1. Paquetes Recibidos 2. Paquetes Perdidos	Observación Pruebas Análisis	Ambiente de pruebas implementado  Ecuaciones  Software de sensores inalámbricos  Aginova Sensor Desktop  MoteView  Wireshark  Aircap
		<b>DISPONIBILIDAD DE SERVICIO</b>	1. Potencia de la Señal	Observación Pruebas Análisis	
		<b>CONEXIÓN DE NODOS</b>	1. Existe Conexión	Observación Pruebas Análisis	
		<b>TRANSMISIÓN DE PAQUETES SEGÚN VOLTAJE</b>	1. Paquetes Recibidos 2. Paquetes Perdidos	Observación Pruebas Análisis	
		<b>CONSUMO BATERÍAS</b>	1. Transmisión 100%	Observación Pruebas Análisis	

### **3.10 POBLACIÓN Y MUESTRA**

La población es el conjunto de todos los elementos a ser evaluados, en la presente investigación tenemos, las tecnologías inalámbricas irda, nanonet, insteon, knx, bluetooth y zigbee, dentro de las redes WPAN (wireless personal área network), wifi para redes WLAN (wireless local área network), wimax para redes WMAN (wireless metropolitan área network) y la telefonía celular de largo alcance GPRS, son parte de las tecnologías de redes inalámbricas.

Dado que el motivo de nuestra investigación son las redes de sensores inalámbricos orientados al control de temperatura de un invernadero tenemos a fabricantes como Microsoft, Intel, IBM, Motorola y Texas Instruments, que han lanzado líneas de investigación sobre WSN, existiendo en el mercado internacional mayormente productos con tecnologías wifi y zigbee, los mismos que dependiendo del fabricante presentan soluciones empresariales de costos elevados para su adquisición.

Basados en los fabricantes de sensores inalámbricos se selecciona como muestra las tecnologías WIFI y ZIGBEE, que son convenientes y apropiadas para esta investigación; ya que pertenecen al conjunto de redes inalámbricas, trabajan en la banda de 2.4 GHz y poseen parámetros sobre los cuales se puede trabajar y desarrollar su respectiva comparación. Se realizó la importación de estas tecnologías a menor costo con los fabricantes: Aginova Sentinel Sensors con sensores wifi y Crossbow con sensores zigbee.

### **3.11 INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

#### **INSTRUMENTOS**

Los instrumentos utilizados para recolección de datos y demostración de la variable dependiente son:

- Software de Sensores Inalámbricos
  - Aginova Sensor Desktop
  - MoteView / MoteWorks 2.0F
- Wireshark
- Backtrack
- Ecuaciones

### **VALIDACIÓN DE INSTRUMENTOS**

La validez de los instrumentos depende del grado en que se mide el dominio específico de las variables que intervienen en la investigación. De tal forma que en nuestra investigación la validez de los instrumentos viene dado por el uso de software propietario de cada fabricante, ya que el mismo viene diseñado para el desarrollo de aplicaciones utilizando sensores inalámbricos, es así que usaremos para los sensores zigbee, el software MoteView / MoteWorks 2.0F, para los sensores wifi, el software Aginova Sensor Desktop y adicionalmente ocuparemos software descargado de internet (Wireshark y Backtrack), los cuales se aplican a wifi.

### **AMBIENTE DE PRUEBAS**

En nuestro país en los últimos años se ha desarrollado una agricultura basada en la utilización de invernaderos, los cuales proveen a los agricultores muchas ventajas para mantener sus cosechas, como: el tener control sobre el cultivo ya que se encuentra protegido de la intervención de factores externos (frío, sol, lluvia, vientos, heladas, etc), esto permite manipular el comportamiento del crecimiento del cultivo variando factores

como la temperatura, humedad, luz, presión, etc., los mismos que permitirán determinar el ambiente climático óptimo para realizar una correcta producción.

Los invernaderos son estructuras con cubierta de plástico o vidrio, que sirven para realizar cultivos a temperaturas superiores a las presentes en el exterior del invernadero, aprovechan el efecto producido por la radiación solar, que al atravesar un vidrio u otro material translúcido calienta los objetos que hay detrás.

Los invernaderos ofrecen las siguientes ventajas:

- Producción en menor tiempo y en cualquier época del año
- Aumenta la calidad y cantidad de producción
- Facilita el uso de fertilizantes y el control de plagas, insectos, etc.

Entre las desventajas:

- Requiere de una alta inversión inicial
- Costos de operación altos (mantenimiento y cuidado por personal capacitado).

La eficiencia en los invernaderos se entiende como la idoneidad para acondicionar algunos elementos como por ejemplo el clima, no de una manera estática o incontrolable sino más bien estableciendo límites de acuerdo al cultivo a desarrollarse en el mismo y la funcionalidad es el conjunto de requisitos que permiten la mejor utilización del invernadero enfocado como un sistema productivo.

Esta eficiencia y funcionalidad se reflejan en la automatización de invernaderos con tecnología de sensores. Tecnológicamente hablamos de incluir dispositivos que optimicen el desarrollo del cultivo determinando cuando es necesario realizar alguna tarea o interactuar con otros dispositivos.

Para una eficiencia en la automatización se requiere:

- Que las necesidades del mantenimiento del sistema sean reducidas, permitiendo que la interacción del sistema con el operador sea mínima.

- El sistema debe ser confiable y seguro, lo que implica planes de contingencia ante fallas, sabotajes y ataques a nivel lógico.
- Un sistema adaptable y escalable para realizar cambios y correctivos en el momento requerido.
- El sistema debe ser accesible, es decir, poder acceder a su tecnología en nuestro medio y sin que represente demasiada inversión.

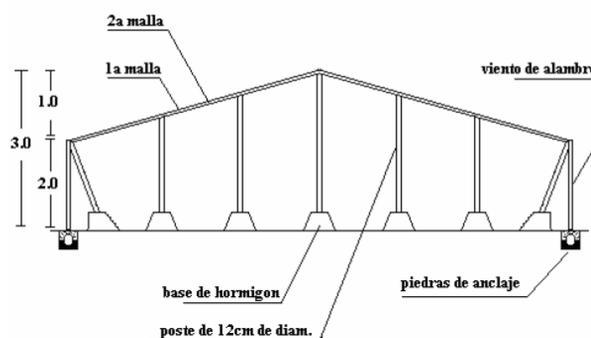
Las características deseables en la solución a ofrecer se pueden cubrir usando la tecnología de las redes de sensores inalámbricos aplicada a la optimización del control de temperatura de los invernaderos, que es la razón de la presente investigación y la cual busca ofrecer una alternativa eficiente y más económica por el hecho de utilizar una red de sensores inalámbricos que presentan mucha facilidad en el uso del sistema y de bajo costo.

### Tipos de Invernaderos

Invernaderos de acuerdo a su conformación estructural y su utilización en nuestro país:

#### ***Invernaderos planos o tipo Parral:***

Este tipo de invernaderos se utiliza por lo general en zonas poco lluviosas y esta constituido por una estructura horizontal y vertical.



**Figura 17 Invernadero tipo Parral**

Entre las ventajas tenemos:

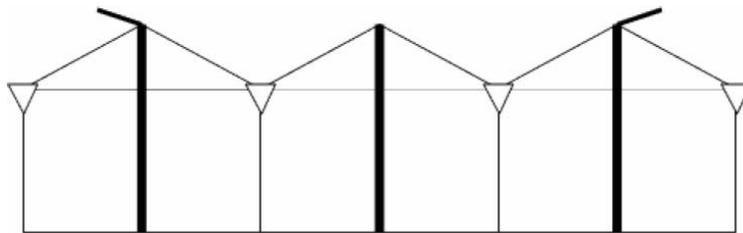
Gran uniformidad luminosa, mayor resistencia al viento, economía de construcción, adaptabilidad a la geometría del terreno y aprovecha el agua lluvia en períodos secos.

Entre las desventajas tenemos:

Poco volumen de aire, la instalación de ventanas cenitales es complicada, nada aconsejable en lugares lluviosos, rápido envejecimiento de la instalación, peligro de destrucción del plástico, peligro de hundimiento por las bolsas de agua de lluvia que se forman en la lámina de plástico.

### ***Invernaderos en raspa y amagado***

Similar al de tipo parral, pero varía en la forma de su cubierta, en la que aumenta la altura máxima del invernadero en la cumbre, formando la raspa. En la parte mas baja se le conoce como amagado, porque se unen las mallas de la cubierta al suelo mediante vientos y horquillas de hierro que permiten colocar canalones para el desagüe de las aguas lluvia, se recomienda su construcción de este-oeste.



**Figura 18 Invernadero tipo Raspa y Amagado**

Entre sus ventajas tenemos:

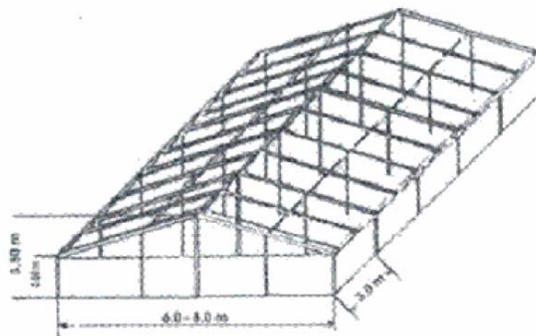
Mayor superficie libre de obstáculos, buena estanqueidad a la lluvia y al aire, disminuyendo la humedad interior en períodos pluviosos, son económicos, permiten la instalación de ventilación cenital, tienen mayor volumen unitario y por tanto mayor inercia térmica que aumenta la temperatura nocturna.

Entre sus desventajas tenemos:

No aprovecha las aguas de lluvia, diferencias de luminosidad en los sectores norte y sur del invernadero, se complica el cambio de plástico de la cubierta, aumentan las pérdidas de calor a través de cubierta por tener mayor superficie desarrollada.

### ***Invernaderos de Capilla***

Tienen su techo formado por una o dos inclinaciones, según sean a una o a dos aguas.



**Figura 19 Invernadero tipo Capilla**

Ventajas.

Fácil colocación del plástico en la cubierta, ventilación por ventanas frontales, laterales y cenitales, fácil construcción y conservación, facilidad de evacuar aguas pluviales y permite la unión de varias naves.

Los cultivos en sus diferentes etapas de desarrollo están condicionados por factores ambientales: CO<sub>2</sub>, luz, humedad relativa y temperatura, el invernadero debe conservar estas variables dentro rangos para mantener el metabolismo del cultivo.

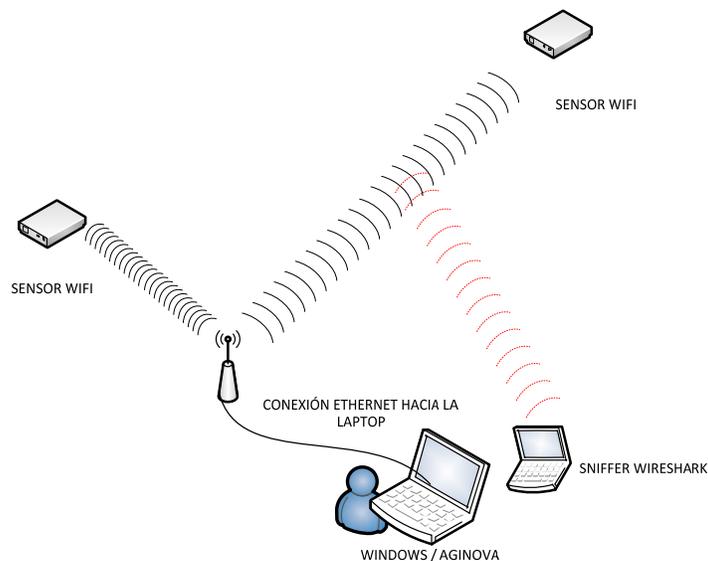
**El invernadero tipo capilla utilizado para la investigación tiene una superficie aproximada de 150 m<sup>2</sup>, los mismos que los podemos encontrar como parte de una nueva tendencia de producción en el país, los invernaderos orgánicos que tienen una pequeña producción y no disponen de recursos para montar una gran**

**infraestructura de control y monitoreo. Para su análisis se van a utilizar 3 rangos de cobertura los cuales van de 1 – 10 m, 11 – 20 m y de 21 – 30m, que van acorde a las medidas de nuestro invernadero.**

De acuerdo a la naturaleza de la investigación, los instrumentos más idóneos para la recolección de los datos fueron los estándares y documentos técnicos (RFC's y publicaciones de la NIST), con esto se pudo establecer los parámetros de comparación para realizar el análisis de las tecnologías wifi y zigbee que ayudará a la optimización de las comunicaciones inalámbricas en el control de temperatura de invernadero, mediante herramientas de software inalámbricas; de acuerdo a los procedimientos generales establecidos se ha determinado la utilización de un invernadero con un ordenador portátil con software o herramientas wireless para la captura y recolección de datos de los sensores y luego el análisis de los mismos con el uso de sniffers.

Los dos ambientes de pruebas se detallan a continuación:

### **Ambiente de Prueba 1: Prototipo Implementado Con WIFI**



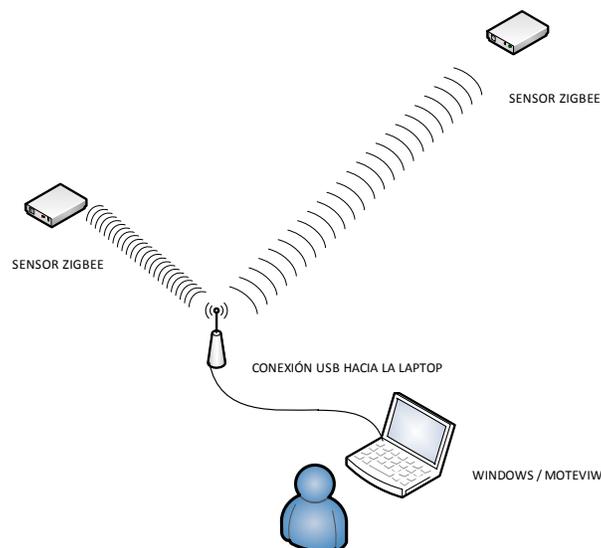
**Figura 20 Diagrama Lógico Prototipo WIFI**

La instalación de este prototipo se detalla en el **Anexo 3**.

Este prototipo es implementado utilizando los siguientes elementos:

- **2 Sensores de Temperatura Inalámbricos (Aginova Sentinel Sensors)** los nodos sensores con tecnología wifi, se encargan de tomar los datos de temperatura del ambiente y encaminar estos datos hacia el Wifi Access Point.
- **Wifi Access Point NETIS.** Es la interfaz entre los nodos sensores inalámbricos y la Laptop PC.
- **Wifi Sensors Gold Desktop.** Es el software de almacenamiento, visualización y control de datos tomados por los sensores.

### Ambiente de Prueba 2: Prototipo Implementado Con ZIGBEE



**Figura 21 Diagrama Lógico Prototipo ZIGBEE**

La instalación de este prototipo se detalla en el **Anexo 4**.

Este prototipo es implementado utilizando los siguientes elementos:

- **2 Sensores de Temperatura Inalámbricos (Crossbow Sensors)** los nodos sensores con tecnología zigbee, se encargan de tomar los datos de temperatura del ambiente y encaminar estos datos hacia el nodo maestro o Gateway.
- **Nodo Maestro Gateway.** Es la interfaz entre los nodos sensores inalámbricos y la Laptop PC.
- **MoteView.** Es el software de visualización y control de datos tomados por los sensores.
- **MoteWorks 2.0F.** Es el software maestro que permite la manipulación de los parámetros de funcionamiento de la red inalámbrica de sensores.
- **Postgre SQL 8.0 Database.** Es la base de datos que se encarga de almacenar los datos.
- **Postgre SQL ODBC Driver.**

# CAPÍTULO IV

## ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Una vez que se ha efectuado un análisis de los aspectos más relevantes de las tecnologías wifi y zigbee, y se ha definido la metodología a seguir para esta investigación, el propósito de este capítulo es realizar una evaluación de las soluciones software más adecuadas en el uso de las tecnologías wifi y zigbee, para posteriormente comprobar si la implementación de una solución optimiza las comunicaciones inalámbricas en el control de temperatura de un invernadero, que es la hipótesis planteada dentro de este estudio. El análisis de estos resultados estará apoyado en las pruebas realizadas utilizando la implementación de los prototipos que fueron descritos anteriormente, dentro de un invernadero de rosas, el cual necesita de las siguientes características:

Para la mayoría de los cultivos de rosa, las temperaturas óptimas de crecimiento son de 17°C a 25°C, con una mínima de 15°C durante la noche y una máxima de 28°C durante el día. Pueden mantenerse valores ligeramente inferiores o superiores durante períodos relativamente cortos sin que se produzcan serios daños, pero una temperatura nocturna continuamente por debajo de 15°C retrasa el crecimiento de la planta, produce flores con gran número de pétalos y deformes, en el caso de que abran. Temperaturas excesivamente elevadas también dañan la producción, apareciendo flores más pequeñas de lo normal, con escasos pétalos y de color más cálido<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> <http://www.infoagro.com/flores/flores/rosas.htm>

El índice de crecimiento para la mayoría de los cultivos de rosa sigue la curva total de luz a lo largo del año. Así, en los meses de verano, cuando prevalecen elevadas intensidades luminosas y larga duración del día, la producción de flores es más alta que durante los meses de invierno, tomando en cuenta que los niveles de humedad deben estar entre el 50 al 70%.

Para mantener una temperatura agradable dentro del invernadero puede que tengamos que bajar la intensidad de la iluminación. De hecho, los problemas de sobrecalentamiento son más comunes que los de un calentamiento deficiente.



**Figura 23 Invernadero de pruebas**

#### **4.1 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE COMPARACIÓN**

Para realizar el estudio comparativo de tecnologías inalámbricas WPAN, se tomó en consideración ciertos parámetros, que nos permitirán evaluar las cualidades o falencias de cada una de las tecnologías WIFI y ZIGBEE escogidas para optimizar las comunicaciones inalámbricas en este tema de tesis.

Estos parámetros han sido determinados en base a información de relevancia publicada en investigaciones similares, revistas especializadas, estudios de tesis, foros de internet.

Los indicadores determinados para la variable independiente son los siguientes:

- Topología
- Tasa de Transferencia
- Frecuencia
- Cobertura
- Tamaño de Red
- Duración Baterías
- Seguridad

En cuanto a los indicadores definidos para la variable dependiente son los siguientes:

- Distancia de Nodos
- Disponibilidad de Servicio
- Conexión de Nodos
- Transmisión de Paquetes según Voltaje
- Consumo de Baterías

## 4.2 ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

### 4.2.1 ANÁLISIS DE LA VARIABLE INDEPENDIENTE

**VARIABLE INDEPENDIENTE:** Análisis de las tecnologías WIFI y ZIGBEE.

En este proceso de análisis de la variable independiente se realizará el estudio técnico de las dos tecnologías inalámbricas WIFI y ZIGBEE, constituyéndose este en el análisis comparativo propuesto como parte de esta investigación; para ello se elaborarán cuadros comparativos, seguidos estos de una interpretación y calificación del criterio evaluado por parte del autor, estos son cuadros comparativos serán elaborados de acuerdo a los parámetros de comparación definidos anteriormente, la toma de datos se efectuará en los prototipos implementados con cada una de estas soluciones.

Para obtener resultados cuantitativos y cualitativos que permiten una selección sustentada de una de las soluciones analizadas, la calificación de cada uno de los indicadores se basa en la siguiente escala:

Tabla 5 Escala de Puntuación para calificación de índices

Regular	Bueno	Muy Bueno	Excelente
< 70%	>= 70% y < 80%	>= 80% y < 90%	>= 90%

Cada uno de los ítems de la interpretación incluye la siguiente nomenclatura **(x,y)/z**

**x:** Representa el puntaje obtenido para la tecnología WIFI

**y:** Representa el puntaje obtenido para la tecnología ZIGBEE

**z:** Representa la base del puntaje sobre la cual se está calificando el parámetro

La calificación definitiva de la solución en base a cada parámetro de comparación, se obtiene sumando los puntajes obtenidos del análisis, utilizando las siguientes fórmulas:

$$P_{wifi} = \sum(x), P_{zigbee} = \sum(y), P_t = \sum(z)$$

$$\text{Calificación de WIFI (Cc-wifi): } (P_{wifi} / P_t) * 100\%$$

$$\text{Calificación de ZIGBEE (Cc-zigbee): } (P_{zigbee} / P_t) * 100\%$$

En donde:

**Pwifj:** Puntaje acumulado por la tecnología WIFI en el parámetro.

**Pzigbee:** Puntaje acumulado por la tecnología ZIGBEE en el parámetro.

**Cc – wifi:** Porcentaje de la calificación total que obtuvo WIFI en el parámetro.

**Cc – zigbee:** Porcentaje de la calificación total que obtuvo ZIGBEE en el parámetro.

Por otra parte para la valoración cualitativa de cada índice se baso en escalas que van de uno a cuatro niveles de acuerdo a la aplicabilidad de cada ámbito del índice.

**Tabla 6** Escala de valoración para el procesamiento de información de la variable dependiente e independiente

<b>ESCALAS DE VALORACIÓN CUALITATIVA</b>			
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto
Deficiente	Poco eficiente	Eficiente	Muy Eficiente
Malo	Regular	Bueno	Muy Bueno
Muy Dificil	Dificil	Fácil	Muy Fácil
No			Si

## **INDICADOR N°.1. TOPOLOGÍA**

La topología en una red es la configuración adoptada por las estaciones de trabajo o dispositivos para conectarse entre si. En definitiva es el patrón de conexión entre sus nodos, es decir, la forma en que están interconectados estos. Los criterios a la hora de elegir una topología, en general, buscan que eviten el coste del encaminamiento (necesidad de elegir los caminos más simples entre el nodo y los demás), dejando en segundo plano factores como la renta mínima, el coste mínimo, etc. Otro criterio determinante es la tolerancia a fallos o facilidad de localización de éstos. También hay que tener en cuenta la facilidad de instalación y reconfiguración de la red.

## **Determinación de Variables**

- a) Punto a Punto
- b) Punto Multipunto
- c) Malla

**Tabla 7** Resumen de la Evaluación del Indicador N. 1, variable independiente

Variable	TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS	
	WIFI	ZIGBEE
Punto a Punto	SI	SI
Punto Multipunto	NO	SI
Malla	NO	SI

**Interpretación:**

- Como se puede apreciar la topología punto a punto es soportada tanto por la tecnología WIFI como la tecnología ZIGBEE, por lo cual su valoración es (4,4).
- Al analizar la topología punto multipunto notamos que solo la tecnología ZIGBEE la soporta, valoración (1,4), al igual que solo ZIGBEE soporta la topología en malla, valoración (1,4).

**Calificación**

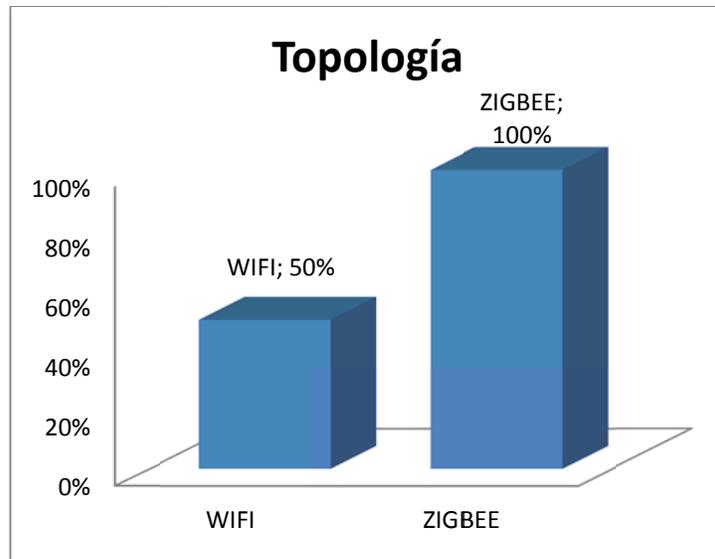
$$Pt = \sum(z) = 4 + 4 + 4 = 12$$

$$Pwifi = \sum(x) = 4 + 1 + 1 = 6$$

$$Pzigbee = \sum(y) = 4 + 4 + 4 = 12$$

$$(Cc-wifi): (Pwifi / Pt) * 100\% = 6/12 = 50 \%$$

$$(Cc-zigbee): (Pzigbee / Pt) * 100\% = 12/12 = 100\%$$



## INDICADOR N°.2. TASA DE TRANSFERENCIA

La tasa de transferencia de datos corresponde a la velocidad media con que los datos son transferidos desde un punto de la red hacia otro, durante períodos de tiempo determinados.

Es importante tomar en cuenta la tasa de transferencia ya que la misma provee información correspondiente al porcentaje de los intentos de conexión que realiza un dispositivo para transferir la información hacia otro.

### Determinación de Variables

- a) Entre 0 y 1 Mbps
- b) Mayor que 1 Mbps

Tabla 8 Resumen de la Evaluación del Indicador N. 2, variable independiente

Variable	TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS	
	WIFI	ZIGBEE
Entre 0 y 1 Mbps	SI	250 Kbps
Mayor que 1 Mbps	11 Mbps	NO

### Interpretación:

- Como se puede apreciar la tecnología WIFI 802.11b maneja velocidades de transferencia de hasta 11Mbps, de ahí su valoración es (4,4) porque cumple con ambas condiciones.
- Al analizar la tasa de transferencia de la tecnología ZIGBEE, observamos que la misma llega hasta los 250 Kbps, por lo que su valoración es (3,1).

### Calificación

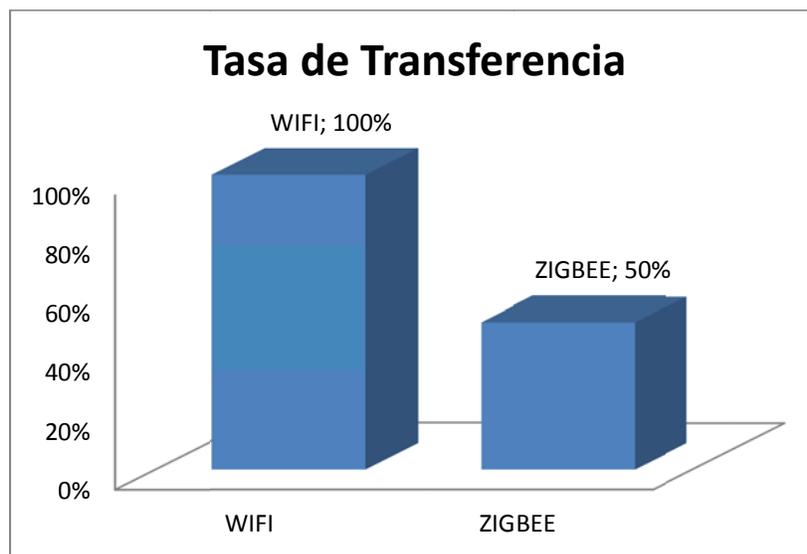
$$Pt = \sum(z) = 4 + 4 = 8$$

$$P_{wifi} = \sum(x) = 4 + 4 = 8$$

$$P_{zigbee} = \sum(y) = 3 + 1 = 4$$

$$(Cc-wifi): (P_{wifi} / Pt) * 100\% = 8/8 = 100\%$$

$$(Cc-zigbee): (P_{zigbee} / Pt) * 100\% = 4/8 = 50\%$$



### INDICADOR N°.3. FRECUENCIA

El término frecuencia se utiliza para indicar la velocidad de repetición de cualquier fenómeno periódico. Se define como el número de veces que se repite un fenómeno en la unidad de tiempo.

A partir de las variaciones en el uso de frecuencias, es claro determinar que equipos o dispositivos de mayor capacidad, estarán asociados a una conexión de alta frecuencia como en el caso de las antenas de redes inalámbricas de banda ancha; y los equipos de mayor movilidad, como las computadoras portátiles.

#### Determinación de Variables

- a) Entre 0 y 1 GHz
- b) Entre 1 y 2.4 GHz

Tabla 9 Resumen de la Evaluación del Indicador N. 3, variable independiente

Variable	TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS	
	WIFI	ZIGBEE
Entre 0 y 1 GHz	NO	868 y 915 MHz
Entre 1 y 2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz

#### Interpretación:

- La tecnología WIFI no trabaja en frecuencias menores a 1 GHz, mientras que ZIGBEE si se maneja en rango de frecuencias menores a 1 GHz y también funciona a 2.4 GHz, que es la frecuencias de libre uso, por lo que su valoración en el primer caso es (1,3) y en el segundo caso es (4,4).

#### Calificación

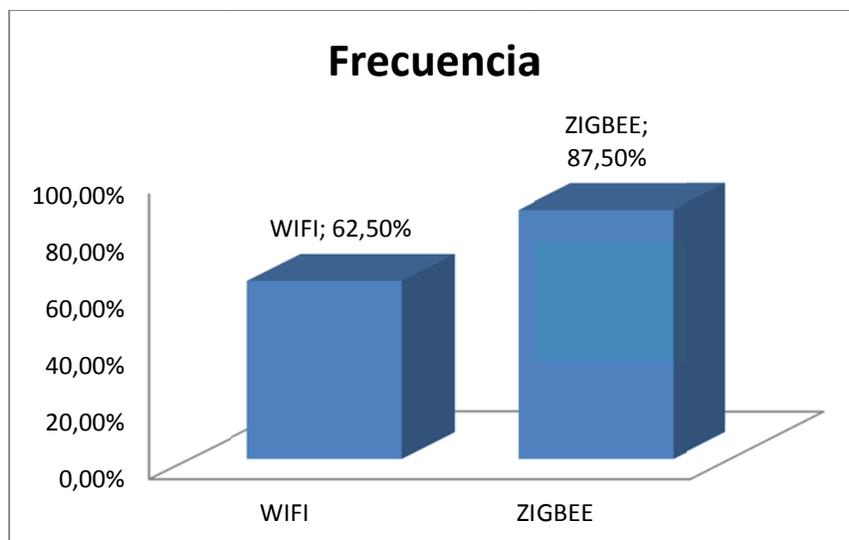
$$Pt = \sum(z) = 4 + 4 = 8$$

$$Pwifi = \sum(x) = 1 + 4 = 5$$

$$Pzigbee = \sum(y) = 3 + 4 = 7$$

$$(Cc-wifi): (Pwifi / Pt) * 100\% = 5/8 = 62.5 \%$$

$$(Cc-zigbee): (Pzigbee / Pt) * 100\% = 7/8 = 87.5\%$$



#### INDICADOR N°.4. COBERTURA

Es el área geográfica que está incluida en una red o un servicio de telecomunicaciones. De mucha importancia cuando se habla de redes de datos ya que indica la propagación del servicio y el porcentaje de atención a los usuarios de una red.

#### Determinación de Variables

- a) Entre 0 y 30 m
- b) Entre 30 y 100 m

Tabla 10 Resumen de la Evaluación del Indicador N. 4, variable independiente

Variable	TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS	
	WIFI	ZIGBEE
Entre 0 y 30 m	Muy bueno	Muy Bueno
Entre 30 y 100 m	Bueno	Regular

#### Interpretación:

- Como se puede notar las dos tecnologías tienen un desempeño muy bueno en distancias menores a 30 m, su valoración (4,4).

- Mientras que a medida que el espacio de cobertura aumenta la tecnología zigbee se ve afectada, lo que no casi no se nota con wifi, su valoración (3, 2).

### Calificación

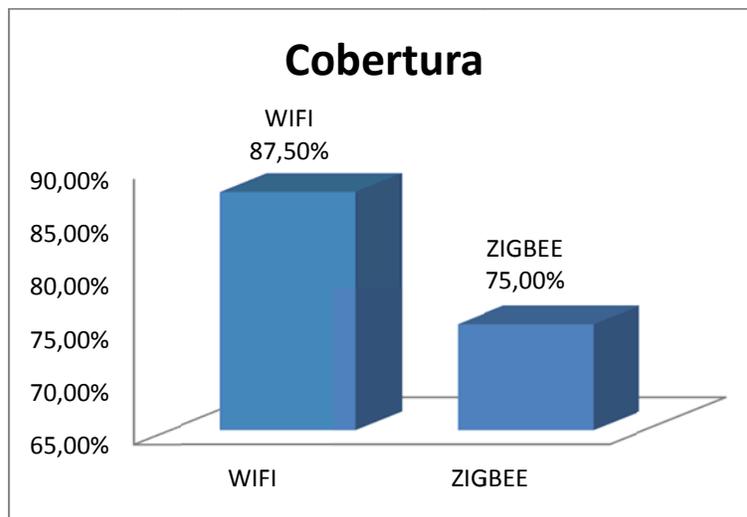
$$Pt = \sum(z) = 4 + 4 = 8$$

$$P_{wifi} = \sum(x) = 4 + 3 = 7$$

$$P_{zigbee} = \sum(y) = 4 + 2 = 6$$

$$(Cc-wifi): (P_{wifi} / Pt) * 100\% = 7/8 = 87.5 \%$$

$$(Cc-zigbee): (P_{zigbee} / Pt) * 100\% = 6/8 = 75\%$$



### INDICADOR N°.5. TAMAÑO DE LA RED

El tamaño de la red es un factor que determina cuantos nodos sensores se van a utilizar en la implementación, de acuerdo a la cobertura que va a tener cada sensor se determina el número de sensores a utilizarse.

### Determinación de Variables

- a) Entre 1 y 32 nodos
- b) Entre 33 y 65 000 nodos

Tabla 11 Resumen de la Evaluación del Indicador N. 5, variable independiente

Variable	TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS	
	WIFI	ZIGBEE
Entre 1 y 32 nodos	Bueno	Muy Bueno
Entre 33 y 65 000 nodos	Malo	Muy Bueno

### Interpretación:

- Como se puede notar las dos tecnologías pueden albergar en su red hasta 32 nodos, su valoración (3,4).
- La tecnología zigbee puede tener hasta 65 000 nodos sensores en su red para ampliar su cobertura, su valoración (1, 4).

### Calificación

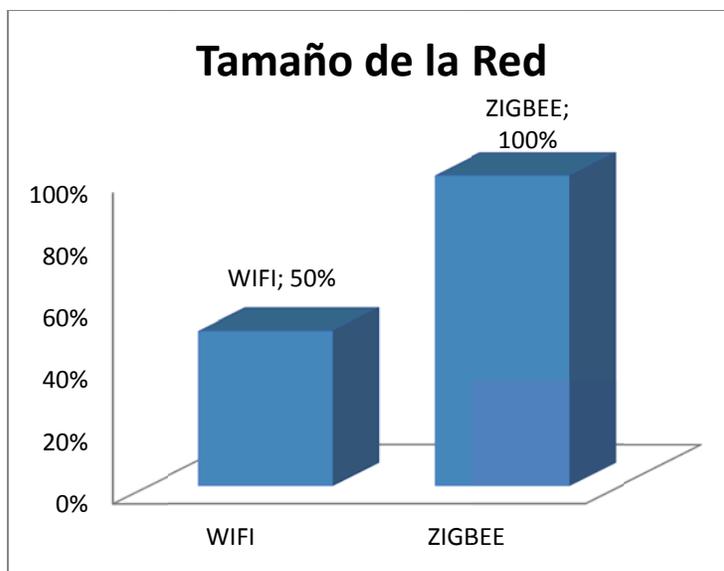
$$Pt = \sum(z) = 4 + 4 = 8$$

$$Pwifi = \sum(x) = 3 + 1 = 4$$

$$Pzigbee = \sum(y) = 4 + 4 = 8$$

$$(Cc-wifi): (Pwifi / Pt) * 100\% = 4/8 = 50\%$$

$$(Cc-zigbee): (Pzigbee / Pt) * 100\% = 8/8 = 100\%$$



#### INDICADOR N°.6. DURACIÓN BATERÍAS

En las redes de sensores inalámbricos se requiere un bajo consumo de energía debido a que existirán aplicaciones en las que no se podrá dar mantenimiento a los nodos sensores, por lo que se requiere una alta duración de las baterías.

#### Determinación de Variables

- a) Entre 0 y 4 años
- b) Mayor a 4 años

Tabla 12 Resumen de la Evaluación del Indicador N. 6, variable independiente

Variable	TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS	
	WIFI	ZIGBEE
Entre 0 y 4 años	Bueno	Muy Bueno
Mayor a 4 años	Malo	Muy Bueno

**Interpretación:**

- El indicador de duración de batería juega un papel muy importante dentro de una red de sensores como observamos la duración de baterías en wifi es menor a un año, y zigbee también cubre ese rango, su valoración (3,4).
- Mientras que la duración de baterías en la tecnología zigbee para el tiempo mayor a un año es muy buena, lo que no sucede con wifi, su valoración (1, 4).

### Calificación

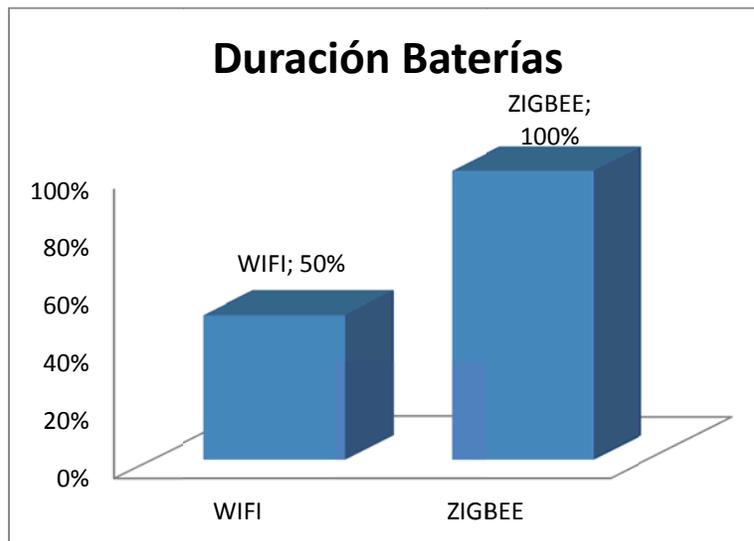
$$Pt = \sum(z) = 4 + 4 = 8$$

$$P_{wifi} = \sum(x) = 3 + 1 = 4$$

$$P_{zigbee} = \sum(y) = 4 + 4 = 8$$

$$(Cc-wifi): (P_{wifi} / Pt) * 100\% = 4/8 = 50\%$$

$$(Cc-zigbee): (P_{zigbee} / Pt) * 100\% = 8/8 = 100\%$$



### INDICADOR N°.7. SEGURIDAD

El activo más importante que se posee es la información, y por lo tanto deben existir técnicas que la aseguren, más allá de la seguridad física que se establezca sobre los

equipos en los cuales se almacena. Estas técnicas las brinda la seguridad lógica que consiste en la aplicación de barreras, utilización de algoritmos de encriptación y procedimientos que resguarden el acceso a los datos y sólo permiten acceder a ellos a las personas autorizadas para hacerlo.

### Determinación de Variables

- a) Datos Encriptados
- b) Soporta transmisiones seguras

Tabla 13 Resumen de la Evaluación del Indicador N. 7, variable independiente

	TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS	
Variable	WIFI	ZIGBEE
Datos Encriptados	Muy Bueno	Bueno
Soporta transmisiones seguras	Muy Bueno	Muy Bueno

### Interpretación:

- Wifi posee varios protocolos para encriptar datos mientras que zigbee posee solamente protocolos AES de 128 bits, su valoración (4,3).
- Ambas tecnologías soportan transmisiones seguras por lo que su valoración es (4,4).

### Calificación

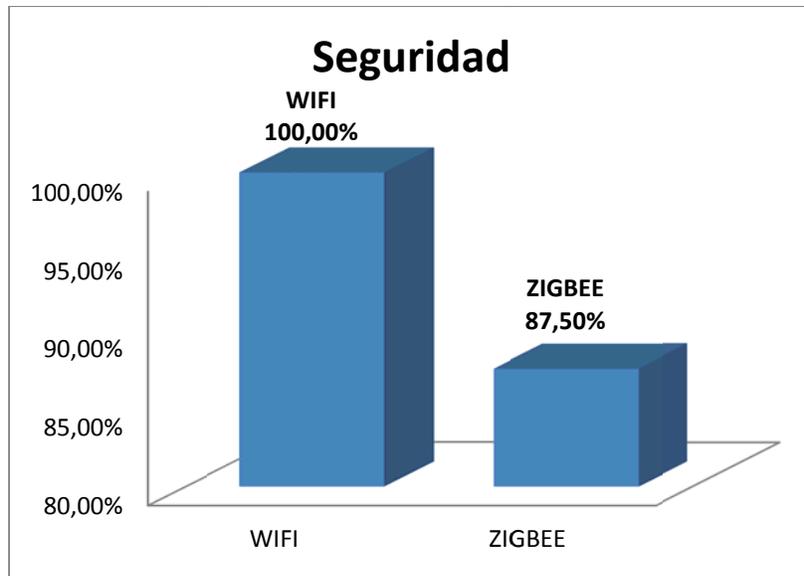
$$P_c = \sum(z) = 4 + 4 = 8$$

$$P_{wifi} = \sum(x) = 4 + 4 = 8$$

$$P_{zigbee} = \sum(y) = 3 + 4 = 7$$

$$(C_c-wifi): (P_{wifi} / P_c) * 100\% = 8/8 = 100\%$$

$$(C_c-zigbee): (P_{zigbee} / P_c) * 100\% = 7/8 = 87,5\%$$



#### 4.2.1.1 PUNTAJE ALCANZADO VARIABLE INDEPENDIENTE

El puntaje final y el puntaje que ha obtenido cada tecnología inalámbrica wifi y zigbee, lo vamos a calcular de la siguiente manera:

$$\text{Porcentaje Total del Análisis: } (PT) = \sum(Pt)$$

$$\text{Porcentaje Total de WIFI: } (PT_{wifi}) = \sum(P_{wifi})$$

$$\text{Porcentaje Total de ZIGBEE: } (PT_{zigbee}) = \sum(P_{zigbee})$$

$$\text{Porcentaje Total de WIFI: } (\%WIFI) = \sum(PT_{wifi}/PT) * 100\%$$

$$\text{Porcentaje Total de ZIGBEE: } (\%ZIGBEE) = \sum(PT_{zigbee}/PT) * 100\%$$

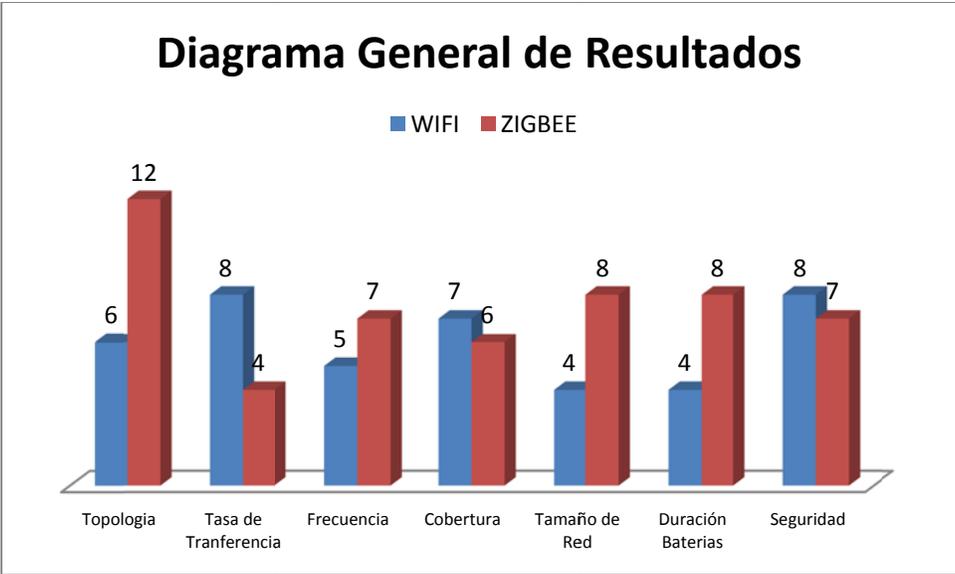
Tabla 14 Esquema General de Resultados

INDICADOR	ÍNDICE	WIFI	ZIGBEE
TOPOLOGÍA	1.1.	4	4
	1.2.	1	4
	1.3.	1	4
TASA DE TRANSFERENCIA	2.1.	4	3
	2.2.	4	1
FRECUENCIA	3.1.	1	3
	3.2.	4	4
COBERTURA	4.1.	4	4
	4.2.	3	2
TAMAÑO DE RED	5.1.	3	4
	5.2.	1	4
DURACIÓN BATERÍAS	6.1.	3	4
	6.2.	1	4
SEGURIDAD	7.1	4	3
	7.2	4	4
<b>TOTAL</b>		<b>42</b>	<b>52</b>

$$PT = 12 + 8 + 8 + 8 + 8 + 8 + 8 = 60$$

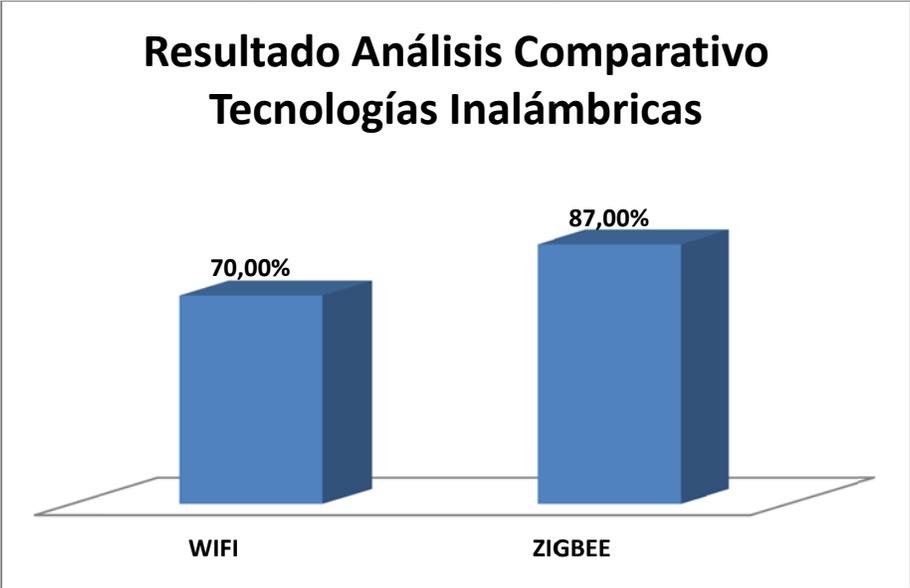
$$PT_{wifi} = 6 + 8 + 5 + 7 + 4 + 4 + 8 = 42$$

$$PT_{zigbee} = 12 + 4 + 7 + 6 + 8 + 8 + 7 = 52$$



$(\%WIFI) = \sum (PT_{wifi}/PT) * 100\% = (42/60) * 100 = 70\%$

$(\%ZIGBEE) = \sum (PT_{zigbee}/PT) * 100\% = (52/60) * 100 = 87\%$



## **ANÁLISIS:**

Luego de haber realizado el análisis comparativo de las tecnologías inalámbricas WIFI y ZIGBEE, el puntaje obtenido para cada uno de los indicadores nos muestra como resultado que la tecnología ZIGBEE ha obtenido el puntaje más alto con un porcentaje del 87% que equivale a Muy Bueno frente al 70% alcanzado por la tecnología WIFI que equivale a Bueno, lo que hace ver que las dos tecnologías son competitivas que tratan de ofrecer sus mejores características pero el control lo tiene ZIGBEE para la aplicación de una red de sensores inalámbricos en un invernadero, por los índices mas importantes para esta aplicación son topología, tamaño de la red, seguridad y las mas importante la duración de las baterías, que hace de zigbee, una tecnología óptima para el control de temperatura en un invernadero.

### **4.2.2 ANÁLISIS DE LA VARIABLE DEPENDIENTE**

**VARIABLE DEPENDIENTE:** Optimización de las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero.

#### **4.2.2.1 VALORACIÓN DE INDICADORES DE LA VARIABLE DEPENDIENTE**

Para la valoración de la variable dependiente a continuación se recoge un conjunto de pruebas y resultados utilizados en los dos ambientes de pruebas para verificar y comprobar cada uno de los indicadores e índices propuestos.

Para una buena comunicación entre nodos hay que tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Sensibilidad del receptor
- Potencia de salida
- Señal de frecuencia
- Medio de propagación de la señal

En un espacio libre donde la señal no está afectada por otras y por materiales que puede haber en su camino tenemos la siguiente ecuación [Farahani 2009]:

$$P_d = P_o - 10 n \log_{10}(f) - 10 n \log_{10}(d) + 27.56 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- Pd potencia de la señal (dBm) a distancia d
- Po potencia de la señal (dBm) a distancia cero desde la antena
- f es la frecuencia de la señal en MHz
- d es la distancia (metros) desde la antena

Teniendo en cuenta la siguiente tabla con los factores que hay predeterminados para distintos entornos encontraremos los resultados teóricos. [Farahani 2009].

<b>n</b>	<b>Entorno</b>
2.0	Aire libre
1.6 hasta 1.8	Dentro de un edificio, visión directa
1.8	Supermercado
1.8	Fábrica
2.09	Sala de conferencias
2.2	Tienda
2 hasta 3	Dentro de una fábrica, sin visión directa
2.8	Dentro residencia
2.7 hasta 4.3	Dentro de un edificio de oficinas, sin visión directa

**Tabla 1 Factor (n) para distintos entornos**

Para nuestro estudio escogeremos el valor n de 2.

## INDICADOR N°.1. DISTANCIA DE NODOS

Este indicador es muy importante para determinar la distancia que puede haber de los nodos sin que se pierdan paquetes en la transmisión.

Las distancias escogidas para el análisis del indicador uno, son aleatorias y se encuentran dentro del rango del alcance de transmisión y de acuerdo a las especificaciones realizadas de los sensores inalámbricos por el fabricante.

### WIFI Paquetes Recibidos y Paquetes Perdidos en Función de la Distancia

Tabla 15 *Datos tomados en escenarios de prueba N°1 para el indicador 1 de la variable dependiente*

	DISTANCIA (m)									
WIFI	1	5	10	20	25	30	35	40	50	70
Paquetes Recibidos (%)	100	99	95	75	63	61	50	0	0	0
Paquetes Perdidos (%)	0	1	5	25	37	39	50	100	100	100

### ZIGBEE Paquetes Recibidos y Paquetes Perdidos en Función de la Distancia

Tabla 16 *Datos tomados en escenarios de prueba N°2 para el indicador 1 de la variable dependiente*

	DISTANCIA (m)									
ZIGBEE	1	5	10	20	25	30	35	40	50	70
Paquetes Recibidos (%)	99,96	99,95	99,92	99,86	99,80	98,15	80,20	92	75	50
Paquetes Perdidos (%)	0,04	0,05	0,08	0,14	0,20	1,85	19,80	8	25	50

### Interpretación:

Una vez tomados los datos podemos decir que los sensores wifi tienen menor alcance, mientras que los sensores zigbee tienen mayor alcance en cuanto a la transmisión y recepción de paquetes, de ahí que resumimos la siguiente tabla, seleccionando 3 rangos de distancias, las cuales nos servirán de ahora en adelante para la realización de pruebas con los siguientes indicadores.

**Tabla 17 Resumen de paquetes transmitidos correctamente  
Con rango de distancias establecidas**

TECNOLOGIAS INALAMBRICAS				
D(m)	WIFI		ZIGBEE	
1-10 m	97%	Alto	99,94%	Alto
11-20 m	70%	Medio	99,20%	Alto
21-30 m	50%	Muy Bajo	98%	Alto

**Tabla 18 Distancias entre nodos**

TECNOLGIAS INALAMBRICAS		
D(m)	WIFI	ZIGBEE
1-10 m	4	4
11-20 m	3	4
21-30 m	1	4
PROMEDIO	2,66	4

## INDICADOR N°.2. DISPONIBILIDAD DE SERVICIO

### POTENCIA DE LA SEÑAL

La potencia determina la fuerza de la señal con que es recibida por el receptor y nos indica el consumo de voltaje y corriente, que es necesario para realizar la transmisión de datos. Estos datos son proporcionados por el fabricante *Ver Anexos*.

Los valores de consumo de corriente y el rango de voltaje de las baterías, cuando se encuentran funcionando los sensores, nos permite calcular la potencia de consumo (mW).

**Tabla 19 Factores de consumo de corriente de los sensores proporcionado por el fabricante**

	Consumo Corriente Tx	Consumo Corriente Reposo
WIFI	130 mA	100 mA
ZIGBEE	5 mA	5 uA

$$P = V * I$$

**Ecuación 2**

Donde:

V = voltaje, el cual vamos tomar la media del valor proporcionado por el fabricante.

$$\frac{2,7 + 3,6}{2} = 3,15 \cong 3 V$$

I = corriente, datos tomados de la *Tabla 23*.

#### Cálculos para sensores wifi

$$P = V * I = 3,6 * 130 = 468 mW$$

#### Cálculos para sensores zigbee

$$P = V * I = 3,6 * 5 = 18 mW$$

**Tabla 20 Cálculo de la Potencia (mW)**

	WIFI	ZIGBEE
VOLTAJE	P (mW)	P (mW)
3,6	468	18
3,5	455	17,5
3,4	442	17
3,3	429	16,5
3,2	416	16
3,1	403	15,5
3,0	390	15
2,9	377	14,5
2,8	364	14
2,7	351	13,5

Realizamos el cálculo de la tabla de propagación de la señal obteniendo así la potencia en base a la sensibilidad del receptor la señal en distintas distancias.

Utilizando la *Ecuación 1.1* realizamos el respectivo cálculo:

Para d = 5 metros, tenemos:

$$P_d = (0 \text{ dBm}) - 10 (2) \log_{10} (2400 \text{ MHz}) - 10 (2) \log_{10} (5) + 27,56$$

$$P_d = 0 \text{ dBm} - 67,6042248 - 13,9794001 + 27,56$$

$$P_d = -54,0236249 \text{ dBm}$$

**Tabla 21 Sensibilidad de la Señal de acuerdo a la distancia**

D(m)	1	5	10	20	25	30	35	40	50	70
P <sub>d</sub> (dBm)	-40,04	-54,02	-60,04	-66,06	-68,00	-69,58	-70,92	-72,08	-74,02	-76,94

Relacionado los resultados del indicador 1, *Tabla 20*, con los resultados del indicador 2, *Tabla 24*, tenemos la siguiente relación:

**Tabla 22 Relación de tablas 20 y 24.**

TECNOLOGIA	DISTANCIA (m)		
	1-10 m	11-20 m	21-30 m
WIFI	Alto	Medio	Bajo
ZIGBEE	Alto	Alto	Medio

**Tabla 23 Disponibilidad de Servicio**

D(m)	TECNOLGIAS INALAMBRICAS	
	WIFI	ZIGBEE
1-10 m	4	4
11-20 m	3	4
21-30 m	2	3
<b>PROMEDIO</b>	3	3,66

### **Interpretación:**

La potencia mínima de transmisión utilizando el escenario wifi se encuentra entre  $0,99 \times 10^{-6}$  mW y  $0,24 \times 10^{-6}$  mW.

La potencia mínima de transmisión utilizando el escenario zigbee se encuentra entre  $0,110 \times 10^{-6}$  mW y  $0,080 \times 10^{-6}$  mW.

### **INDICADOR N°.3. CONEXIÓN DE NODOS**

La conexión de nodos se probó alejando un nodo del nodo coordinador conectado al PC y ver hasta qué distancia llega la comunicación, llevando el dispositivo apagado a la distancia deseada y activarlo desde allí. De esta forma podemos comprobar la capacidad de conexión que tienen los nodos desde diferentes distancias.

En el caso de que, por ejemplo, los nodos se apagaran repentinamente comprobar la capacidad que tienen para volver a comunicarse entre ellos y hasta que distancia son capaces de conseguirlo.

**Tabla 24 Datos tomados en escenarios de prueba N°1 y 2 para el indicador 3 de la variable dependiente**

		DISTANCIA (m)										
SENSORES		1	3	5	10	12	15	17	20	23	28	35
WIFI	Conexión	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO
ZIGBEE	Conexión	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI 2do int.

**Tabla 25 Resumen Datos Tabla 27.**

	DISTANCIA (m)		
SENSORES	1-10 m	11-20 m	21-30 m
WIFI	Alto	Medio	Muy Bajo
ZIGBEE	Alto	Alto	Medio

**Tabla 26 Conexión de Nodos.**

DISTANCIA (m)	WIFI	ZIGBEE
1-10 m	4	4
11-20 m	3	4
21-30 m	1	3
<b>TOTAL</b>	2,66	3,66

**Interpretación:**

La conexión nuevamente de nodos a la red de sensores funciona muy bien en zigbee ya que se conecta sin ninguna dificultad hasta una distancia aproximada de 35-40 metros, mientras que la re conexión de los nodos wifi tienen un menor alcance.

#### INDICADOR N°.4. TRANSMISIÓN DE INFORMACIÓN SEGÚN VOLTAJE

Una vez analizados los indicadores anteriores podemos añadir a nuestro análisis la transmisión de información de los nodos hacia el nodo coordinador pero utilizando el voltaje almacenado en las baterías, por lo tanto iremos variando el mismo.

Según el fabricante de baterías para redes de sensores WIFI y ZIGBEE el voltaje óptimo dentro del cual se garantiza la transmisión del 100% de paquetes es de 2.7 V a 3.6 V, ver Anexos.

#### Wifi Transmisión de Paquetes según Voltaje

Tabla 27 *Transmisión de paquetes en una red wifi según el voltaje*

DISTANCIA	1 – 10 m		11 – 20 m		21 – 30 m	
	PAQUETES RECIBIDOS	PAQUETES PERDIDOS	PAQUETES RECIBIDOS	PAQUETES PERDIDOS	PAQUETES RECIBIDOS	PAQUETES PERDIDOS
3,6	100%	0%	100%	0%	100%	0%
3,5	100%	0%	100%	0%	100%	0%
3,4	100%	0%	100%	0%	80%	20%
3,3	100%	0%	100%	0%	50%	50%
3,2	100%	0%	100%	0%	20%	80%
3,1	100%	0%	100%	0%	0%	100%
3,0	100%	0%	99%	1%	0%	100%
2,9	100%	0%	98%	2%	0%	100%
2,8	100%	0%	99%	1%	0%	100%
2,7	100%	0%	95%	5%	0%	100%
2,6	0%	100%	75%	25%	0%	100%
2,5	0%	100%	70%	30%	0%	100%
2,3	0%	100%	50%	50%	0%	100%
2,0	0%	100%	0%	100%	0%	100%

#### Zigbee Transmisión de Paquetes según Voltaje

Tabla 28 *Transmisión de paquetes en una red zigbee según el voltaje*

DISTANCIA	1 – 10 m		11 – 20 m		21 – 30 m	
	PAQUETES RECIBIDOS	PAQUETES PERDIDOS	PAQUETES RECIBIDOS	PAQUETES PERDIDOS	PAQUETES RECIBIDOS	PAQUETES PERDIDOS
3,6	99,98%	0,02%	99,98%	0,02%	99,78%	1,22%
3,5	99,98%	0,02%	99,98%	0,02%	99,78%	1,22%
3,4	99,65%	0,35%	99,65%	0,35%	99,55%	0,45%
3,3	99,68%	0,38%	99,68%	0,38%	99,58%	0,42%
3,2	99,54%	0,46%	99,54%	0,46%	99,44%	0,56%

3,1	99,60%	0,40%	99,60%	0,40%	99,40%	0,60%
3,0	99,62%	0,38%	99,62%	0,38%	99,32%	0,68%
2,9	99,94%	0,06%	99,94%	0,06%	99,34%	0,66%
2,8	99,94%	0,06%	99,94%	0,06%	98,94%	1,06%
2,7	99,92%	0,08%	96,60%	3,40%	98,92%	1,08%
2,6	99,92%	0,08%	96,61%	3,39%	96,92%	3,08%
2,5	99,55%	0,45%	96,82%	3,18%	96,55%	3,45%
2,3	71,34%	28,66%	79,93%	20,07%	28,66%	71,34%
2,0	20,45%	79,55%	34,45%	65,55%	79,35%	20,65%

De acuerdo a los resultados obtenidos, sacamos un promedio con los valores de los porcentajes de paquetes recibidos aplicados en cada una de las distancias y podemos deducir lo siguiente:

**Tabla 29 Resumen Datos Tabla 30 y 31.**

DISTANCIA	SENSORES			
	WIFI		ZIGBEE	
1 – 10 m	99,38%	Alto	99,79%	Alto
11 – 20 m	90%	Medio	96,15%	Medio
21 – 30 m	30%	Muy Bajo	86,27%	Medio

Esto expresado en valores es:

**Tabla 30 Transmisión de Información según Voltaje**

DISTANCIA	SENSORES	
	WIFI	ZIGBEE
1 – 10 m	4	4
11 – 20 m	3	3
21 – 30 m	1	3
TOTAL	2,66	3,33

**Interpretación:**

Mientras más alto se mantenga el voltaje máximo suministrado por las baterías de los sensores mejor será la transmisión y por ende no habrá pérdida de datos, como vemos en la tabla, los sensores zigbee respondieron de mejor manera.

## INDICADOR N°.5. CONSUMO DE BATERÍAS

Tal vez este indicador sea el mas importante dentro de nuestro estudio y de hecho es uno de los factores sobre el cual se basan las redes de sensores inalámbricas, debido a que el tiempo de vida útil de una batería limita el desarrollo potencial en el mercado de aplicaciones basadas en wsn, sin embargo los fabricantes de éstas soluciones día a día buscan la manera de solucionar el elevado consumo de baterías dando como resultado que los nodos sensores no necesitan estar transmitiendo información cada segundo (dependiendo de la aplicación), en nuestro caso para el control de temperatura de invernadero no resulta necesaria la obtención de temperaturas cada segundo ya que ésta no tendrá variaciones elevadas en tan corto tiempo.

Es por eso que podemos optimizar el consumo de baterías, basándonos en las características de los sensores, que nos posibilitan la opción sleep (sensor dormido mientras no transmite), con esto controlamos el consumo in necesario de la batería.

Este factor depende del fabricante y los datos de los sensores Aginova para wifi y de Crossbow para zigbee, son tomados del resumen realizado en la *Tabla IV.19*.

### WIFI Consumo de baterías

#### Consumo de baterías en Transmisión (C<sub>btx</sub>)

$$P = V * I = 3 V * 130 mA = 390 mW$$

La Carga C, que la batería AA Lithium soporta es 2850 mAh, por lo tanto,

$$C_{btx} = \frac{C}{I} = \frac{2850 mAh}{130 mA} = 21,92 \text{ horas de consumo}$$

#### Consumo de baterías en Reposo (C<sub>br</sub>)

$$P = V * I = 3 V * 100 mA = 300 mW$$

$$C_{br} = \frac{C}{I} = \frac{2850 mAh}{100 mA} = 28,5 \text{ horas de consumo}$$

## ZIGBEE Consumo de baterías

### Consumo de baterías en Transmisión (Cbtx)

$$P = V * I = 3 V * 5 mA = 15 mW$$

La Carga C, que la batería AA Lithium soporta es 2850 mAh, por lo tanto,

$$C_{btx} = \frac{C}{I} = \frac{2850 mAh}{5 mA} = 570 \text{ horas de consumo} \cong 23,75 \text{ días}$$

### Consumo de baterías en Reposo (Cbr)

$$P = V * I = 3 V * 5 \mu A = 0,015 mW$$

$$C_{br} = \frac{C}{I} = \frac{2850 mAh}{5 \mu A} = 57\,000 \text{ horas de consumo} \cong 2\,375 \text{ días} \cong 6,59 \text{ años}$$

Tabla 31 Resumen Consumo de baterías Tx y Reposo

	Consumo Baterías Tx (horas)		Consumo Baterías Reposo (horas)	
WIFI	21,92	Bajo	28,5	Bajo
ZIGBEE	570	Alto	57 000	Alto

Dado que el consumo de corriente va a ser el mismo en cualquier distancia y que lo que nos interesa es el consumo de baterías con la transmisión al 100%, podemos deducir lo siguiente:

Tabla 32 Consumo de Baterías Tx 100%

DISTANCIA	SENSORES	
	WIFI	ZIGBEE
1 – 10 m	2	4
11 – 20 m	2	4
21 – 30 m	2	4
TOTAL	2	4

### Interpretación:

Debido al elevado consumo de corriente por parte de los sensores wifi, éstos tienden a durar horas realizando una transmisión al 100%, mientras que los sensores zigbee tienen un mejor consumo de baterías.

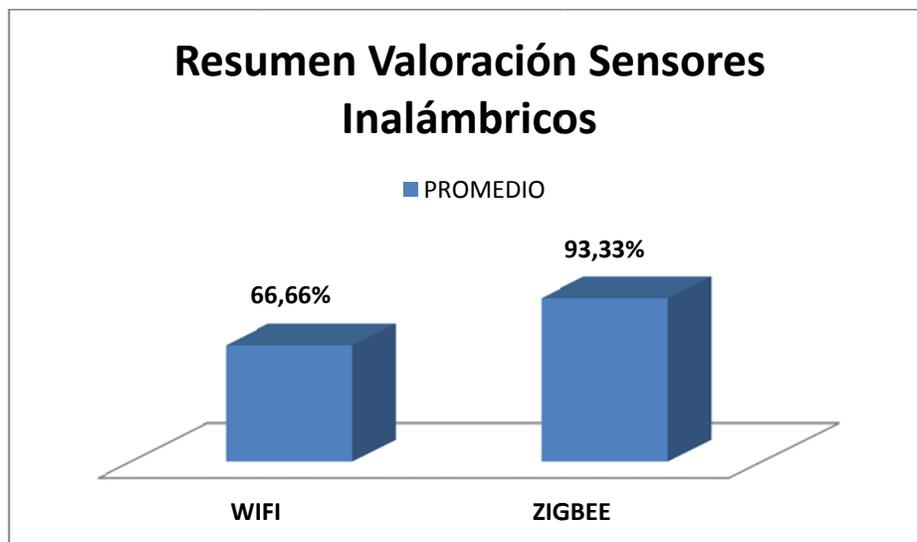
#### 4.2.2.2. PUNTAJE ALCANZADO VARIABLE DEPENDIENTE

Tabla 33 *Resumen de Sensores Inalámbricos WIFI*

Distancia	Indicador 1	Indicador 2	Indicador 3	Indicador 4	Indicador 5	TOTAL/20
1-10 m	4	4	4	4	2	18
10-20 m	3	3	3	3	2	14
20-30 m	1	2	1	2	2	8
PROMEDIO						13,33
PORCENTAJE						66,66 %

Tabla 34 *Resumen de Sensores Inalámbricos ZIGBEE*

Distancia	Indicador 1	Indicador 2	Indicador 3	Indicador 4	Indicador 5	TOTAL/20
1-10 m	4	4	4	4	4	20
10-20 m	4	4	4	3	4	19
20-30 m	4	3	3	3	4	17
PROMEDIO						18,66
PORCENTAJE						93,33 %



able

### 4.3. COMPROBACIÓN DE LA HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

Para la comprobación de la hipótesis de investigación se dará a la variable independiente X los siguientes valores:

X = Tecnologías Inalámbricas

X1 = WIFI

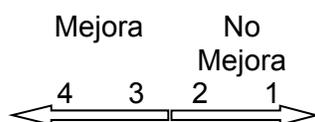
X2 = ZIGBEE

Los mismos que se aplicarán a la muestra en estudio con el fin de determinar su impacto en la variable dependiente que es **Permitirá la optimización de las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero**. En la Tabla IV.: se presentan los resultados obtenidos para la variable dependiente.

La interpretación de la codificación adoptada en esta tabla está en función a una a calificación cualitativa, los valores se detallan como sigue:

Alto	tendrá el valor de 4
Medio	tendrá el valor de 3
Bajo	tendrá el valor de 2
Muy Bajo	tendrá el valor de 1

Los valores se ubicaran de acuerdo a la siguiente consideración:



Para la prueba de la hipótesis planteada se utilizó la prueba chi cuadrada o  $\chi^2$ , que es una prueba no paramétrica a través de la cual se midió la relación entre la variable dependiente e independiente. Además se consideró la hipótesis nula  $H_0$  y la hipótesis de investigación  $H_i$ .

**Hi:** El análisis de las tecnologías WIFI y ZIGBEE, permitirá la optimización de las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero.

**Ho:** El análisis de las tecnologías WIFI y ZIGBEE, no permitirá la optimización de las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero.

**Tabla 35 Presentación de Resultados**

	<b>INDICADOR</b>	<b>WIFI</b>	<b>ZIGBEE</b>
Optimiza las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero	Distancia Entre Nodos		4
	Disponibilidad de Servicio	3	3,66
	Conexión de Nodos		3,66
	Transmisión de Paquetes Según Voltaje		3,33
	Consumo de Baterías		4
	<i>Total Índice</i>	3	18,65
	<b>Total Indicadores</b>	<b>3</b>	<b>18,65</b>
No optimiza las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero	Distancia Entre Nodos	2,66	
	Disponibilidad de Servicio		
	Conexión de Nodos	2,66	
	Transmisión de Paquetes Según Voltaje	2,66	
	Consumo de Baterías	2	
	<i>Total Índice</i>	9,98	0
	<b>Total Indicadores</b>	<b>9,98</b>	<b>0</b>

La tabla de contingencia creada para el cálculo de la chi cuadrada, contiene a las dos variables en estudio: El análisis de las tecnologías wifi y zigbee y la optimización de las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero.

En la **Tabla 39** se anotan las frecuencias observadas en la investigación

**Tabla 36 Frecuencias Observadas en la Investigación**

	WIFI	ZIGBEE	TOTAL
<b>Hi:</b> El análisis de las tecnologías WIFI y ZIGBEE, permitirá la optimización de las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero.	3	18,65	21,65
<b>Ho:</b> El análisis de las tecnologías WIFI y ZIGBEE, no permitirá la optimización de las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero.	9,98	0	9,98
<b>TOTAL</b>	12,98	18,65	31,63

La **Tabla 37** contiene las frecuencias esperadas, la cual constituye los valores que esperaríamos encontrar si las variables no estuvieran relacionadas. La chi cuadrada partirá del supuesto de “no relación entre las variables” y se evaluará si es cierto o no, analizando si las frecuencias observadas son diferentes de lo que pudiera esperarse en caso de ausencia de correlación.

La frecuencia esperada de cada celda, se calcula mediante la siguiente fórmula aplicada a la tabla de frecuencias observadas.

$$fe = \frac{(total\_de\_fila)(total\_de\_columna)}{N} \qquad \text{Ecuación 3}$$

Donde **N** es el número total de frecuencias observadas

Para la primera celda la frecuencia esperada sería:

$$fe = \frac{(21,65)(12,98)}{31,63} = 8,88$$

**Tabla 37 Tabla de Frecuencias Esperadas**

	WIFI	ZIGBEE	TOTAL
<b>Hi:</b> El análisis de las tecnologías WIFI y ZIGBEE, permitirá la optimización de las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero.	8,88	12,77	21,65
<b>Ho:</b> El análisis de las tecnologías WIFI y ZIGBEE, no permitirá la optimización de las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero.	4,10	5,88	9,98
<b>TOTAL</b>	12,98	18,65	31,63

Una vez obtenidas las frecuencias esperadas, se aplica la siguiente fórmula de chi cuadrada:

$$\chi^2 = \sum \frac{(O - E)^2}{E} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

**O** es la frecuencia observada en cada celda

**E** es la frecuencia esperada en cada celda

En la *Tabla 41* se calcula el valor de  $\chi^2$

**Tabla 38 Cálculo de  $\chi^2$**

CELDA	OBSERVADAS	ESPERADAS	O - E	(O-E) <sup>2</sup>	(O-E) <sup>2</sup> /E
Optimiza las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero con WIFI	3	8,88	-5,88	34,5744	3,8935
Optimiza las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero con ZIGBEE	18,65	12,77	5,88	34,5744	2,7075

No optimiza las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero con WIFI	9,98	4,10	5,88	34,5744	8,4328
No optimiza las comunicaciones inalámbricas para el control de temperatura de un invernadero con ZIGBEE	0	5,88	5,88	34,5744	5,8800
<b>TOTAL DE LA TABLA <math>\chi^2</math></b>					<b>20,9138</b>

**INTERPRETACIÓN:** Para saber si el valor de  $\chi^2$  es o no significativo, se debe determinar los grados de libertad mediante la siguiente fórmula:

$$GI = (r-1)(c-1)$$

**Ecuación 5**

Donde:

r es el número de filas de la tabla de contingencia

c es el número de columnas de la tabla de contingencia

Por lo tanto:

$$GI = (2-1)(2-1) = 1$$

De la tabla de distribución del  $\chi^2$  que se encuentra en el Anexo 5 y eligiendo como nivel de confianza  $\alpha = 0,05$  se obtiene:  $\chi^2 = 3.8415$ . El valor de  $\chi^2$  calculado en esta investigación es de **20,9137** que es superior al de la tabla de distribución; por lo que el valor  $\chi^2$  está en la zona de rechazo de la hipótesis Nula por lo cual se acepta la hipótesis de investigación.

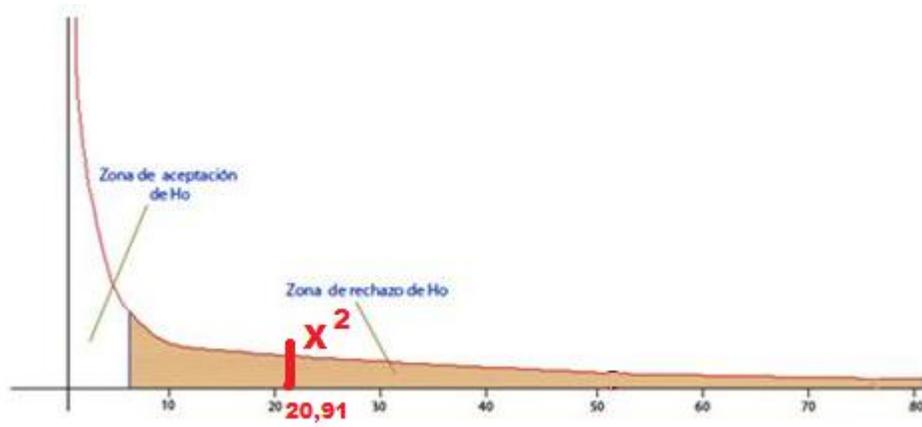


Figura 32 Gráfica de la Función  $\chi^2$

## CONCLUSIONES

- El análisis de las tecnologías inalámbricas wifi y zigbee aplicado a las redes de sensores inalámbricos en un invernadero son el resultado del estudio de varios indicadores, como la topología, tasa de transferencia, frecuencia, cobertura, tamaño de la red, duración de baterías y seguridad, con lo cual el puntaje obtenido para cada uno de estos indicadores nos muestra como resultado que la tecnología ZIGBEE ha obtenido el puntaje más alto con un porcentaje del 87% que equivale a Muy Bueno frente al 70% alcanzado por la tecnología WIFI que equivale a Bueno, lo que hace ver que las dos tecnologías son competitivas que tratan de ofrecer sus mejores características pero el control lo tiene ZIGBEE.
- La implementación de la solución permitió la optimización de las comunicaciones inalámbricas con la utilización de redes de sensores zigbee en un 66,66% del total del 100%, siendo esta muy superior a la implementada con sensores wifi que alcanzó un 93,33% del total, todo esto se logró en base a la obtención de niveles óptimos de los indicadores de la variable dependiente.
- La distancia óptima que se puede manejar entre el nodo sensor y el AP esta en un rango de 1 a 20 m, al cual se garantiza que el 99,86% de los datos serán enviados correctamente, dentro de este mismo rango se encuentran con niveles óptimos la propagación de la señal, la conexión nuevamente de los sensores a red y el mejor consumo de baterías.

- Zigbee se constituye como la tecnología idónea para su aplicación en un invernadero, porque tiene bajo costo, flexibilidad de implementación, reduce tareas de mantenimiento de red, y bajo consumo de batería, que resulta quizá, el concepto mas importante dentro de una red inalámbrica de sensores, ya que el consumo de baterías representa la vida útil de la red y garantiza el óptimo desenvolvimiento del resto de indicadores.
- La hipótesis fue demostrada ya que el valor de  $\chi^2$  calculado en esta investigación es de **20,9137** que es muy superior al de la tabla de distribución, que muestra un valor de 3.8415; por lo que  $\chi^2$  resulta significativa y se acepta la hipótesis de investigación.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda la implementación de una red inalámbrica de sensores en un invernadero, ya que la misma se encuentra diseñada por el fabricante para desarrollarse en este ambiente, además que el estudio está orientado a dar solución de comunicación en invernaderos pequeños, los cuales necesitan de una tecnología que optimice su producción, reduciendo los costos de operación y mantenimiento de la misma.
- Se recomienda realizar una mayor difusión de la tecnología zigbee y su aplicación como solución a invernaderos, ya que por no existir suficiente conocimiento sobre este tema resulta complicado su implementación en cuanto a costos, ya que la solución de sensores se realiza mediante una importación de la misma.
- Se recomienda recabar más información sobre las seguridades que se pueden implementar ante las posibles vulnerabilidades de toda red inalámbrica en un futuro.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] 10 Akyildiz, I.F., SU\* W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E., Wireless sensor networks: a survey, Computer Networks 38 (2002) 393–422, Elsevier, Atlanta Georgia USA, 2002
  
- [2] 15 IEEE Std 802.15.4™-2006, “Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)”.
  
- [3] 7 Matthew Gast, S., Redes Wireless 802.11: Configuración y Administración de Redes Inalámbricas. O’Reilly Anaya Multimedia, 2006
  
- [4] 1 Mohammad Iyas and Imad Mahgoub, Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems, CRC Press LLC, 2005
  
- [5] 5 Stewart Miller, WIFI Security McGraw-Hill. 2003

## INTERNET

- [6] 2 Aginova Sensor Kit  
<http://www.aginova.com/Products/Productskits/Wireless.html>
- [7] 11 Agroinformación. Tipos de Invernaderos – Principales tipos de Invernaderos (Apartado 3. y 4.)”, Infoagro, Abril del 2009,  
[http://www.infoagro.com/industria\\_auxiliar/tipo\\_invernaderos3.asp](http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/tipo_invernaderos3.asp)
- [8] 6 Dexma. Wireless Sensor Networks Intelligence:  
<http://www.dexmasensors.com>
- [9] 9 Home networking with ZigBee:  
<http://www.embedded.com/shared/printableArticle.jhtml?articleID=52600868>
- [10] 12 IEEE Estandard 802.11, Edition 2007.  
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-1999.pdf..>
- [11] 14 LEDESMA J., “Invernaderos”, Abril del 2009,  
<http://www.geocities.com/jledesma.geo/invernaderos.html>
- [12] 17 MICAz Module:  
[http://www.xbow.com/Products/Product\\_pdf\\_files/Wireless\\_pdf/MICAz\\_Datasheet.](http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MICAz_Datasheet.)
- [13] 3 Using ZigBee Wireless Networking to Develop Commercial Products  
<http://www.rtc magazine.com/home/article.php?id=100656>
- [14] 8 Wireless Sensor Networks, TPR2400/2420 Quick Start Guide, Document 7430-0380-01, Rev. A, May 2005
- [15] 13 Zigbee Alliance,  
<http://www.zigbee.org/en/index.aspx>
- [16] 16 Wireshark. <http://www.wireshark.org/>
- [17] 17 Backtrack. [www.backtrack-linux.org/](http://www.backtrack-linux.org/)

# ANEXOS

## ANEXO 1

# GUIA DE REFERENCIA PARA EL DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES

### Introducción

Este capítulo describe el diseño y la configuración de una red inalámbrica de sensores. El capítulo presenta las decisiones de diseño relacionadas con: la distancia óptima de para redes de sensores inalámbricos, la estimación de condiciones ambientales y estructurales adecuadas, los requisitos de los usuarios, los requerimientos funcionales, la selección del equipamiento de la red, la topología, potencia y consumo de baterías, entre otros.

### Plataforma que se usará en el diseño de la red inalámbrica de sensores

IEEE 802.15.4 se ha creado específicamente para el desarrollo de redes inalámbricas de baja velocidad, bajo costo y consumo de potencia (LRWPAN). Este estándar está orientado a aplicaciones donde la velocidad de transferencia no es muy alta, pero permite que los nodos de la red se puedan alimentar usando baterías. IEEE 802.15.4, es por lo tanto el estándar que al momento se adapta de mejor manera a los requisitos que implica el desarrollo de las redes de sensores.

Por cuestiones de disponibilidad, para tener más versatilidad en el desarrollo de aplicaciones, y por compatibilidad; la plataforma elegida para el presente diseño serán los sensores ZIGBEE MicaZ, desarrollados por CrossBow que cumple con el estándar IEEE 802.15.4.

La Plataforma CrossBow posee las siguientes características:

- Alimentación de 2.7V a 3.6V, se puede suplir con dos baterías AA.

- Posee un puerto USB para comunicación y programación, así como para ser alimentado por el computador.
- Baja potencia de operación, por el uso del microcontrolador Atmega128L, que tiene 10kB de RAM, 48kB de flash, y 128B para almacenamiento de información.
- Para las comunicaciones inalámbricas, MPR2400 crossbow se basa en el radio Chipcon CC2420, que cumple con las especificaciones IEEE 802.15.4, brindando la capa PHY y funciones de la capa MAC, en la frecuencia de operación de 2.4GHz.
- MPR2400 crossbow, posee también una memoria flash serial, para almacenamiento de código y datos.
- Los sensores, MPR2400 poseen sensores de temperatura, humedad, de luz: para medir la radiación foto-sintéticamente activa, y para sensor todo el espectro visible.



**Figura 33 MPR2400 Micaz con antena estandar**

### **Diseño de la Red Inalámbrica de Sensores**

Debido al equipo de sensores utilizado, el siguiente diseño se referirá en muchas ocasiones a características del mismo dispositivo, sin que esto signifique que tal descripción sea una regla para cualquier otro diseño.

### Capa Física

Para el uso de la capa física se empleará DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), en la banda 2450 MHz usando modulación O-QPSK. Esta capa física por el hecho de usar una de las bandas ISM, facilita el desarrollo de la tecnología de las redes de sensores inalámbricos abaratando sus costos

### Capa MAC

El acceso al medio para el estándar IEEE 802.15.4, se desarrollará con una topología de acceso inalámbrico punto – punto, la cual implica que todos los nodos deben comunicarse directamente con el nodo coordinador, la cual tiene la posibilidad de emitir o no beacons.

Con lo que se podrá conectar los dispositivos como se lo detalla en el punto 3.5.

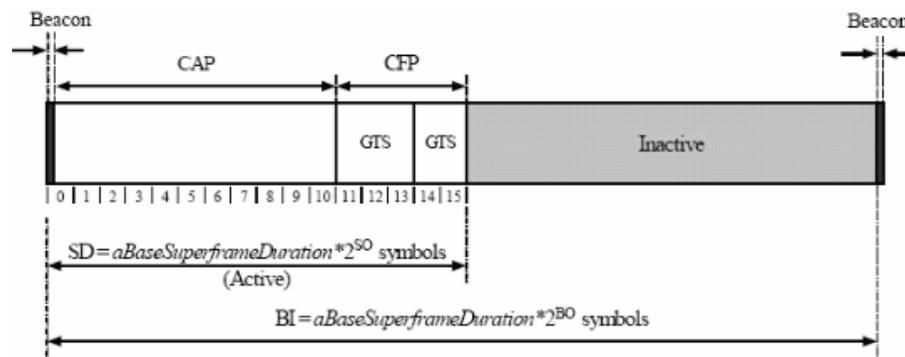


Figura 34 Supertrama IEEE 802.15.4

Es bastante impreciso el tratar de estandarizar las dimensiones de un invernadero, por el hecho de que estas varían de una región geográfica a otra por razones de requerimientos que también determina el tipo de invernadero que se utilizará pero se considerará por tanto invernaderos tipo capilla y sus medidas son aproximadamente las siguientes:

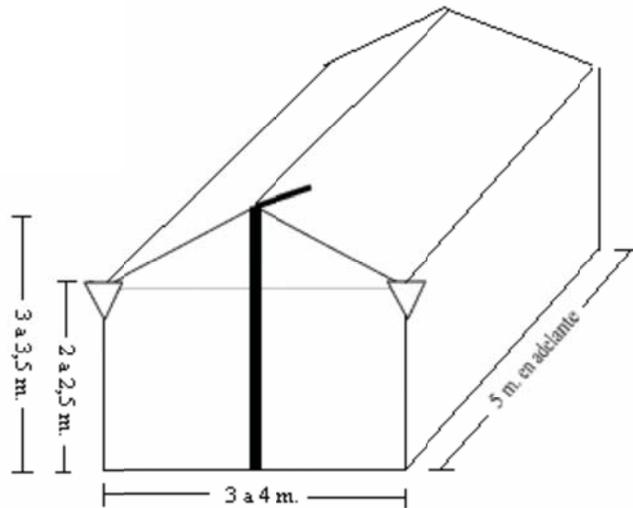
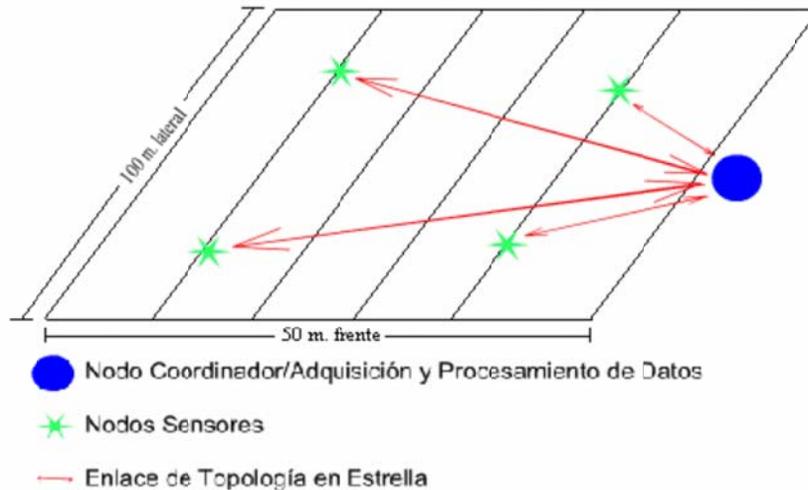


Figura 35 Medidas aproximadas de un invernadero tipo capilla en nuestro medio.

**Escenario de Pruebas:**

- ✓ El invernadero tipo capilla tiene una ancho de 4 m, altura de 3 m y largo de 30 m, o un equivalente con superficie de 120 m<sup>2</sup>.
- ✓ Vamos a colocar 2 nodos sensores con IEEE 802.15.4.
- ✓ Con la estructura de la supertrama definida se puede decir que para la transmisión se tiene disponible 15 de 32 timeslots.
- ✓ Los nodos sensores tendrán movilidad muy reducida, que por lo general solo se dará en re-configuraciones de la red.
- ✓ La latencia en la comunicación no es un factor muy restrictivo, ya que el sensado de variables medioambientales no presenta limitaciones críticas. Sin embargo, se debe mantener valores adecuados de latencia, para que en un futuro avance de esta investigación, se pueda introducir mecanismos de control que controlen las variables de desempeño del invernadero y que de alguna manera requieran una pronta entrega de los valores sensados.
- ✓ La velocidad máxima de transmisión de datos es de 250 Kbps.

- ✓ En el interior de un invernadero, la interferencia por obstáculos es aceptable (interferencia de plantas no es significativa).
- ✓ En el interior de una infraestructura de este tipo pueden llegar a ser significativas las pérdidas producidas principalmente por propagación multi-camino, y debido a la inestabilidad del medio que atravesará la señal (humedad excesiva en el ambiente puede producir desvanecimiento de la señal).
- ✓ En campos cerrados, las diferencias en los factores climáticos de un sector a otro tienden a nivelarse rápidamente, haciendo menores los requerimientos de sensado.
- ✓ La distribución de los nodos sensores debe ser lo más uniforme posible, permitiendo que los nodos cubran áreas comparables, y sin descuidar los extremos del invernadero, que es en donde se generarán más fluctuaciones de los parámetros climáticos
- ✓ El protocolo de acceso al medio para este caso se basa en la topología punto a punto que se usará, en la que el nodo coordinador enviará *beacons* de sincronización, y se usará los períodos de inactividad presente en la supertrama.
- ✓ Con todo lo dicho, se puede tener un diseño en el que se cubra toda la superficie con una topología en estrella, permitiendo que el nodo coordinador se ubique en uno de los laterales del invernadero capilla, para que haga las veces de gateway de la red de sensores inalámbricos y esté directamente conectado con un equipo de adquisición y procesamiento de los datos adquiridos.



dero

### ***Capa de Red y Superiores***

Por la topología implementada en el escenario de pruebas no resulta necesario realizar un enrutamiento de datos para que estos sean entregados al destino. En este caso todos los nodos sensores deberán entregar los datos sensados y recolectados (capa de aplicación) directamente al nodo master Gateway.

### ***Políticas de Seguridad para la Red de Sensores Inalámbricos***

Es deseable que la red de sensores inalámbricos que utiliza zigbee, tenga todas las seguridades posibles. Sin embargo, el poner todas las seguridades implica el aumentar la carga en procesamiento, código y gasto de energía.

El estándar IEEE 802.15.4 define a la capa MAC como la responsable de proporcionar los servicios de seguridad, cuando se solicitan por las capas superiores. IEEE 802.15.4 no define los mecanismos para la creación, transmisión y almacenamiento de llaves, para el manejo de mecanismos de llave simétrica. El estándar implementa los servicios de seguridad a través de siete mecanismos denominados suites de seguridad.

Identificador del Nivel de Seguridad	Campo de Control de Seguridad b2 b1 b0	Atributos de Seguridad	Confidencialidad de Datos	Autenticación de Datos (M=longitud del campo de autenticación)
0x00	'000'	Ninguno	OFF	NO (M=0)
0x01	'001'	MIC-32	OFF	SI (M=4)
0x02	'010'	MIC-64	OFF	SI (M=8)
0x03	'011'	MIC-128	OFF	SI (M=16)
0x04	'100'	ENC	ON	NO (M=0)
0x05	'101'	ENC-MIC-32	ON	SI (M=4)
0x06	'110'	ENC-MIC-64	ON	SI (M=8)
0x07	'111'	ENC-MIC-128	ON	SI (M=16)

En todas las suites de seguridad se usa el estándar AES-128 bits.

A continuación se listan políticas de seguridad que se ha considerado son aplicables en el diseño en todos los ámbitos del mismo:

#### **Políticas para la Red de Sensores Inalámbricos**

- Debido a que en los casos de diseño se considera una sola red de área personal (PAN *Personal Area Network*), el identificador de la PAN debe cambiarse cada cuatro meses y los cambios no deben seguir ningún patrón fácil de descifrar.
- El identificador del nodo en la red de sensores inalámbricos debe cambiarse cada cuatro meses.
- Respalda el código implementado en la red luego de los cambios de identificador de PAN y de nodo.
- Esta prohibida la divulgación de información relacionada con la red de sensores inalámbricos con personal que no sea el interno a la empresa.

### ***Políticas para el Sistema de Control***

- Respalidar los procedimientos programados en el sistema de control cada cuatro meses
- No divulgar información acerca del modo de operación del sistema de control a personal externo.

### ***Políticas para la Base de Datos***

- Cambiar el usuario y la clave del administrador de la base de datos cada seis meses.
- Realizar respaldos de la base de datos del sistema cada dos meses.
- No divulgar información de la base de datos a personal que no esté directamente relacionado con la misma.

### ***Políticas para el Sistema en General***

- Resguardar las instalaciones de todo el sistema de personal no autorizado.
- Respalidar todos los datos en otro lugar cada seis meses.
- Realizar capacitación de políticas de seguridad al personal cada seis meses

## **REDES DE SENSORES INALAMBRICOS ZIGBEE UTILIZANDO CROSSBOW**

### **STARTER KIT**

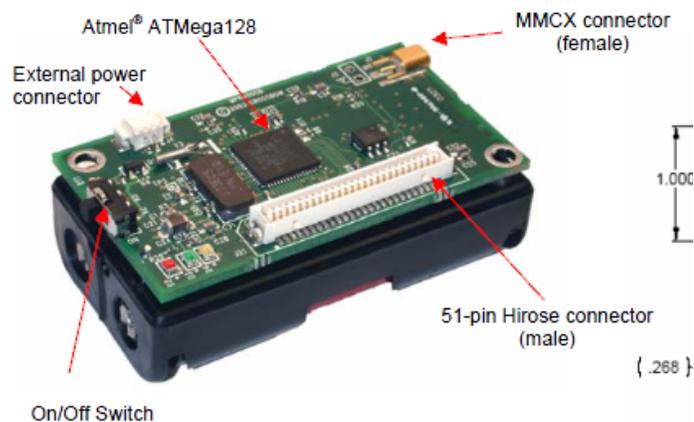
Crossbow, es la empresa que fabrica software y hardware para redes WSN, éste kit proporciona una solución fácil y accesible del manejo de sensores inalámbricos que se conectan a una red dentro de los 2,4GHz o 868/916 MHz en bandas ISM.

El software de aplicación MoteView para PC basados en Windows proporciona una interfaz de usuario intuitivo gráfico para supervisar y manejar la red de sensores

inalámbricos. Muestra la topología de red, traza gráficos de lectura de sensores así como nodos de sensores de configuración, MoteView da la posibilidad al usuario de tener control sobre los datos del sensor y la red. La guía de instalación y configuración se encuentra descrita en el *Anexo 3*.

## Elementos de Red

**Mica2:** es un sistema de comunicación inalámbrica con tecnología WSN fabricada por crossbow.



**Figura 38 MICA2 / MPR400**

### Procesador y plataforma de radio MPR2400:

<sup>8</sup>Fundado por Atmel ATmega128L, es un micro controlador de bajo consumo de energía, que corre en TOS desde su memoria flash interna.

TOS es una placa procesadora MPR2400, que puede ser configurada para correr aplicaciones, procesamiento de sensores y comunicación de red / radio corriendo simultáneamente, esta compuesto de 51 pines.

---

<sup>8</sup> <http://www.xbow.com>

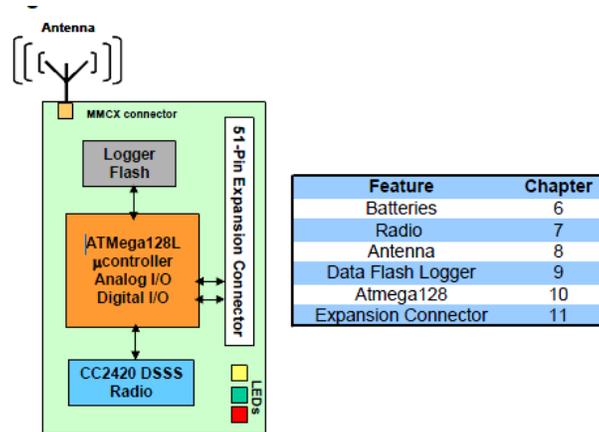


Figura 39 Plataforma Mica2 / MPR2400

### Estación Base:

La MIB520CA provee una interfaz USB para programar y operar comunicaciones de datos

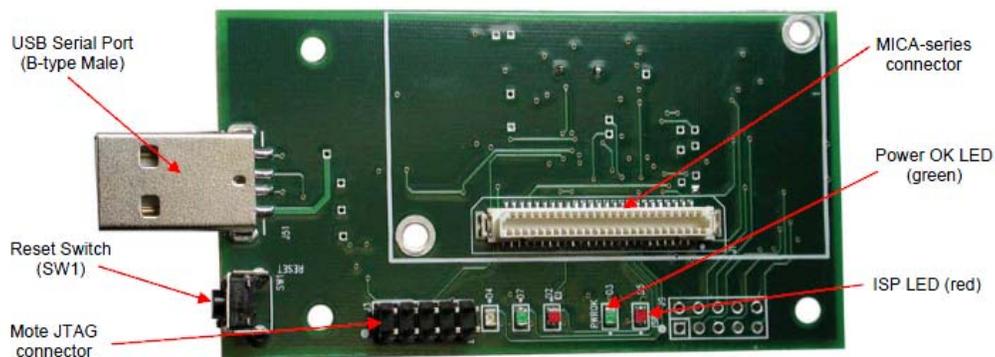


Figura 40 Modulo Estación base Gateway

### SOFTWARE DE MONITOREO

El software de monitoreo MoteView, sirve para obtener mapas históricos en tiempo real, proporciona mapas de topología, capacidad de exportación de datos, programar motas y una interfaz de comandos para redes de sensores.

MoteView es el software de Crossbow diseñado para el interfaz utilizado por el cliente final que permite entregar una solución punto a punto para la creación de las redes de sensores inalámbricas, el mismo tiene la capacidad de lectura que permite la visión histórica del estado de la red y en un cierto plazo las lecturas de los sensores, se basa en el registro de información almacenada en el XServe.

Permite a los usuarios finales, optimizar la disposición de la red, configuración, analiza la información del sensor recíprocamente y entonces toma la acción correctiva, también proporciona una interfaz de configuración remota las motas en la red.

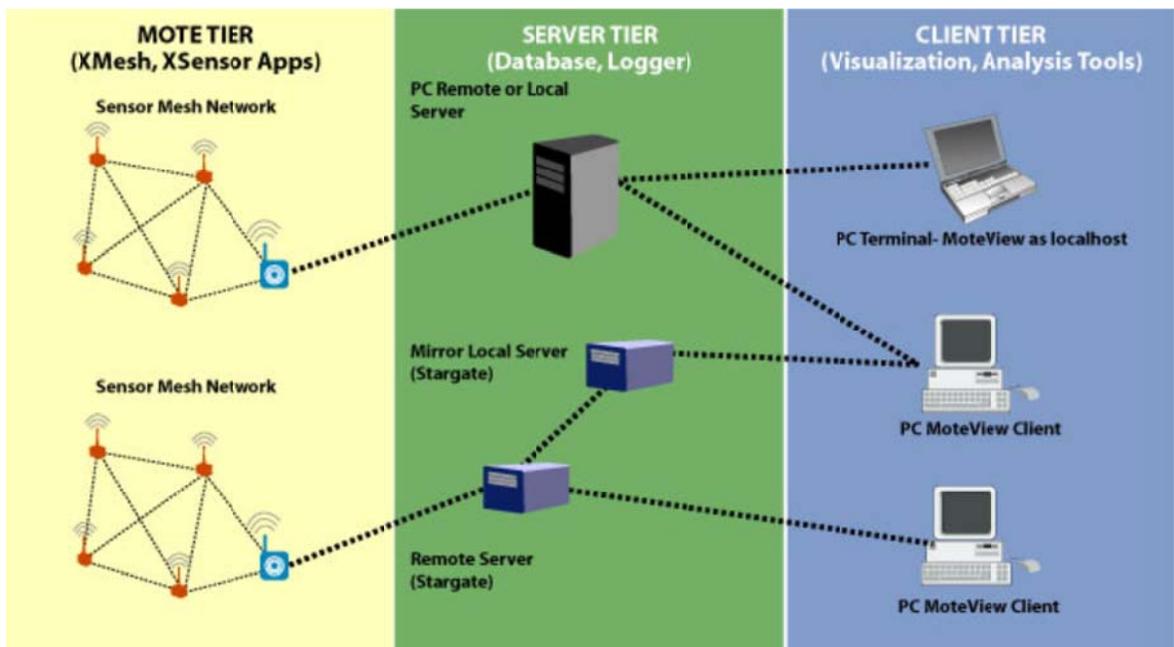


Figura 41 Software de trabajo para una WSN

Todas las herramientas de MoteView requieren ser conectadas con una base de datos, la cual puede residir en la PC en el localhost o en un servidor remoto. El tamaño de esta base de datos es limitado por la capacidad de almacenamiento en el sistema. Durante la instalación de MoteView una base de datos estática es incluida para permitir demostrar las características sin tener que ser conectado con una red de sensores activa o un servidor remoto, esta herramienta es la que nos permite realizar nuestra simulación.

## DATOS DE MOTEVIEW

- Gráfico datos sensor: temperatura, presión, humedad, etc

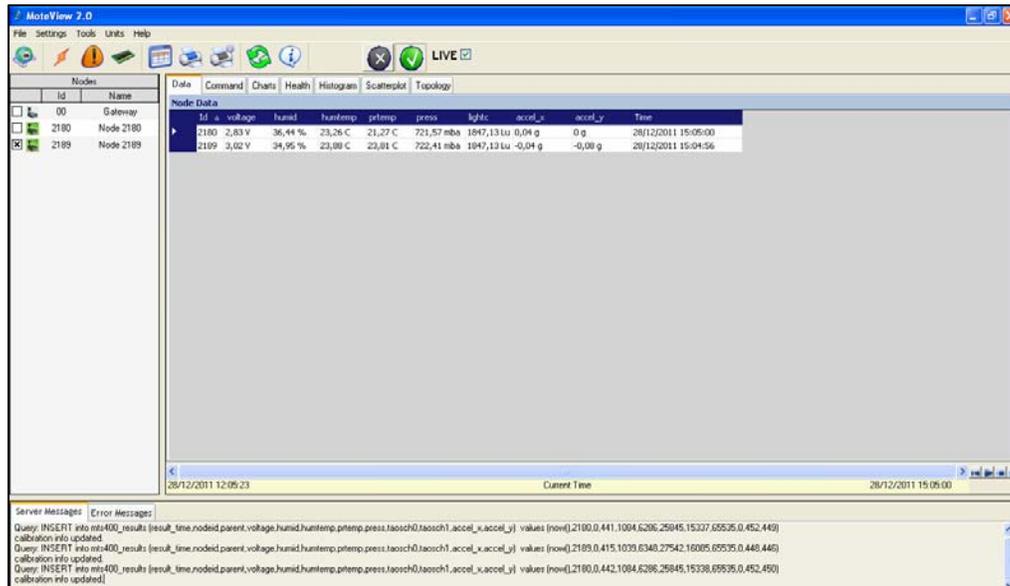


Figura 42 Datos de sensores

- Gráfico de análisis de comunicación Sensor – Gateway

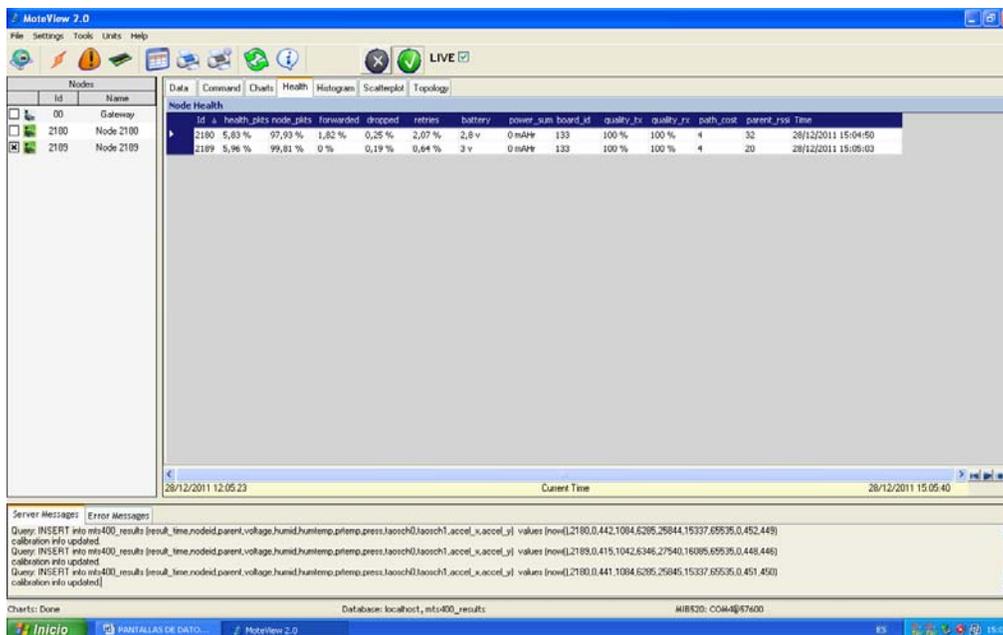


Figura 43 Datos Análisis Comunicación Sensor – Gateway

- Topología de red de sensores

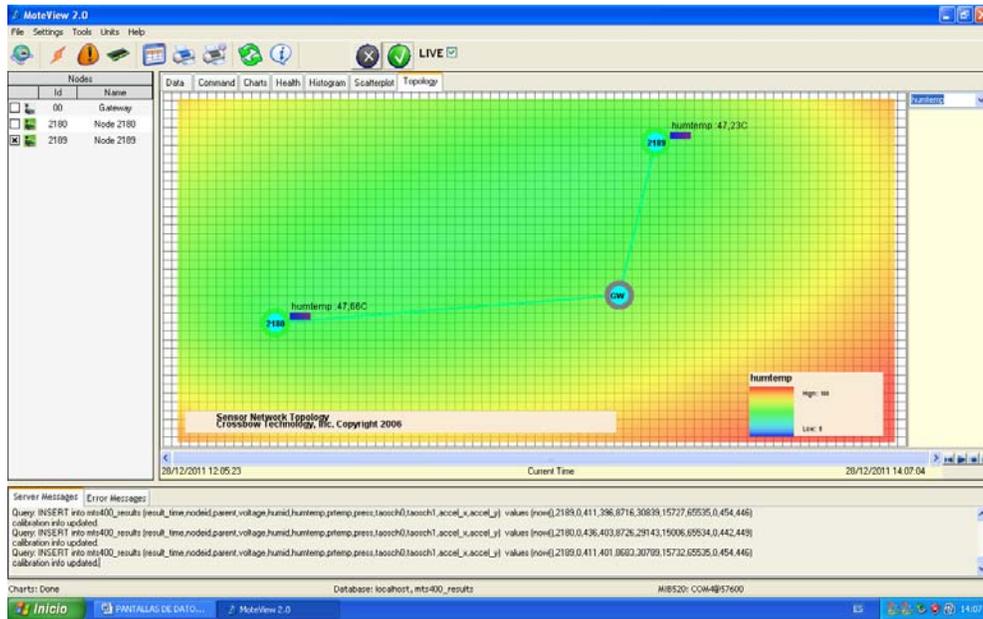


Figura 44 Topología de Red

- Esquema gráfico de temperatura, voltaje y presión.

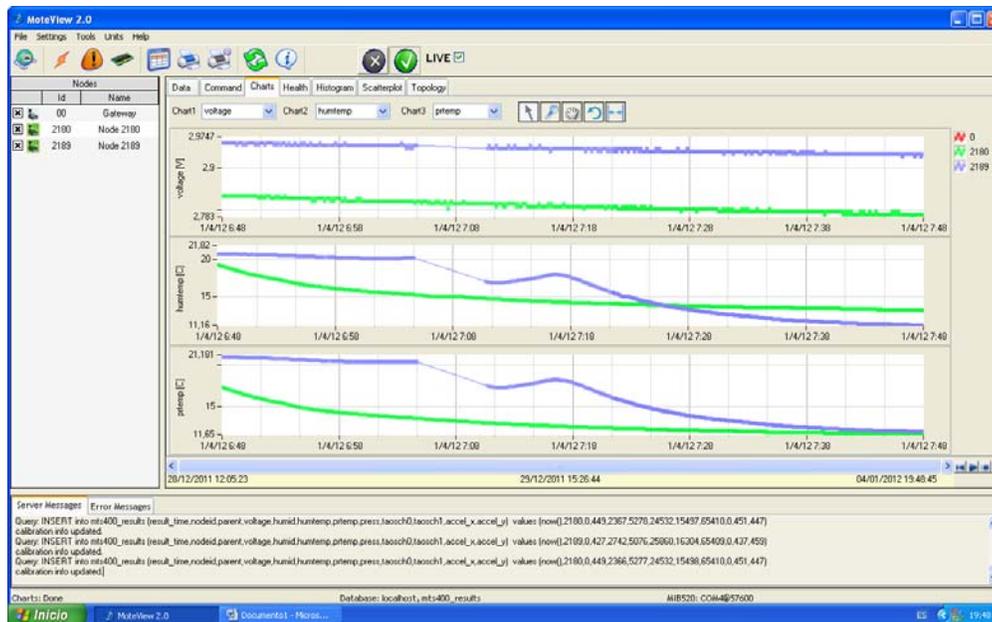


Figura 45 Comportamiento gráfico de variación de temperatura, presión y voltaje de los sensores

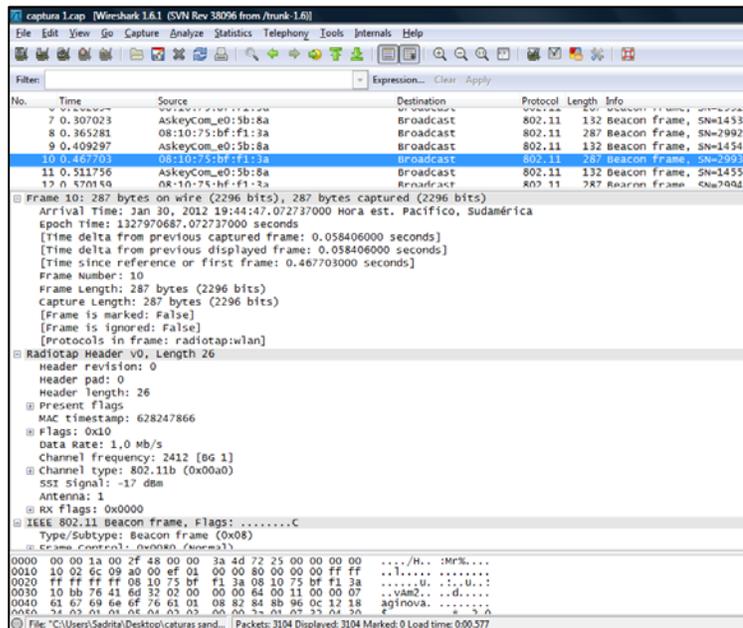
## ANEXO 2

### **DISTANCIA DE NODOS HACIA EL AP Y % PAQUETES TRANSMITIDOS Y PERDIDOS DURANTE LA TRANSMISIÓN.**

Como habíamos dicho anteriormente, las distancias escogidas para el análisis del indicador uno, son aleatorias y se encuentran dentro del rango del alcance de transmisión. Para la realización de las pruebas, en ambos casos, se mantuvieron fijos el AP para wifi y el Gateway para zigbee, solamente se procedió a mover el sensor variando la distancia.

- **Distancia: 1 Metro, Tráfico wifi**

Utilizando el analizador de red Wireshark obtuvimos los siguientes datos.



Se enviaron y se recibieron 2296 bits, lo que significa que se obtuvo el 100% de paquetes transmitidos y 0% de paquetes perdidos.

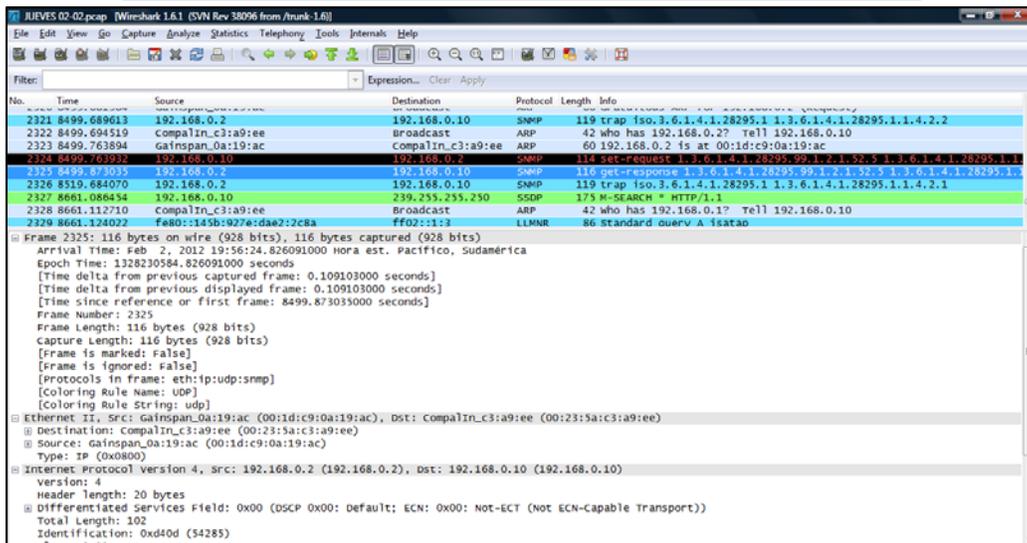
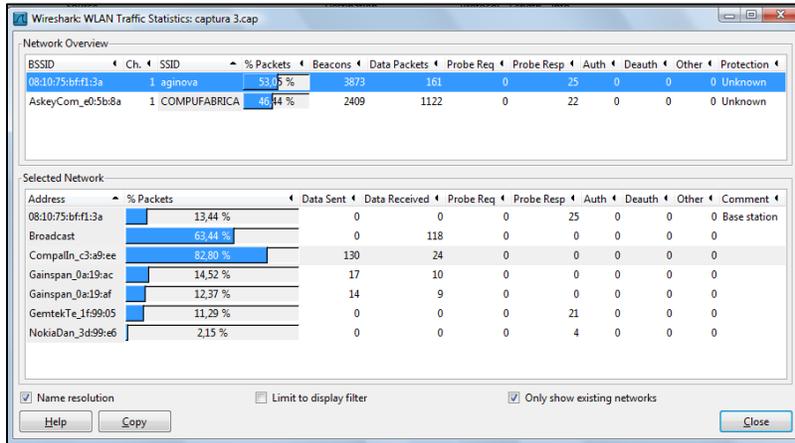
- **Distancia: 1 Metro, Tráfico zigbee**

Utilizando el analizador de paquetes propio del fabricante MoteView, procedemos a obtener los siguientes resultados:



Para el tráfico zigbee tenemos que para el sensor con ID 2189 se recibieron el 99,70% de paquetes y el 0,30% de paquetes se perdieron.

- **Distancia: 30 Metros, Tráfico wifi**



- **Distancia: 30 Metros, Tráfico zigbee**

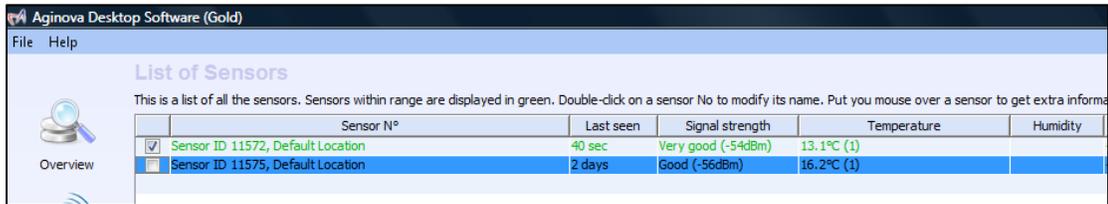


A una distancia de 30 metros con los sensores wifi se pierden más del 50% de los datos, mientras que con zigbee tenemos una transmisión de paquetes correctamente del 97,32% y el 2,68% de paquetes perdidos.

## **DISPONIBILIDAD DE SERVICIO, POTENCIA DE LA SEÑAL Y CONEXIÓN DE NODOS**

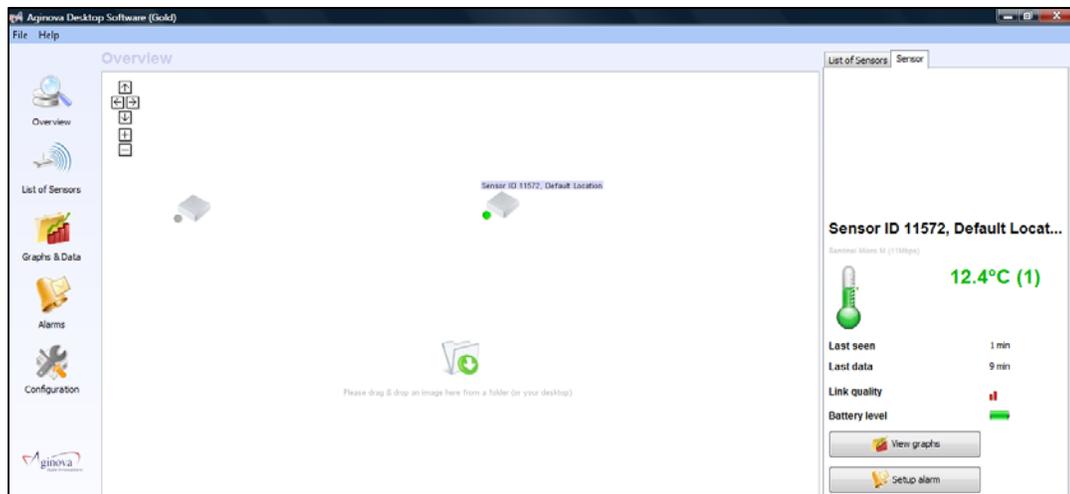
Para la verificación de datos en este indicador tomamos en cuenta los datos proporcionados por el software de visualización Aginova Sensor Desktop (wifi) y MoteView (zigbee), de la misma manera vamos variando la distancia para observar el comportamiento de ciertos parámetros.

- **Wifi: Muy buena señal a 6 metros**



Sensor N°	Last seen	Signal strength	Temperature	Humidity
✓ Sensor ID 11572, Default Location	40 sec	Very good (-54dBm)	13.1°C (1)	-
☐ Sensor ID 11575, Default Location	2 days	Good (-56dBm)	16.2°C (1)	-

- **Wifi: Sin Cobertura, a 30 metros**



Sensor N°	Last seen	Signal strength	Temperature	Humidity
✓ Sensor ID 11572, Default Location	1 min 40s	Weak (-73dBm)	12.4°C (1)	-
☐ Sensor ID 11575, Default Location	2 days	Good (-56dBm)	16.2°C (1)	-

Los sensores wifi tienen mejor cobertura, potencia y sensibilidad a reconexión con el AP a cortas distancias mientras que a mayor distancia mayor será cantidad de veces que tiene que descubrir donde se encuentra el AP de su red.

- **Zigbee: Muy buena señal a 6 metros**

Node Health													
Id	health_pkts	node_pkts	forwarded	dropped	retries	battery	power_sum	board_id	quality_tx	quality_rx	path_cost	parent_rssi	Time
2180	6,25 %	98,3 %	0 %	1,7 %	2,84 %	2,8 v	0 mAh	133	100 %	100 %	4	181	04/01/2012 19:03:56
2189	6,08 %	99,54 %	0 %	0,46 %	2,13 %	2,9 v	0 mAh	133	100 %	100 %	4	164	04/01/2012 19:03:11

- **Zigbee: Muy buena señal a 30 metros**

Node Health													
Id	health_pkts	node_pkts	forwarded	dropped	retries	battery	power_sum	board_id	quality_tx	quality_rx	path_cost	parent_rssi	Time
2180	5,94 %	99,88 %	0 %	0,12 %	1,2 %	2,7 v	0 mAh	133	100 %	100 %	4	32	04/01/2012 23:29:18
2189	5,68 %	98,3 %	0 %	1,7 %	14,31 %	2,8 v	0 mAh	133	100 %	100 %	4	29	04/01/2012 23:28:32

Los sensores zigbee responden de mejor manera a la distancia a la cual pueden ofrecer las mejores características para la conexión, potencia de la señal y sobretodo es mejor el nivel de sensibilidad del receptor.

Seguimos probando hasta alcanzar una distancia de:

- **Zigbee: Señal a 70 metros**

The top screenshot shows Node Health data for nodes 00, 2180, and 2189 at 70 meters distance.

Node Health													
Id	health_pkts	node_pkts	forwarded	dropped	retries	battery	power_sum	board_id	quality_tx	quality_rx	path_cost	parent_rssi	Time
2180	6,16 %	97,95 %	0 %	2,05 %	1,37 %	2,8 v	0 mAh	133	80 %	93,33 %	6	31	29/12/2011 13:52:24
2189	6,17 %	98,15 %	0 %	1,85 %	0,62 %	3 v	0 mAh	133	100 %	100 %	4	24	29/12/2011 13:54:48

The bottom screenshot shows Node Data for nodes 00, 2180, and 2189. Node 2180 is highlighted, showing its current status.

Node Data											
Id	voltage	humid	humtemp	prtemp	press	lightc	accel_x	accel_y	Time		
2180	2,85 V	43,89 %	21,88 C	19,93 C	721,99 mba	1847,13 Lu	-0,04 g	-0,28 g	29/12/2011 13:52:47		
2189	3 V	43,51 %	21,97 C	22,06 C	723,16 mba	1847,13 Lu	0,02 g	0 g	29/12/2011 14:01:11		

An Alert Form window is also visible, showing a series of alerts for node 2189's ptemp value exceeding 20.00C.

```

Alert on 29/12/2011 13:48:01 : Node 2189 ptemp value was 21.6172 >= 20.00C
Alert on 29/12/2011 13:49:06 : Node 2189 ptemp value was 21.6172 >= 20.00C
Alert on 29/12/2011 13:50:10 : Node 2189 ptemp value was 21.6594 >= 20.00C
Alert on 29/12/2011 13:51:15 : Node 2189 ptemp value was 21.7016 >= 20.00C
Alert on 29/12/2011 13:52:19 : Node 2189 ptemp value was 21.7227 >= 20.00C
Alert on 29/12/2011 13:53:24 : Node 2189 ptemp value was 21.7508 >= 20.00C
Alert on 29/12/2011 13:54:28 : Node 2189 ptemp value was 21.8 >= 20.00C
Alert on 29/12/2011 13:55:33 : Node 2189 ptemp value was 21.8422 >= 20.00C
  
```

Como podemos observar la comunicación a esta distancia prácticamente el sensor con ID 2180 perdió conexión con el Gateway o nodo master, los indicadores de calidad de transmisión y recepción ya muestran valores entre el 80 a 90%, y como dato, el software

MoteView dejó de actualizar los nuevos valores, por lo tanto de manera gráfica nos dice que no lo encuentra en la red.

## **TRANSMISION DE INFORMACION SEGÚN EL VOLTAJE**

Esta prueba se realizó utilizando dos mecanismos:

- ✓ **Datos obtenidos con el Software Aginova Sensor Desktop (wifi) y MoteView (zigbee).**
- ✓ **Datos obtenidos con un multímetro digital.**

- **Wifi: Valores de Voltajes**

**List of Sensors**  
This is a list of all the sensors. Sensors within range are displayed in green. Double-click on a sensor to modify its name. Put your mouse over a sensor to get extra information.

Sensor N°	Last seen	Signal strength	Temperature	Humidity	Information
✓ Sensor ID 11575, Default Location	40 sec	Very good (-54dBm)	13.1°C (1)	-	-
■ Sensor ID 11575, Default Location	2 days	Good (-96dBm)	16.2°C (1)	-	-

**Sensor ID 11575**  
Sentinel Micro M (11Mbps) - External 10K probe

IP address:	N/A	MAC:	00:1d:c9:0a:19:a1	Avg Uptime (1 day):	0.0%
Heartbeats:	190s	Sampling:	300s	Avg Uptime (1 week):	0.0%
Configuration:	350s	Voltage:	3.6V	Avg Assoc. Period:	15040 s
Stored on sensor:	-	Config success (short):	-%	Avg Assoc. Period (1 day):	3485%
Firmware:	5.9.5	Resets:	0	Avg Assoc. Period (1 week):	3485%
Uptime:	-	AP MAC (last):	08:10:75:b1f1:3a (ch. 1)		

**List of Sensors**  
This is a list of all the sensors. Sensors within range are displayed in green. Double-click on a sensor to modify its name. Put your mouse over a sensor to get extra information.

Sensor N°	Last seen	Signal strength	Temperature	Humidity	Information
✓ Sensor ID 11575, Default Location	30 sec	Weak (-74dBm)	12.4°C (1)	-	-
■ Sensor ID 11575, Default Location	2 days	Good (-96dBm)	16.2°C (1)	-	-

**Sensor ID 11575**  
Sentinel Micro M (11Mbps) - External 10K probe

IP address:	N/A	MAC:	00:1d:c9:0a:19:a1	Avg Uptime (1 day):	0.0%
Heartbeats:	190s	Sampling:	300s	Avg Uptime (1 week):	0.0%
Configuration:	350s	Voltage:	3.6V	Avg Assoc. Period:	15040 s
Stored on sensor:	-	Config success (short):	-%	Avg Assoc. Period (1 day):	3485%
Firmware:	5.9.5	Resets:	0	Avg Assoc. Period (1 week):	3485%
Uptime:	-	AP MAC (last):	08:10:75:b1f1:3a (ch. 1)		

Realizando esta prueba nos podemos dar cuenta que con conexión y sin conexión con el AP seguimos teniendo el mismo nivel de voltaje de 3,6 V. Pero esto también significa que al no tener conexión el nodo, este va a consumir mas voltaje porque necesita enviar y recibir tramas de reconocimiento y saber que todavía se encuentra dentro de la red.

- **Zigbee: Valores de Voltajes**

The screenshot shows the MoteView 2.0 interface with the 'Data' tab selected. The 'Node Data' table displays the following information:

Id	voltage	humid	humtemp	prtemp	press	lightc	accel_x	accel_y	Time
2189	3,06 V	7,12 %	69,62 C	68,31 C	698,55 mba	1847,13 Lu	0,16 g	-0,12 g	28/12/2011 13:26:46
2180	2,87 V	8,06 %	69,75 C	66,9 C	705,26 mba	1847,13 Lu	-0,48 g	-0,14 g	28/12/2011 13:26:42

The screenshot shows the MoteView 2.0 interface with the 'Health' tab selected. The 'Node Health' table displays the following information:

Id	health_pkts	node_pkts	forwarded	dropped	retries	battery	power_sum	board_id	quality_tx	quality_rx	path_cost
2180	5,77 %	96,6 %	2,99 %	0,41 %	2,58 %	2,8 v	0 mAhr	133	86,67 %	100 %	5
2189	5,98 %	99,68 %	0 %	0,32 %	0,53 %	3 v	0 mAhr	133	100 %	100 %	4

Tomando en cuenta los valores de los dos gráficos tenemos que si el valor de voltaje es de 3,0 V, la transmisión de la información es del 99,68%, mientras que cuando el valor del voltaje es de 2,8 V, la transmisión de la información es del 96,6%, además la calidad de transmisión y recepción es muy buena.

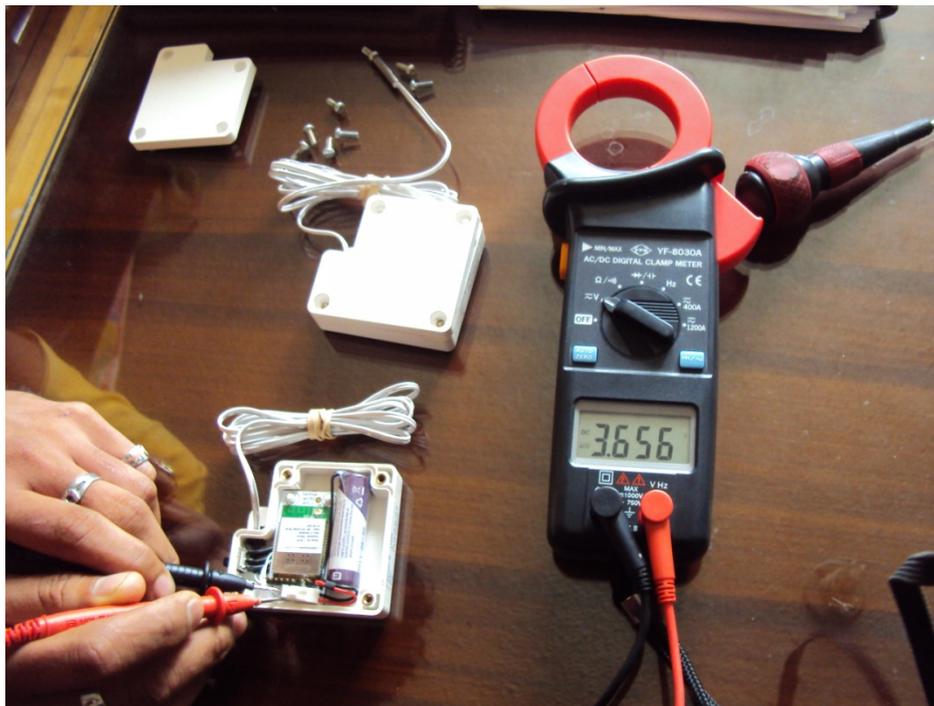
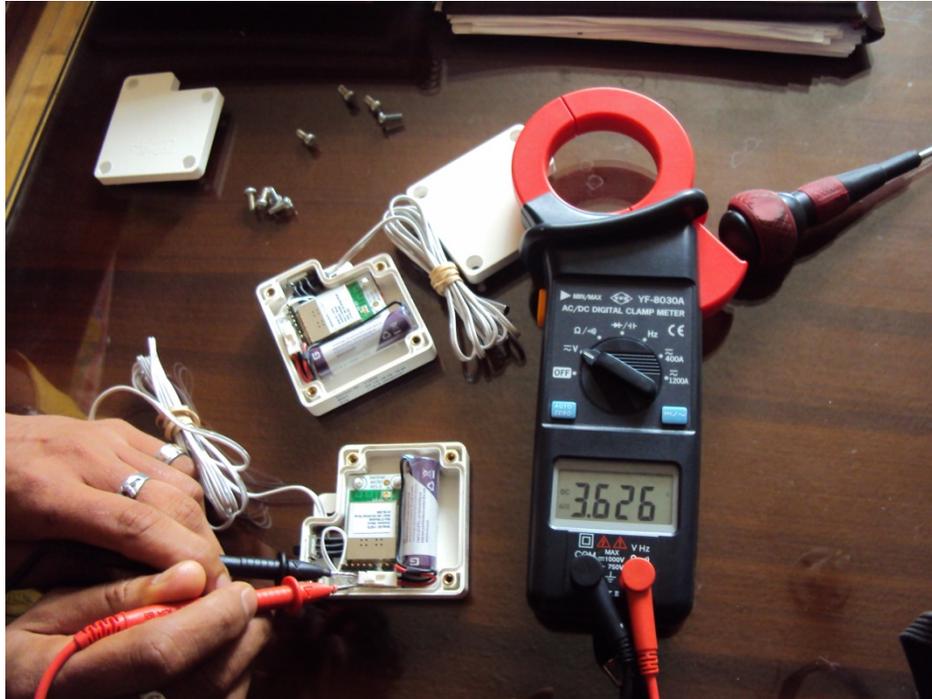
Con el siguiente gráfico, concluimos que aunque el nivel de voltaje siga siendo el mismo 2,8 V el sensor de Id 2180, ya no tiene conexión con el nodo master, por tanto no existe transmisión.

The screenshot shows the MoteView 2.0 interface with the 'Data' tab selected. The 'Node Data' table displays the following information:

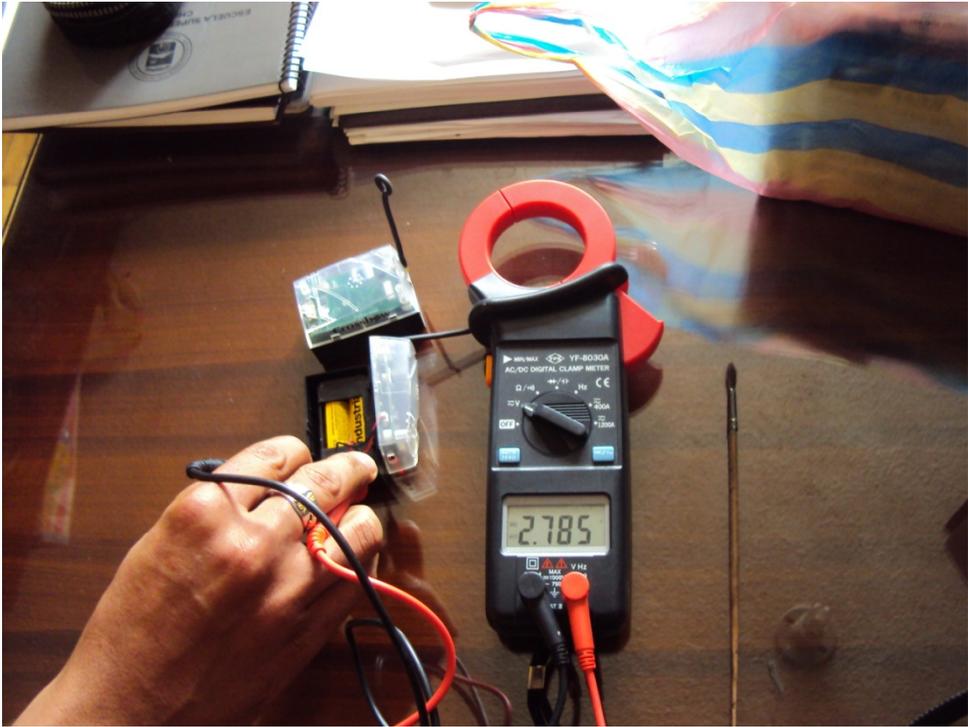
Id	voltage	humid	humtemp	prtemp	press	lightc	accel_x	accel_y	Time
2180	2,85 V	43,89 %	21,88 C	19,93 C	721,99 mba	1847,13 Lu	-0,04 g	-0,28 g	29/12/2011 13:52:47
2189	3 V	43,51 %	21,97 C	22,06 C	723,16 mba	1847,13 Lu	0,02 g	0 g	29/12/2011 14:01:11

## Valores Tomados con un multímetro Digital

- Sensores Wifi – Multímetro Digital



- Sensores Zigbee – Multímetro Digital



## ANEXO 3

### INSTALCION SOFTWARE AGINOVA SENSOR DESKTOP

La instalación es muy fácil.



## BATERIA SENSORES WIFI



### Improper configuration can dramatically reduce battery life!

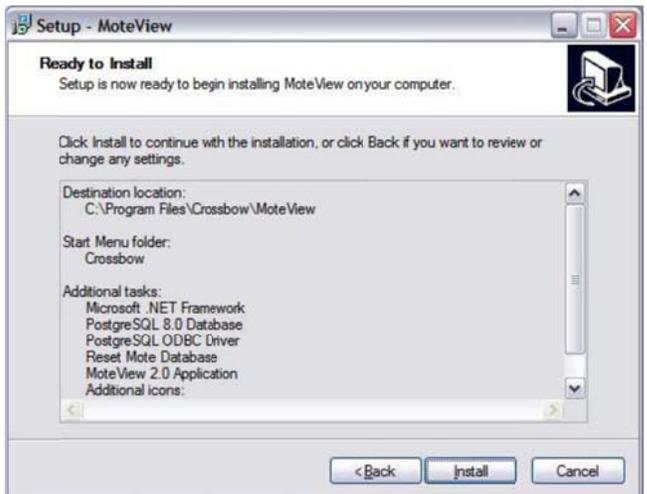
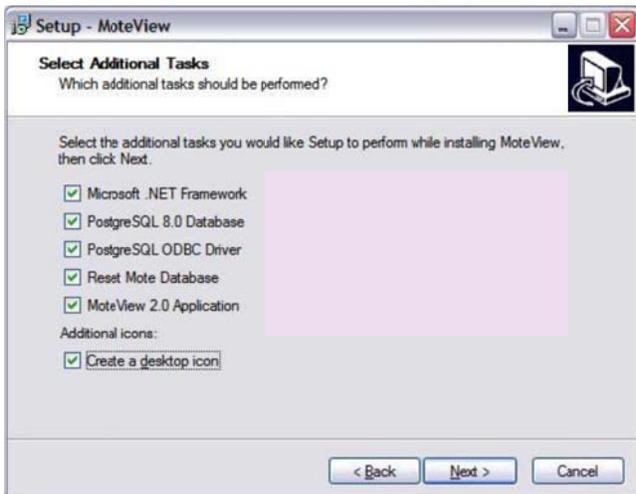
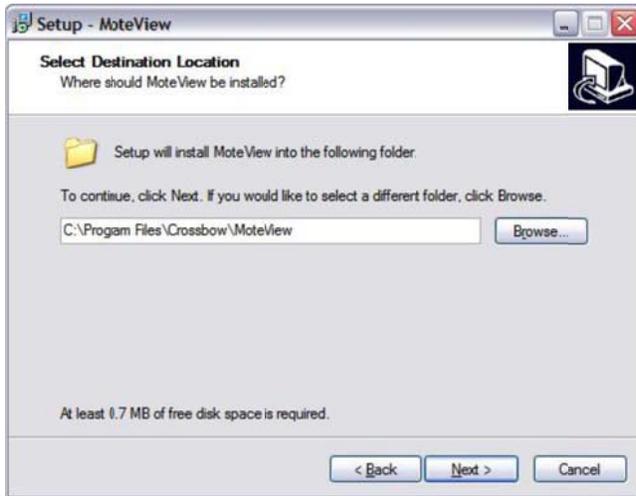
The following table lists important factors:

<b>Association Period</b>	<p>Verify the average association period on the Portal (Ch. 1 of Web Portal Admin Guide), WiBox (Ch. 4 of WiBox guide) or Desktop Software.</p> <p>Modify your access point settings to avoid de-authentications by:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- increasing the key update interval</li><li>- increasing or removing any session timeout</li><li>- increasing or removing any idle timeout</li></ul> <p>Please refer to the Access Point Configuration Guide for more information (on Aginova support web site).</p>
<b>Signal Strength (RSSI) and Signal-to-noise ratio</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Quick setup guide</li><li>• Download Desktop Software (if you ordered it)</li></ul>
<b>Heartbeat, sampling, linkup &amp; configuration update values</b>	<p>Using lower heartbeat/sampling/configuration/linkup periods than default 120/60/600/60 can reduce battery life.</p> <p>Verify estimated full battery life on the Aginova Software.</p>
<b>Bitrate settings</b>	<p>802.11 Sensors: rates of 1&amp;2Mbps must be supported.</p> <p>802.11b Sensors: rates of 11Mbps must be supported.</p>

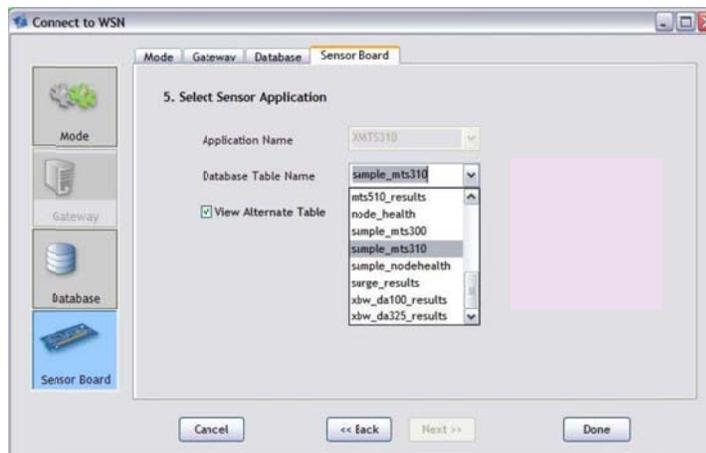
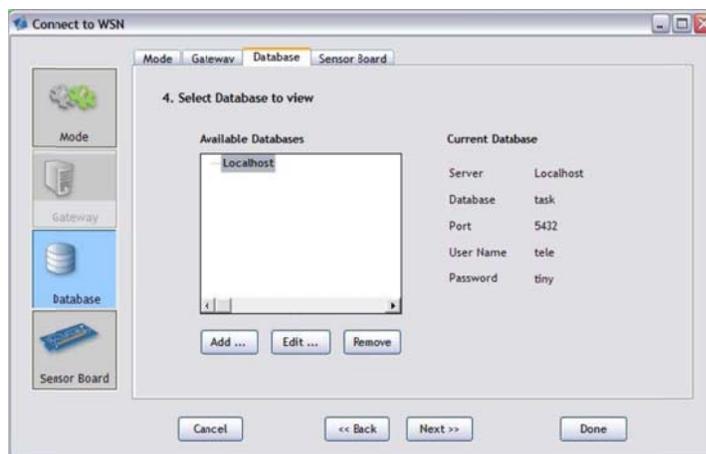
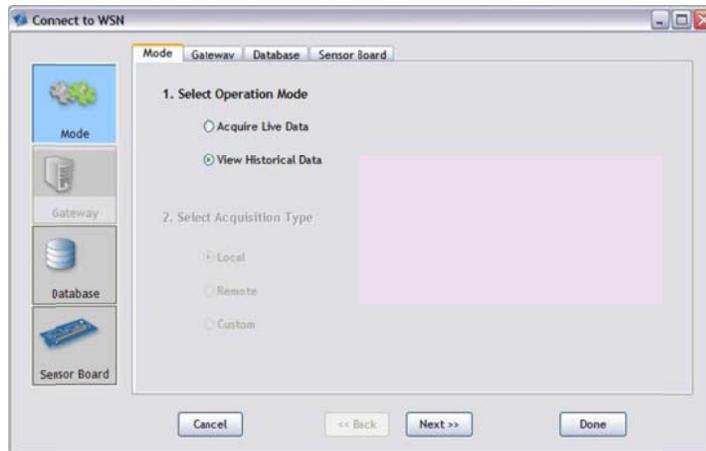
## ANEXO 4

### PASOS PARA LA INSTALACION DEL SOFTWARE MOTEVIEW

La instalación del software es muy fácil, solo hay que seguir las instrucciones del mismo.



## PASOS PARA LA CONFIGURACION DE LOS SENSORES INALAMBRICOS ZIGBEE EN MOTEVIEW



## BATERIA SENSORES ZIGBEE

Table 6-3. Estimate of battery life operation for a Mote.

SYSTEM SPECIFICATIONS		
Currents		Example Duty Cycle
Processor		
Current (full operation)	8 mA	1
Current sleep	8 $\mu$ A	99
Radio		
Current in receive	8 mA	0.75
Current transmit	12 mA	0.25
Current sleep	2 $\mu$ A	99
Logger Memory		
Write	15 mA	0
Read	4 mA	0
Sleep	2 $\mu$ A	100
Sensor Board		
Current (full operation)	5 mA	1
Current sleep	5 $\mu$ A	99
Computed mA-hr used each hour		
Processor		0.0879
Radio		0.0920
Logger Memory		0.0020
Sensor Board		0.0550
<b>Total current (mA-hr) used</b>		<b>0.2369</b>
Computed battery life vs. battery size		
Battery Capacity (mA-hr)		Battery Life (months)
250		1.45
1000		5.78
3000		17.35

◀ **NOTE:** In most Mote applications, the processor and radio run for a brief period of time, followed by a sleep cycle. During sleep, current consumption is in the micro-amps as opposed to milli-amps. This results in very low-current draw the majority of the time, and short duration spikes while processing, receiving, and transmitting data. This method extends battery life; however, due to the current surges, it reduces specified battery capacity. Battery capacity is typically specified by the manufacturer for a constant nominal current drawn.

## ANEXO 5

### VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN CHI CUADRADO ( $\chi^2$ ).

gl	0.975	0.950	0.050	0.025	gl	0.975	0.950	0.050	0.025	gl	0.975	0.950	0.050	0.025
1	0.000	0.004	3.841	5.024	51	33.16	35.60	68.669	72.616	101	75.084	78.813	125.45	130.70
2	0.051	0.103	5.991	7.378	52	33.96	36.43	69.832	73.810	102	75.946	79.697	126.57	131.83
3	0.216	0.352	7.815	9.348	53	34.77	37.27	70.993	75.002	103	76.809	80.582	127.68	132.97
4	0.484	0.711	9.488	11.14	54	35.58	38.11	72.153	76.192	104	77.672	81.468	128.80	134.11
5	0.831	1.145	11.07	12.83	55	36.39	38.95	73.311	77.380	105	78.536	82.354	129.91	135.24
6	1.237	1.635	12.59	14.44	56	37.21	39.80	74.468	78.567	106	79.401	83.240	131.03	136.38
7	1.690	2.167	14.06	16.01	57	38.02	40.64	75.624	79.752	107	80.267	84.127	132.14	137.51
8	2.180	2.733	15.50	17.53	58	38.84	41.49	76.778	80.936	108	81.133	85.015	133.25	138.65
9	2.700	3.325	16.91	19.02	59	39.66	42.33	77.930	82.117	109	82.000	85.903	134.36	139.78
10	3.247	3.940	18.30	20.48	60	40.48	43.18	79.082	83.298	110	82.867	86.792	135.48	140.91
11	3.816	4.575	19.67	21.92	61	41.30	44.03	80.232	84.476	111	83.735	87.681	136.59	142.04
12	4.404	5.226	21.02	23.33	62	42.12	44.88	81.381	85.654	112	84.604	88.570	137.70	143.18
13	5.009	5.892	22.36	24.73	63	42.95	45.74	82.529	86.830	113	85.473	89.460	138.81	144.31
14	5.629	6.571	23.68	26.11	64	43.77	46.59	83.675	88.004	114	86.342	90.351	139.92	145.44
15	6.262	7.261	24.99	27.48	65	44.60	47.45	84.821	89.177	115	87.213	91.242	141.03	146.57
16	6.908	7.962	26.29	28.84	66	45.43	48.30	85.965	90.349	116	88.084	92.134	142.13	147.70
17	7.564	8.672	27.58	30.19	67	46.26	49.16	87.108	91.519	117	88.955	93.026	143.24	148.82
18	8.231	9.390	28.86	31.52	68	47.09	50.02	88.250	92.688	118	89.827	93.918	144.35	149.95
19	8.907	10.11	30.14	32.85	69	47.92	50.87	89.391	93.856	119	90.700	94.811	145.46	151.08
20	9.591	10.85	31.41	34.17	70	48.75	51.73	90.531	95.023	120	91.573	95.705	146.56	152.21
21	10.28	11.59	32.67	35.47	71	49.59	52.60	91.670	96.189	121	92.446	96.598	147.67	153.33
22	10.98	12.33	33.92	36.78	72	50.42	53.46	92.808	97.353	122	93.320	97.493	148.77	154.46
23	11.68	13.09	35.17	38.07	73	51.26	54.32	93.945	98.516	123	94.195	98.387	149.88	155.58
24	12.40	13.84	36.41	39.36	74	52.10	55.18	95.081	99.678	124	95.070	99.283	150.98	156.71
25	13.12	14.61	37.65	40.64	75	52.94	56.05	96.217	100.83	125	95.946	100.17	152.09	157.83
26	13.84	15.37	38.88	41.92	76	53.78	56.92	97.351	101.99	126	96.822	101.07	153.19	158.96
27	14.57	16.15	40.11	43.19	77	54.62	57.78	98.484	103.15	127	97.698	101.97	154.30	160.08
28	15.30	16.92	41.33	44.46	78	55.46	58.65	99.617	104.31	128	98.576	102.86	155.40	161.20
29	16.04	17.70	42.55	45.72	79	56.30	59.52	100.74	105.47	129	99.453	103.76	156.50	162.33
30	16.79	18.49	43.77	46.97	80	57.15	60.39	101.87	106.62	130	100.33	104.66	157.61	163.45
31	17.53	19.28	44.98	48.23	81	57.99	61.26	103.01	107.78	131	101.21	105.56	158.71	164.57
32	18.29	20.07	46.19	49.48	82	58.84	62.13	104.13	108.93	132	102.08	106.45	159.81	165.69
33	19.04	20.86	47.40	50.72	83	59.69	63.00	105.26	110.09	133	102.96	107.35	160.91	166.81
34	19.80	21.66	48.60	51.96	84	60.54	63.87	106.39	111.24	134	103.84	108.25	162.01	167.93
35	20.56	22.46	49.80	53.20	85	61.38	64.74	107.52	112.39	135	104.72	109.15	163.11	169.05
36	21.33	23.26	50.99	54.43	86	62.23	65.62	108.64	113.54	136	105.60	110.05	164.21	170.17
37	22.10	24.07	52.19	55.66	87	63.08	66.49	109.77	114.69	137	106.49	110.95	165.31	171.29
38	22.87	24.88	53.38	56.89	88	63.94	67.37	110.89	115.84	138	107.37	111.85	166.41	172.41
39	23.65	25.69	54.57	58.12	89	64.79	68.24	112.02	116.98	139	108.25	112.75	167.51	173.53
40	24.43	26.50	55.75	59.34	90	65.64	69.12	113.14	118.13	140	109.13	113.65	168.61	174.64
41	25.21	27.32	56.94	60.56	91	66.50	70.00	114.26	119.28	141	110.02	114.56	169.71	175.76
42	25.99	28.14	58.12	61.77	92	67.35	70.88	115.39	120.42	142	110.90	115.46	170.80	176.88
43	26.78	28.96	59.30	62.99	93	68.21	71.76	116.51	121.57	143	111.78	116.36	171.90	177.99
44	27.57	29.78	60.48	64.20	94	69.06	72.64	117.63	122.71	144	112.67	117.26	173.00	179.11
45	28.36	30.61	61.65	65.41	95	69.92	73.52	118.75	123.85	145	113.55	118.17	174.10	180.22
46	29.16	31.43	62.83	66.61	96	70.78	74.40	119.87	125.00	146	114.44	119.07	175.19	181.34
47	29.95	32.26	64.00	67.82	97	71.64	75.28	120.99	126.14	147	115.32	119.97	176.29	182.45
48	30.75	33.09	65.17	69.02	98	72.50	76.16	122.10	127.28	148	116.21	120.88	177.39	183.57
49	31.55	33.93	66.33	70.22	99	73.36	77.04	123.22	128.42	149	117.09	121.78	178.48	184.68
50	32.35	34.76	67.50	71.42	100	74.22	77.92	124.34	129.56	150	117.98	122.69	179.58	185.80