

RAE

1. **TIPO DE DOCUMENTO:** Trabajo de Grado para optar al título de los programas de Ingeniería Electrónica e Ingeniería de Telecomunicaciones
2. **TÍTULO:** DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE ADQUISICIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES EN CULTIVOS HIDROPÓNICOS DE LECHUGA, MEDIANTE UNA RED DE SENSORES, UTILIZANDO UN SISTEMA EMBEBIDO
3. **AUTOR:** Jazmin Carolina Ortega Ortiz
4. **LUGAR:** Bogotá, D.C.
5. **FECHA:** Junio de 2014
6. **PALABRAS CLAVE:** Redes inalámbrica de sensores, cultivos hidropónicos, sistemas embebidos, ZigBee, estándar IEEE 802.15. 4
7. **DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** El objetivo principal de este trabajo es un sistema de monitorización de humedad relativa y temperatura ambiente en un cultivo hidropónico de lechuga, para tener un diagnóstico de las condiciones ambientales de las variables a estudiar. Para esto se analizan diferentes estrategias para generar el sistema de monitorización mediante las redes de área personal y la técnica hidropónica de sustrato para los cultivos hidropónicos, así mismo se realizan pruebas de campo con el algoritmo de visualización de los datos y procesamiento de las señales ambientales antes descritas por medio del sistema embebido RaspberryPi. Se presenta detalladamente todos los aspectos ingenieriles del diseño de las tarjetas de adquisición, incluyendo diagramas de programación, simulaciones de la red inalámbrica de sensores y resultados obtenidos.
8. **LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN:** Líneas de investigación de la USB: *Análisis y procesamiento de señales (APS)*: en el núcleo problemático de Microelectrónica; y, *Tecnologías de la información y comunicaciones (TIC)*: núcleo problemático Aplicaciones y servicios TIC.
9. **METODOLOGÍA:** La metodología implementada para el desarrollo del proyecto es la CDIO “Concebir, Diseñar, Evaluar implementar y Operar”, mediante un análisis empírico analítico en la línea de investigación de la Universidad de San Buenaventura.
10. **CONCLUSIONES:** En este proyecto se diseñaron las tarjetas de adquisición de las variables ambientales para la captura de los datos de humedad relativa y temperatura ambiente para cada nodo de la red de sensores, mediante la comunicación inalámbrica ZigBee implementando un sistema embebido para el procesamiento de las señales, almacenamiento y visualización de los datos en la fecha y hora actual para cada nodo de la red.

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE ADQUISICIÓN DE VARIABLES
AMBIENTALES EN CULTIVOS HIDROPÓNICOS DE LECHUGA, MEDIANTE
UNA RED DE SENSORES, UTILIZANDO UN SISTEMA EMBEBIDO

JAZMIN CAROLINA ORTEGA ORTIZ

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
Bogotá D.C.
2014

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE ADQUISICIÓN DE VARIABLES
AMBIENTALES EN CULTIVOS HIDROPÓNICOS DE LECHUGA, MEDIANTE
UNA RED DE SENSORES, UTILIZANDO UN SISTEMA EMBEBIDO

JAZMIN CAROLINA ORTEGA ORTIZ

Trabajo de Grado para optar al título de los programas de Ingeniería Electrónica
e Ingeniería de Telecomunicaciones

Director
Ing. Nelson Felipe Rosas Jiménez., M.Sc.

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
Bogotá D.C.
2014

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Bogotá D.C., 12 Junio de 2014

"A mis padres y a mi hermano, José Iván, Mary Luz y Sergio"

“A mis tíos, Jorge y Carmen”

Este trabajo ha sido posible gracias a ellos

Agradecimientos

Mi más sincera gratitud en primer lugar a Dios de quien he recibido la sabiduría necesaria para las metas de vida personal y profesional. Hoy reconozco que la fortaleza para superar momentos difíciles así como el soporte invaluable de tantas personas representadas en seres tan importantes como mi familia y amigos, son un signo de la gracia y bondad de Dios llevada a feliz término en el desarrollo de este proyecto de formación profesional. Mi inmensa gratitud directamente a mis padres por su apoyo financiero y moral para crear y terminar mi proyecto, A mis tíos Carmen y Jorge por ser mis segundos padres, por acompañarme en todos los momentos con su confianza, ayuda y consejos. A pesar de la distancia física, quiero ofrecerles este esfuerzo tangible pues fueron mi motor cada día para entender que mis esfuerzos serían recompensados con la satisfacción del deber cumplido. A doña Teresa y Luisa personas que siempre me recibieron como parte de su familia brindándome consejos los cuales me permitieron crecer como persona.

De igual manera quisiera expresar mi reconocimiento a la Universidad de San Buenaventura no solo por la formación recibida sino por el apoyo material y logístico para el adecuado desarrollo de mi investigación. Especial gratitud para Ing. Nelson Rosas, tutor y guía esencial para el desarrollo ingenieril de mi proyecto de grado. Su confianza e indicaciones pertinentes tendrán un lugar destacado en mi ejercicio profesional. Agradecimientos al grupo de personas de la unidad de mantenimiento por el soporte en el desarrollo agropecuario del proyecto y a los diversos profesores de la Facultad que con mucha paciencia me brindaron pautas importantes.

Finalmente, mis sentimientos de gratitud también para Javier Rodríguez, y Catalina, ellos como compañeros de ruta han contribuido significativamente en mi proceso del proyecto de grado a través de la discusión académica y sentimientos de amistad sinceros.

Contenido

Lista de figuras.....	9
Lista de tablas.....	12
Introducción	15
1. Planteamiento del problema.....	18
1.1 Antecedentes	18
1.2 Descripción y formulación del problema.....	26
1.3 Justificación.....	28
1.4 Objetivos de la investigación	29
1.4.1 Objetivo General	29
1.4.2 Objetivos Específicos.....	29
1.5 Alcances y delimitaciones del proyecto.....	30
2. Marco Teórico y Conceptual.....	32
2.1 Sistemas Embebidos.....	32
2.1.1 Arquitectura.....	32
2.1.2 Aplicaciones.....	34
2.2 Redes de Área Personal o PAN (Personal Area Network)	37
2.3 Wireless Sensor Network (WSN)	40
2.3.1 Arquitectura del Sistema	41
2.3.2 Topologías de red.....	44
2.3.3 Simulación WSN.....	47
2.4 Cultivos hidropónicos	50
2.4.1 Condiciones Medio Ambientales	54
2.4.2 Cultivo de Lechuga	56
2.5 Marco legal.....	57
2.5.1 Normas aplicadas en las WSN	57
2.5.2 Normas prácticas agrícolas	57
3. Metodología	59
4. Desarrollo ingenieril.....	62
4.1 Descripción Técnica del Problema.....	63
4.2 Características cultivo hidropónico.....	64
4.3 Diseño de la red de sensores	74
4.4 Desarrollo y adecuación del sistema electrónico para la captura de las variables climáticas.....	86
4.5 Implementación del Sistema de Comunicaciones.....	110
4.6 Acondicionamiento Sistema Embebido	111
4.7 Desarrollo de la interfaz de visualización	116
4.8 Funcionamiento e integración del Sistema de monitorización	124
5. Implementación del sistema y Análisis de Resultados.....	126

5.1 Resultados Simulación de la WSN	131
5.2 Resultados monitorización de las variables ambientales	135
6. Conclusiones	143
7. Recomendaciones.....	145
Trabajos Futuros.....	146
Bibliografía	147
Anexo A: Script 1caso.tcl	151
Anexo B: Anexos digitales.....	160

Lista de figuras

Figura 1. Esquema general del Sistema de monitorización de variables ambientales del cultivo.....	17
Figura 2. Capacidades sensoriales del proyecto TRACKSS.....	19
Figura 3. Circuito de sistema de monitoreo de la temperatura	19
Figura 4. Resultado del prototipo de monitoreo remoto parámetros fisiológicos.....	20
Figura 5. Arquitectura del sistema general	21
Figura 6. Dispositivos para el monitoreo de la enfermedades crónicas.....	22
Figura 7. Visión abstracta de sistema informático con Tiempo real Linux OS	22
Figura 8. Módulo de los drivers para el control y monitoreo de la temperatura y humedad.....	23
Figura 9. Diagrama del proyecto.....	24
Figura 10. Sistema final del proyecto	25
Figura 11. Galpón avícola Cascabita II y ubicación Nodo	26
Figura 12. Escenario del cultivo.....	31
Figura 13. Arquitectura Sistema Embebido	33
Figura 14. Aplicaciones de los Sistemas Embebidos de acuerdo a la distribución de mercado.....	35
Figura 15. Aplicaciones en diferentes campos.....	36
Figura 16. Tecnologías inalámbricas	38
Figura 17. Comparativa de la robustez de las diferentes tecnologías inalámbricas.....	40
Figura 18. Red inalámbrica de sensores.....	42
Figura 19. Arquitectura nodo inalámbrico	43
Figura 20. Topologías de Red	45
Figura 21. Ejemplo de red ad-hoc	46
Figura 22. Capas componentes de una red de sensores inalámbricos para agricultura....	46
Figura 23. Nutrientes esenciales en hidroponía	56
Figura 24. Etapas de la Metodología.....	59
Figura 25. Etapas para el desarrollo del proyecto	62
Figura 26. Estructura del invernadero	65
Figura 27. Invernadero	65
Figura 28. Componentes sistema de riego	66
Figura 29. Sistema de riego.....	66
Figura 30. Flujo de procesos	67
Figura 31. Dimensiones contenedor sustrato	67
Figura 32. Semillas Lechuga B.S Simpson	69
Figura 33. Germinación	69
Figura 34. Eliminación de plantas dejando una por cavidad.	70
Figura 35. Plántulas listas para el trasplante	70
Figura 36. Trasplante de las plántulas.....	71
Figura 37. Densidad de siembra: Organización plántulas.....	71
Figura 38. Resultado del trasplante	72
Figura 39. Resultados del prototipo	73

Figura 40. Área tomada de referencia 100 m ²	74
Figura 41. Área 25 m ² a simular de la proporción ¼ parte del área 100 m ²	76
Figura 42. Escenario final a implementar para el diseño del prototipo de la red sensores inalámbricos 5m ²	76
Figura 43. Esquema arquitectura red PAN	77
Figura 44. Esquema de la red para el caso - área 5m ²	78
Figura 45. Simulación de la red en NAM	85
Figura 46. Componentes de una WSN.....	86
Figura 47. Adquisición de las variables climáticas.....	88
Figura 48. Salida de Voltaje vs. Temperatura (Sensor TMP36 gráfica b.).....	89
Figura 49. Configuración de pines sensor TMP 36.....	90
Figura 50. Salida voltaje vs humedad relativa a 25 °C y 5Vsupply	90
Figura 51. b) Salida de voltaje vs Temperatura	91
Figura 52. Topología Amplificador no inversor	93
Figura 53. Curva caracterización del sensor de temperatura resultante.....	93
Figura 54. Topología Amplificador no inversor con divisor de tensiones.....	96
Figura 55. Curva caracterización del sensor de humedad relativa resultante	98
Figura 56. Tarjeta para la conexión de los sensores.....	99
Figura 57. Esquema general adecuación de adquisición de las variables climáticas.....	99
Figura 58. Esquema de configuración dispositivo final.....	102
Figura 59. Esquema de configuración dispositivo coordinador.....	103
Figura 60. Estructura específica de una trama API.....	104
Figura 61. Ejemplo de trama de salida.....	105
Figura 62. Datos tomados de la trama.....	106
Figura 63. Circuito esquemático de la tarjeta de adquisición datos	108
Figura 64. Diseño tarjeta Nodos adquisición de datos.....	109
Figura 65. Esquema general para la implementación del Sistema embebido RaspberryPi	111
Figura 66. Principales componentes electrónicos y periféricos RaspberryPi	112
Figura 67. Configuración eth0 static.....	115
Figura 68. Software Code Blocks RaspberryPi.....	118
Figura 69. Diagrama de flujo general del Algoritmo lógico	119
Figura 70. Diagrama de flujo función tiempoActual().....	120
Figura 71. Diagrama de flujo función update	121
Figura 72. Continuación diagrama de flujo función update.....	122
Figura 73. Diagrama de flujo función Draw	123
Figura 74. Esquema del sistema de monitorización para la red PAN	124
Figura 75. Diagrama de bloques de la integración del sistema RaspberryPi con Openframeworks.....	125
Figura 76. Estructura del dispositivo de adquisición para la monitorización	126
Figura 77. Tarjeta sensores	127
Figura 78. Ubicación sensores de medición humedad relativa y temperatura ambiente.....	127
Figura 79. Módulo Coordinador conectado al RaspberryPi.....	128
Figura 80. Prototipo implementado con sus respectivos nodos	129

Figura 81. Estación de monitorización.....	130
Figura 82. Interfaz de visualización de las variables ambientales	131
Figura 83. Visualización de la simulación 1caso.tcl en NS2 Visual Analyzer	133
Figura 84. Paquetes enviados del Nodo1, 2, 3, 4 al nodo destino Nodo0.....	134
Figura 85. Paquetes recibidos de los Nodos 1, 2, 3,4 al nodo destino Nodo0	134
Figura 86. Resultados de los datos del sensor de temperatura nodo 1.....	135
Figura 87. Resultados de los datos del sensor de Humedad relativa nodo 1	136
Figura 88. Resultados de los datos del sensor de temperatura nodo 2.....	136
Figura 89. Resultados de los datos del sensor de Humedad relativa nodo 2	137
Figura 90. Resultados de los datos del sensor de temperatura nodo 3.....	137
Figura 91. Resultados de los datos del sensor de humedad relativa nodo3	138
Figura 92. Resultados de los datos del sensor de temperatura nodo 4.....	138
Figura 93. Resultados de los datos del sensor de humedad relativa nodo 4	139
Figura 94. Proceso de crecimiento de la lechuga.....	140
Figura 95. Resultado lechugas (7 junio 2014) Finalización proceso crecimiento	141

Lista de tablas

Tabla 1. Descripción de los dispositivos de almacenamiento en un SE	34
Tabla 2. Principales grupos de trabajo de la IEEE.....	37
Tabla 3. Tecnologías inalámbricas - transferencia de datos y cobertura	38
Tabla 4. Comparación entre ZigBee- Bluetooth	39
Tabla 5. Comparativa de precios.....	41
Tabla 6. Comparativos herramientas de simulación	49
Tabla 7. Condiciones ideales para la lechuga hidropónica	56
Tabla 8. Requerimientos cultivos lechuga en general.....	57
Tabla 9. Densidad de Siembra	60
Tabla 10. Hidroponía: ventajas y desventajas con respecto a la agricultura tradicional..	64
Tabla 11. Resumen de las consideraciones para el diseño final del prototipo en la red de sensores	77
Tabla 12. Parámetros simulación	83
Tabla 13. Características módulos de transmisión Inalámbrica.....	87
Tabla 14. Características de los conversores A/D del Xbee	88
Tabla 15. Datos resultantes medidos en el sensor TMP36.....	92
Tabla 16. Datos de la salida sensor de humedad HIH 4000 002.....	94
Tabla 17. Datos de la salida sensor de humedad HIH 4000-002 con el acondicionamiento del sensor para adaptarlo al ADC del Xbee.....	97
Tabla 18. Versiones de los elementos de la red	100
Tabla 19. Análisis de la trama.....	105
Tabla 20. Estándares que apoyan la implementación de WSN.....	110
Tabla 21. Promedio de humedad relativa y temperatura ambiente para los nodos	141
Tabla 22. Condiciones en el invernadero comparadas con las condiciones ideales	142

Glosario y Abreviaturas

S.E.: Sistema Embebido.

HW: Hardware.

SW: Software.

E/S: Entrada/Salida.

CPU: Unidad Central de Procesamiento o Central Processing Unit.

PAN: Redes de Área Personal o Personal Area Network.

TIC: Tecnologías de información y comunicación.

ADC: Conversión analógica-digital o Analog-to-digital converter.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers o Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

WSN: Wireless Sensor Networks o Red inalámbrica de sensores

NAM: Network Animator

NS-2: The Network Simulator - 2

Cultivos hidropónicos: Sistema de producción en donde los nutrientes llegan a la planta a través del agua, en forma artificial, y el suelo no participa en la nutrición.

Germinación: f. Bot. Conjunto de fenómenos que se manifiestan cuando la semilla absorbe agua y da origen a una joven planta.

Interfaz Gráfica: Método para facilitar la interacción del usuario con el ordenador, o la computadora a través de la utilización de un conjunto de imágenes y objetos pictóricos además de texto.

Invernadero: Lugar abrigado artificialmente para defender las plantas de la acción del frío.

Microcontrolador: Es un circuito integrado programable que integra en un solo chip las unidades de memoria para el almacenamiento de datos, aritmética lógica para el cálculo de operaciones, las unidades de entrada y salida para comunicación con otros periféricos.

Microelectrónica: Conjunto de Ciencias y técnicas con las que se realizan y fabrican circuitos electrónicos sobre una pastilla de un semiconductor, lo cual formará un circuito integrado (CI).

Redes inalámbricas de sensores: Gran cantidad de pequeños dispositivos, autónomos, distribuidos físicamente, llamados nodos de sensores, instalados alrededor de un fenómeno para ser monitoreado, con la capacidad de almacenar y comunicar datos en una red en forma inalámbrica.

Sistema embebido: Equipos que procesan datos digitalmente y están diseñados para una función específica. Están optimizados para mejorar tamaño, costo, consumo, confiabilidad y desempeño.

Sustrato: Material sólido distinto del suelo, cuyo origen puede ser natural, residual, mineral u orgánico.

ZigBee: Protocolo de comunicaciones inalámbricas basado en el estándar IEEE 802.15.4 y cuya función es solucionar los problemas de interoperabilidad, duración de la batería y costos de los protocolos propietarios.

Introducción

La sociedad contemporánea plantea serios interrogantes al desarrollo de las ciencias. En el caso particular del desarrollo ingenieril, ha existido la necesidad de mantener una constante evolución del saber con el fin de plantear respuestas a dichos interrogantes. En consecuencia, aparte de buscar nuevos desarrollos científicos, existen problemáticas ingenieriles en las cuales se hace fundamental el planteamiento de nuevas perspectivas pensando en la eficacia de los procesos de operación, mantenimiento y reparación. Por ejemplo, diversos actores, implicados en procesos de producción industrial tales como ejecutivos, planificadores, y monitores; se ven en la necesidad de poseer información técnica y propicia con el fin de ejecutar intervenciones oportunas considerando tiempo y recursos.

A pesar de los avances, aún existe disgregación de información esparcida en diversos sistemas tales como histórico, análisis vibratorios, lectura de infrarrojos, análisis de aceites, monitorización en el control de dispositivos, entre otros. A la falta de integración de sistemas para el manejo de información se suma la dificultad de tener que incrementar el recurso humano para cada tipo de proceso así como el gasto de recursos en tiempo y dinero en la realización de tareas de desplazamiento para realizar actividades de diagnóstico, monitorización y ejecución específica.

Las tareas para adquirir la información han tenido entonces un lugar relevante en diversos avances tecnológicos encargados de crear plataformas unificadas para realizar procesos integrales de información en tiempo real ofreciendo a su vez interfaces que permiten acceder de forma remota a todos los servicios de plataformas específicas. Así mismo, la tecnología basada en dispositivos electrónicos capaces de monitorizar el entorno mediante sensores en una determinada área; donde se interconectan de forma inalámbrica con otros semejantes han contribuido con importantes soluciones a la integración de la información. Dicho tipo de tecnología es denominada redes de

sensores inalámbricas (WSN, Wireless Sensor Networks). Estas redes para la sistematización de la información han tenido particular aplicación en la automatización de instalaciones industriales, comerciales, agrícolas, residenciales, transporte, médicas entre otras. Con el tiempo han adquirido mayor importancia, debido a que permiten evolucionar la forma de adquirir información.

Otro aspecto del desarrollo tecnológico frente al manejo de la información en procesos de producción industrial ha sido la aparición de sistemas mediante dispositivos embebidos, los cuales enfocados en tareas específicas, tienen la particularidad de ser cada vez más pequeños y de menor consumo; de mayor alcance en términos de procesos, capacidad de almacenamiento y adaptación a varias interfaces de comunicaciones. Ejemplo de este tipo de tecnología tiene como base sistemas de comunicación tales como Ethernet, WiFi, ZigBee, Z-Wave, y Bluetooth.

Teniendo en cuenta lo anterior, el proyecto de investigación se suscribe dentro de los avances tecnológicos que permiten sistematizar información con el apoyo de redes. El propósito se centra en el desarrollo conjunto de una red de sensores inalámbricas y la utilización de Sistemas Embebidos aplicados a la solución estratégica que permita adquirir, adecuar y transmitir la información de la monitorización de variables ambientales tales como temperatura ambiente y humedad relativa. Dicha red ha sido situada en un invernadero hidropónico de cultivo de lechuga construido y adecuado para tal fin en las instalaciones de la Universidad. En el desarrollo de la red se adopta la implementación del Sistema Embebido RaspberryPi, estableciendo una estación base desde la que los usuarios pueden acceder remotamente para visualizar y analizar la sistematización de los datos recopilados por la red. (Ver Figura 1.)

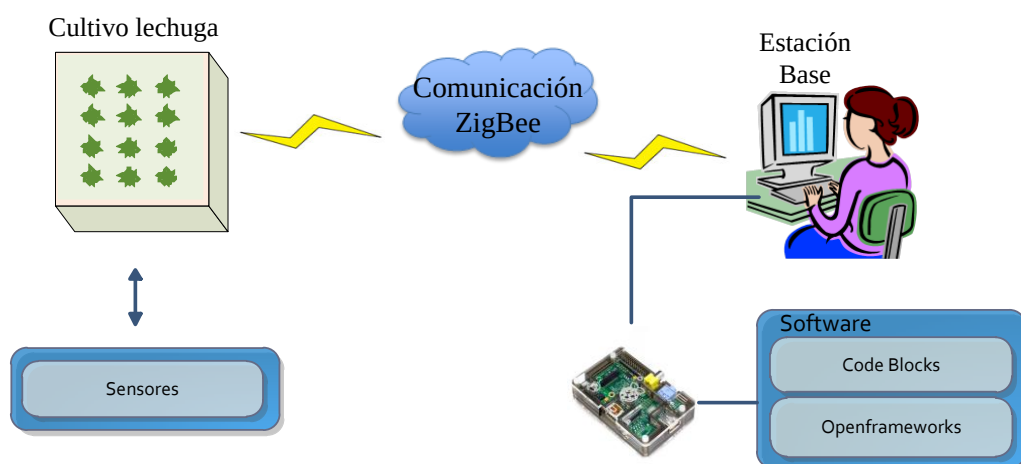


Figura 1. Esquema general del Sistema de monitorización de variables ambientales del cultivo

1. Planteamiento del problema

1.1 Antecedentes

Las redes de comunicaciones es un tema central para el desarrollo del proyecto, específicamente las redes de inalámbricas de sensores. Sin embargo, como se evidencia a continuación cada una de ellas representa características distintivas a través de las cuales se pretende enfocar sus aplicaciones. De esta manera el primer paso es definir el contexto ingenieril en el que se enmarca el desarrollo así como identificar los siguientes antecedentes:

- **“Aplicación de las Redes de Sensores en el entorno vehicular”** (Aransay, 2009)

La distinción central de este tipo de tecnología se enfoca a establecer un entorno inteligente por medio de redes de sensores, las cuales permiten recoger información para transmitirla de forma eficiente. Esto ha generado nuevos servicios que permiten la aplicación de los sensores a nuevos ámbitos. El trabajo de Aransay (2009) constituye un ejemplo pertinente de la aplicación de sensores en el ámbito vehicular. Dicho estudio describe las características de estas redes y además algunas aplicaciones desarrolladas en diferentes campos.

La Figura 2 muestra un gráfico donde las Trackss (Technologies for Road Advanced Cooperative Knowledge Sharing Sensors) tienen por objetivo crear aplicaciones futuras para mejorar la seguridad y eficiencia del transporte haciendo énfasis en la cooperación y fusión sensorial. Como resultado se pretende predecir el flujo de transporte y las condiciones de la infraestructura, el medio ambiente y el tráfico circundante.



Figura 2. Capacidades sensoriales del proyecto TRACKSS

Fuente: Aransay, A. (2009). *Aplicación de las Redes de Sensores en el entorno vehicular*. (p.5)
 Recuperado de <http://www.albertolsa.com/wp-content/uploads/2010/04/rsi-aplicacion-de-las-redes-de-sensores-en-el-entorno-vehicular-alberto-los-santos.pdf>.

- “**Bluetooth Embedded System for Room-Safe Temperature Monitoring**”
 (Loup, 2011)

En su estudio, el autor presenta el desarrollo de un sistema integrado proyectado como una medida de bienestar para sitios de seguridad de los servidores. En esta red el sistema controla la temperatura de una habitación de seguridad y envía un mensaje a través de Bluetooth para apagar los servidores cuando la temperatura ambiente supera los niveles de seguridad.

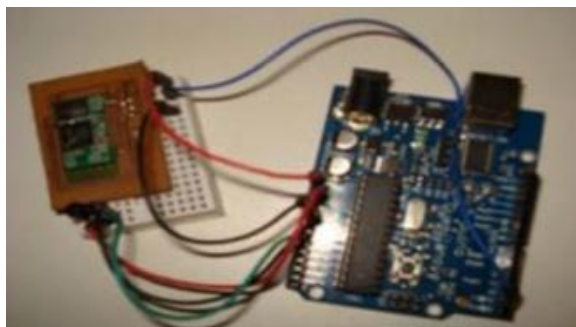


Figura 3. Circuito de sistema de monitoreo de la temperatura

Fuente: Loup, Torres, Milian y Ambrosio. (2011). *Bluetooth Embedded System for Room-Safe Temperature Monitoring* (p.4)

- **“Design of Embedded Remote Monitoring Terminal Based on 3G Network”**
(Zhonbao, 2011)

Como se presenta en el artículo este tipo de red tiene la particularidad de trabajar el terminal del sistema de control remoto embebido y la red 3G. Se implementa en el campo de la medicina para la adquisición de parámetros fisiológicos tales como el ECG, la presión sanguínea, la respiración, oxígeno en sangre, y envía los datos de lectura en tiempo a estación de trabajo médico a distancia para la visualización y el almacenamiento a través de la red 3G.



Figure 5. The prototype of remote monitoring terminal.



Figure 6. The waveform of I lead ECG.

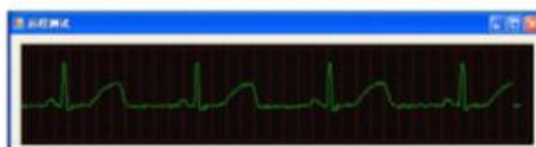


Figure 7. The waveform of II lead ECG.



Figure 8. The waveform of III lead ECG.

Figura 4. Resultado del prototipo de monitoreo remoto parámetros fisiológicos

Fuente: Zhongbao, Chao, Jingsheng y Tianhai. (2011). Design of Embedded Remote Monitoring Terminal Based on 3G Network (p.4)

- **“Design of the Wireless Sensor Network Communication Terminal Based on Embedded Linux”** (Xiaohui & Fanfan, 2011)

La característica principal de este diseño de red utiliza ARM 1176JZ (F)-S como módulo de control central y a su vez el diseño de la estructura general del sistema de acuerdo a las características de la comunicación en redes de sensores inalámbricos. Para el desarrollo de la red se realiza una estructura del sistema de hardware y software del

terminal de comunicación, además se diseña la aplicación basada en el sistema operativo Linux, tal como se puede observar en la Figura 5.

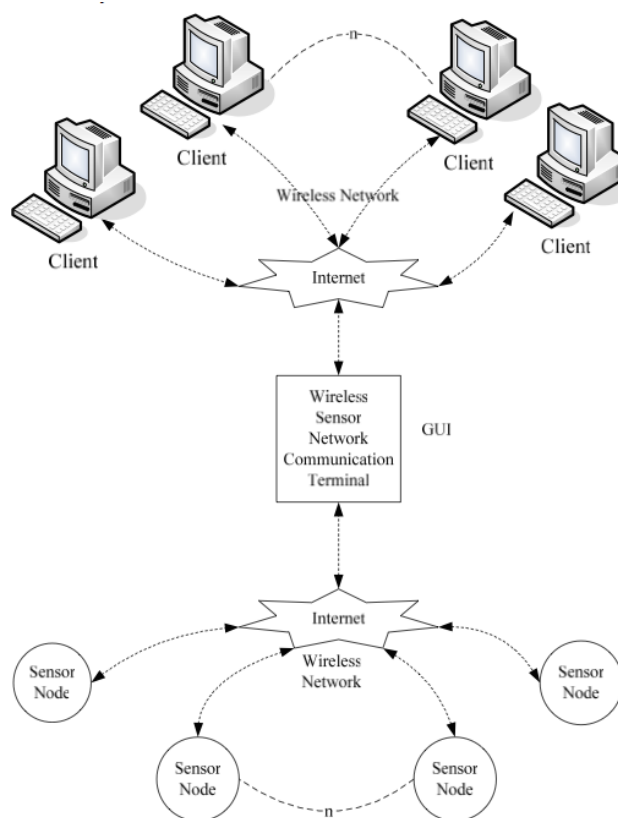


Figura 5. Arquitectura del sistema general

Fuente: Xiaohui & Fanfan. (2011). Design of the Wireless Sensor Network Communication Terminal Based on Embedded Linux (p.1)

- **“Redes de Sensores Inalámbricos Utilizando ZIGBEE/802.15.4”** (Quiroz, s.f)

En este modelo de red de sensores inalámbricos, se muestra la tecnología ZigBee en los diferentes sectores como son la industria, la medicina y control de tráfico lo que evidencia la aplicación de este tipo de redes. En la Figura 6 se muestra como los datos de los signos vitales del paciente, pueden ser monitoreados en tiempo real si el paciente lo amerita o intervalos que pueden ser programados por los médicos esto permite la integración de varias tecnologías entre ellas ZigBee.



Figura 6. Dispositivos para el monitoreo de la enfermedades crónicas.

Fuente: Quiroz. (s.f.). Redes de Sensores Inalámbricos Utilizando ZIGBEE/802.15.4 (p.3). Recuperado de [http://kosmos.upb.edu.co/web/uploads/articulos/\(A\)_Redes_de_Sensores_Inalambricos_Utilizando_ZIGBEE802154_a05yzX_.pdf](http://kosmos.upb.edu.co/web/uploads/articulos/(A)_Redes_de_Sensores_Inalambricos_Utilizando_ZIGBEE802154_a05yzX_.pdf)

- **“Tradeoffs in Implementing an Embedded System Designed for Monitoring and Controlling Temperature and Humidity Using Real Time Linux”**
(Baruah, 2010)

Baruah expone las ventajas y desventajas en la aplicación de software de adquisición de datos desarrollado para un sistema integrado en el seguimiento y control de la temperatura y la humedad que se ejecuta en el sistema operativo Linux en tiempo real. El autor propone una estrategia para la solución de problemas de adquisición de datos asociada con los procesos de software para manipular múltiples y diferentes parámetros físicos del mundo real en un sistema informático.

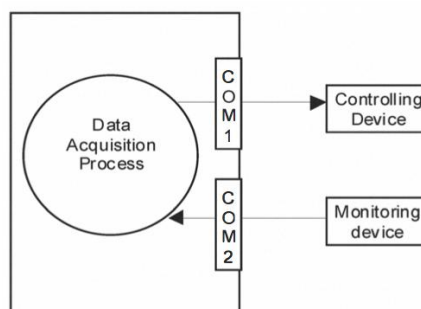


Figura 7. Visión abstracta de sistema informático con Tiempo real Linux OS

Fuente: Tradeoffs in Implementing an Embedded System Designed for Monitoring and Controlling Temperature and Humidity Using Real Time Linux. (p.2)

La Figura 7 muestra una visión abstracta de software de adquisición de datos con el servidor, donde utiliza dos dispositivos mostrados. Un dispositivo monitorea la temperatura y la humedad y envía datos al proceso de seguimiento a través del puerto serial del ordenador. Y el otro dispositivo controla la humedad y temperatura después de recibir la señal de control de proceso a través de otro puerto para que sus valores no sobrepasen ciertos límites. En la Figura 8 se observan los procesos de los módulos de los drivers para la aplicación de monitorización y control respectivamente

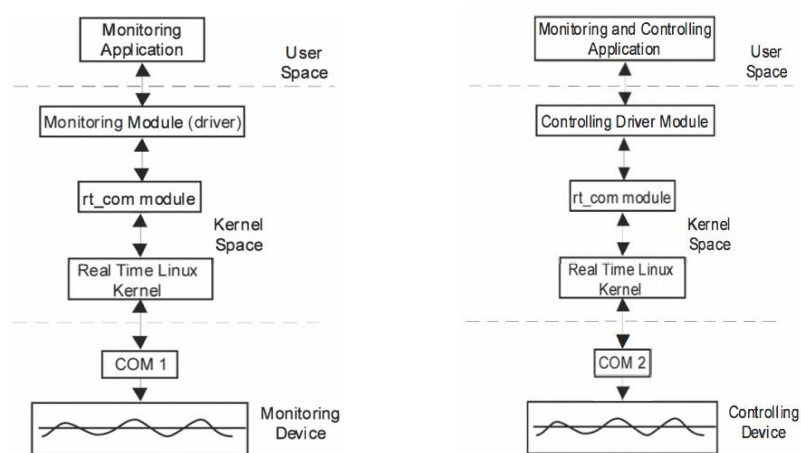


Figura 8. Módulo de los drivers para el control y monitoreo de la temperatura y humedad.

Fuente: Tradeoffs in Implementing an Embedded System Designed for Monitoring and Controlling Temperature and Humidity Using Real Time Linux. (p. 2-3).

- **“Sistema de monitoreo inalámbrico desde una estación remota para el control de la humedad relativa del suelo en una plantación de ají”** (Basto & Vanegas, 2011)

Consiste en un sistema de monitoreo que permite obtener información de la humedad del suelo de forma estable a través de una comunicación inalámbrica, específicamente mediante un tensiómetro, módulos ZigBee, combinados con información que se enviarán a través de la red GPRS. Desarrollando toda la parte de hardware y software para obtener un servicio basado en un sistema de información que permita medir la capacidad de campo de suelo en la plantación de ají y registrarla de

manera remota en una base de datos.

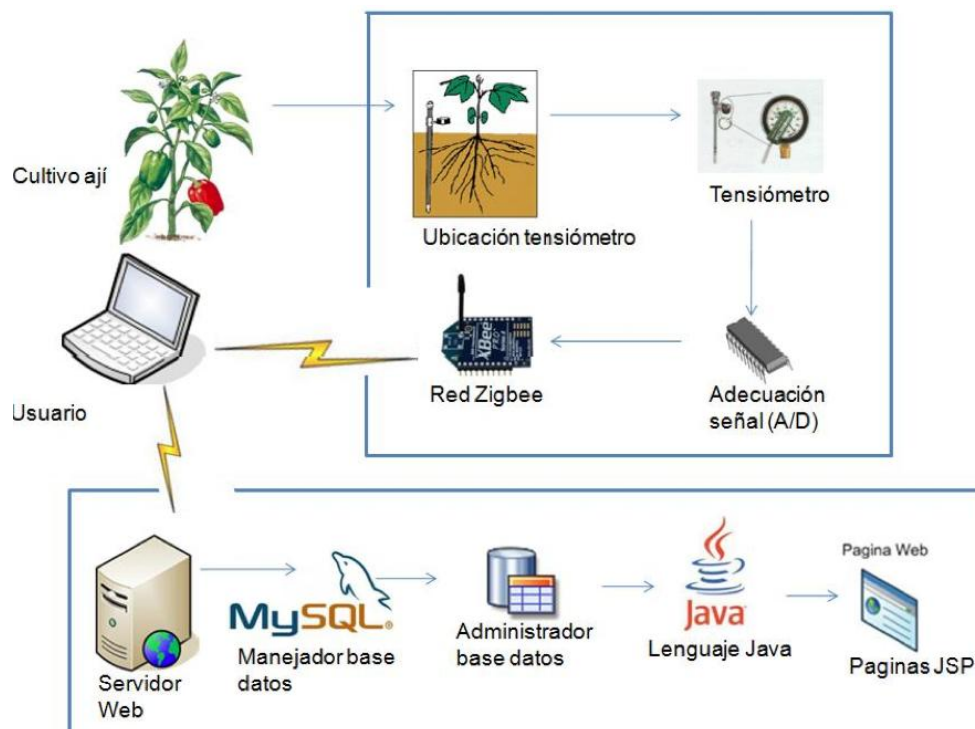


Figura 9. Diagrama del proyecto

Fuente: Basto, D. L. & Vanegas, C. A. (2011). Sistema de monitoreo inalámbrico desde una estación remota para el control de la humedad relativa del suelo en una plantación de ají. (p. 49). Universidad Santo Tomas de Aquino. Bucaramanga

- **“Prototipo funcional de un electrocardiógrafo implementado por medio de redes de sensores inalámbricos (WSN)”** (Medina, 2011)

El objetivo principal de esta red es desarrollar un prototipo funcional de un electrocardiógrafo que transmita la señal inalámbricamente para posteriormente visualizar las señales en un computador. Mediante la utilización de redes inalámbricas de sensores optimizando las señales cardiacas en un paciente sin que lleven consigo una cantidad de cables y no presente incomodidad a la hora de realizar actividades cotidianas. En la Figura 10 se evidencia el resultado del proyecto.

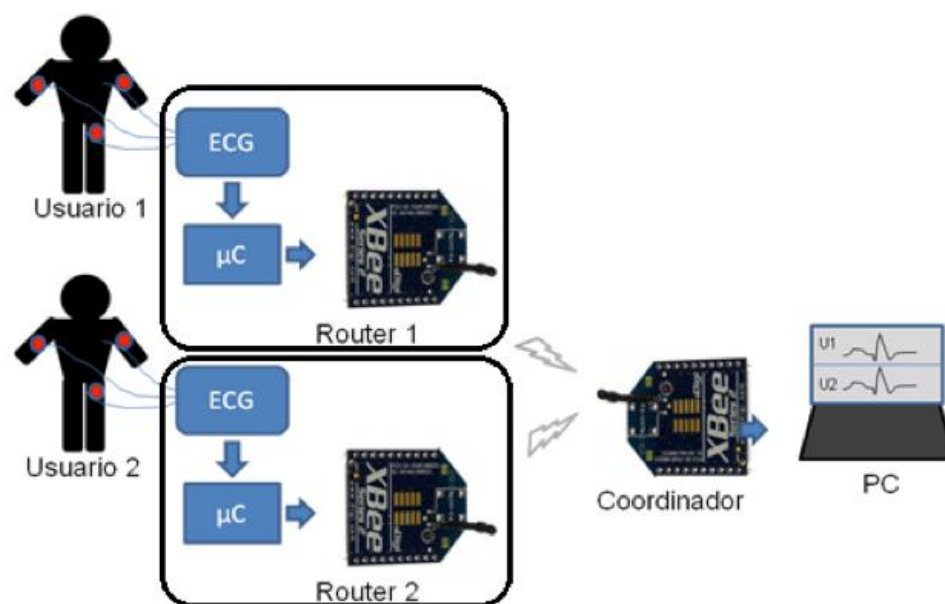


Figura 10. Sistema final del proyecto

Fuente: Medina, J. I. (2011). Prototipo funcional de un electrocardiógrafo implementado por medio de redes de sensores inalámbricas (WSN). Universidad de San Buenaventura. Bogotá. (p.73)

- **“Monitoreo de variables ambientales influyentes en la crianza de pollos de engorde utilizando redes de sensores inalámbricas.”** (González, Patarroyo, & Monroy, 2011)

En el presente trabajo de grado se describe el modo como se implementó una red de sensores inalámbricas mediante el protocolo ZigBee con topología árbol para el monitoreo de variables ambientales de humedad y temperatura. Su objetivo era conocer y analizar cómo dichos factores influyen en el crecimiento de las aves dentro del galpón. De esta manera se podría visualizar las señales ambientales mediante una estación remota en donde los criadores tengan una constante vigilancia de las variables que influyen en el desarrollo de los pollos y el producto final que es su carne.



Figura 11. Galpón avícola Cascabita II y ubicación Nodo

Fuente: González Acevedo Juan Pablo, Monroy Bustos Juan Pablo, Patarroyo Sánchez, Audrey. (2011). Monitoreo de variables ambientales influyentes en la crianza de pollos de engorde utilizando redes de sensores inalámbricos. (p. 123 – 124). Universidad de San Buenaventura. Bogotá 2011.

El acercamiento al desarrollo de diversos tipos de redes ha permitido hasta el momento ejemplificar y verificar su importancia y aplicación en variados sectores como la medicina, la agricultura, la producción industrial, avicultora, el sector automotriz, entre otros. Estas redes además, variadas en sus propósitos y aplicaciones, permiten enmarcar las características bajo las cuales se pretende realizar el proyecto investigativo así como las particularidades tenidas en cuenta para la descripción y formulación del problema.

1.2 Descripción y formulación del problema

Los avances científicos buscan desarrollar equipos tecnológicos con características la miniaturización en razón de la practicidad en cuanto reducción peso y volumen en beneficio de la portabilidad. De otro lado, como consecuencia de la reducción en el tamaño, estos equipos tienen a consumir menos energía para su funcionamiento.

A partir de estos aspectos los sistemas embebidos permiten plantear soluciones a problemas para el manejo sistematizado y óptimo de información, para ello se tiene el interés de integrar a este tipo de red un protocolo de comunicación desarrollando interdisciplinaridad entre la producción agrícola, los sistemas electrónicos y de telecomunicaciones para así obtener un sistema completo de adquisición de datos en el cual se pueda visualizar las variables que se desean analizar a partir de los datos recolectados sistemáticamente.

Teniendo en cuenta la relevancia de las precedentes apreciaciones, este proyecto de investigación, se centra además en el área de los cultivos hidropónicos. Se intenta por tanto, plantear una adecuada implementación tecnológica de redes a este tipo de cultivos que proporcionan una alternativa al desarrollo de la agricultura ante la escasez de tierra, el fuerte grado de contaminación biológica y el alto costo de la mano de obra.

“La hidroponía es una técnica utilizada para cultivar plantas sin hacer uso del suelo, en la cual los nutrientes se disuelven en agua, logrando una absorción más rápida de los mismos por parte de las plantas.” (Fundación UNAM, 2013). El valor de sostenibilidad de este tipo de cultivos llama la atención en tanto que, éstos se puede se puede realizar en cualquier espacio y condiciones, se ajustan a cualquier necesidad. Además es sabido que con este tipo de cultivos se puede llegar a producir hasta cinco veces más por metro cuadrado de área sembrada, garantizando la sustentabilidad alimentaria por medio de la disminución del periodo vegetativo y por consecuencia del número de cosechas por año.

Sin embargo, tal como lo afirma Alvarado, Chavez y Wilhelmina (2001) a pesar de que estos cultivos proporcionan sostenibilidad ambiental y bajos costos, el control de plagas es un factor determinante para el éxito de estos cultivos. De este modo, el problema de cómo controlar las variables de temperatura ambiente y humedad relativa, se hace fundamental en la medida sin el adecuado monitoreo y control de estas variables

puede aparecer “enfermedades fisiológicas causadas por altas temperaturas y stress de agua” (Alvarado, Chavez, & Wilhelmina, 2001) lo que ocasionaría la ineficacia en el crecimiento de plantíos tales como la lechuga.

Identificando la delimitación del problema, se propone desarrollar esta investigación teniendo como pregunta central:

¿Cuáles son los parámetros y características de hardware y software, para desarrollar un sistema de adquisición de variables climáticas utilizando sistemas embebidos en un cultivo hidropónico de lechugas?

1.3 Justificación

La ecología así como la alimentación mundial de la humanidad se ha puesto de relieve en el interés y políticas de desarrollo a nivel internacional. Estos temas aterrizados a la inquietud del Proyecto Educativo Bonaventuriano que rescata la relación del ser humano con la naturaleza en términos de cuidado fraternal, nos motivan a pensar como profesionales el deber que nos debe asistir frente a la responsabilidad social de nuestros conocimientos en relación con la solución a las necesidades de nuestras sociedades.

En consecuencia, existe en la actualidad la necesidad de plantear estrategias que permitan una adecuada transferencia del conocimiento mediante aplicaciones tecnológicas que aporten a soluciones de problemas concretos. Otra razón por tanto, para la realización de este proyecto se centra en optimizar procesos en la agricultura en el que los desarrollos tecnificados ofrezcan practicidad para poder permitir el uso eficiente y sostenible de los recursos e insumos naturales. Se pretende entonces a través de la hidroponía mejorar procesos para la sistematización de la información y el control de tareas mediante la combinación de elementos electrónicos y de comunicaciones.

Mejorar el desarrollo de la hidroponía a través del apoyo científico puede significar mayores oportunidades para plantear soluciones de alimentación a una población mundial que crece exponencialmente y que se enfrenta al desgaste indiscriminado de recursos naturales. En concreto, poder prevenir problemas tales como la floración prematura, bordes quemados de las hojas por enfermedades y plagas causados por variables que pudieran controlarse, podrían acarrear mejores resultados en términos de producción de alimentos.

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo General

- Desarrollar un prototipo de adquisición y visualización de variables ambientales, mediante una Red de Sensores Inalámbricos, utilizando sistemas embebidos.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y simular una red de sensores basada en las especificaciones de la norma IEEE 802.15.4.
- Desarrollar y adaptar los sensores adecuados para la adquisición de las variables climáticas como temperatura y humedad relativa.
- Elaborar la interfaz para la visualización de los datos obtenidos en el sistema embebido.
- Integrar la red de sensores y adaptar las tarjetas de adquisición de las variables climáticas, al sistema embebido.

1.5 Alcances y delimitaciones del proyecto

El presente proyecto permite interpretar los resultados en relación con la medición las variables ambientales (temperatura ambiente y humedad relativa) empleando la comunicación mediante el protocolo ZigBee. Los diferentes datos serán extraídos de un cultivo hidropónico de lechugas que ha sido diseñado y elaborado de forma *escalar*. En este cultivo se han integrado el uso de sistemas microelectrónicos con el fin de tomar datos a través de nodos de sensores. Estos datos se comunican al usuario de la red, el cual puede interpretar los resultados por medio de una interfaz establecida bajo las características de la norma IEEE 802.15.4. De este modo, se instalan cuatro nodos para obtener un mejor resultado de los datos que se van a monitorizar, obteniendo dos muestras por cada nodo y llegando a tener 4 sensores por cada variable.

Debe tenerse en cuenta que la red de sensores a instalarse es de tipo comercial, los nodos electrónicos son adaptados por medio del acondicionamiento electrónico para crear las tarjetas de adquisición las cuales transmiten la información por medio del módulo XBeeSerie2, formando con ello una red con tipología estrella (punto-multipunto). Por lo anterior, de acuerdo al análisis de resultados encontrados en el diseño y simulación del área de $100m^2$, se determina elaborar un cultivo hidropónico de 1/20 de forma escalar dando como resultado el establecimiento de un invernadero cuya área es de $5m^2$ las cuales permiten un adecuado entorno para la realización de pruebas que simulan un área de $25m^2$. El entorno del cultivo hidropónico de lechugas se estima sea una longitud de 2.5m largo x 2.5m ancho

Como se ha mencionado el número de nodos son cuatro, que de acuerdo al esquema basado en el concepto de celdas hexagonales semejantes al diseño de redes de telefonía móvil se distribuye conforme a cuatro celdas con diámetro de 1.12m los cuales van a ser los encargados de cubrir las especificaciones del cultivo. Teniendo en cuenta estas particularidades, esta investigación se centra en la monitorización de las variables

de temperatura ambiente y humedad relativa, dicha monitorización tiene por fin la visualización mas no el control de dichas variables.

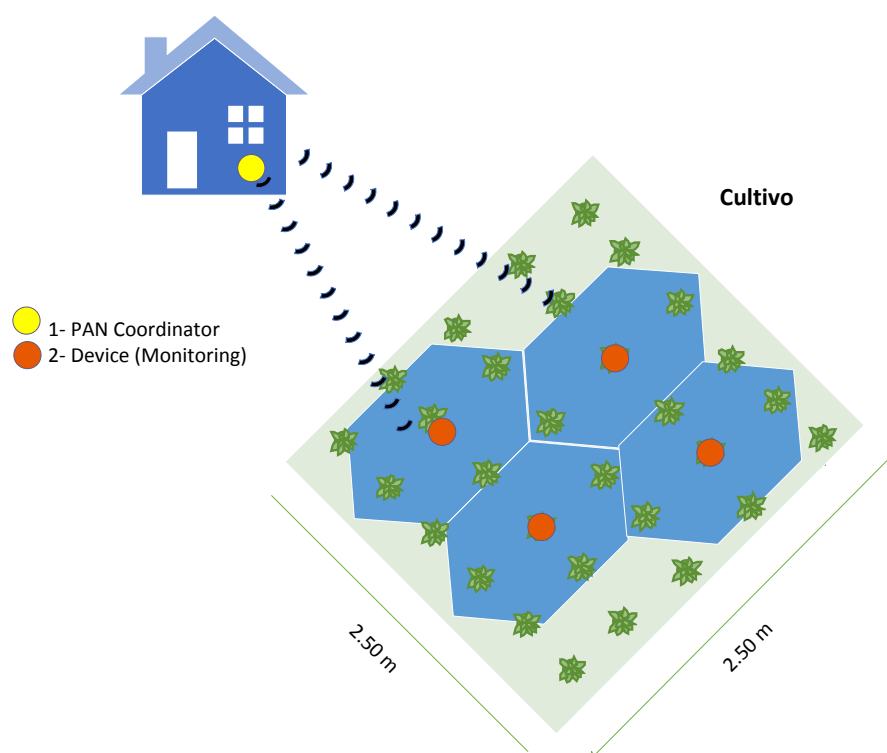


Figura 12. Escenario del cultivo

Fuente: Autor

2. Marco Teórico y Conceptual

El marco teórico que se plantea para la realización de nuestro proyecto se articula en tres ejes fundamentales: el desarrollo y aplicación de redes a través de sistemas embebidos, el área de la hidroponía y el marco legal ingenieril y agrícola. En efecto, para elaborar un sistema de monitorización remota de las variables ambientales para el tipo de cultivo que se ha diseñado, se requiere la utilización y análisis de algunos conceptos fundamentales pertenecientes a las siguientes temáticas en las cuales se basa esta investigación: Sistemas Embebidos (SE), Redes de Área Personal o PAN (Personal Area Network), Wireless Sensor Network (WSN), Cultivos hidropónicos y de lechuga. Para tal efecto se presentan estos conceptos, y además se identifica el marco normativo que se deben cumplir en la implementación de las redes inalámbricas de sensores y las prácticas agrícolas.

2.1 Sistemas Embebidos¹

Un sistema Embebido (SE), son sistemas diseñados para realizar tareas específicas designadas por el usuario, con el fin de optimizar los procesos para mejorar su desempeño y eficiencia, reduciendo tamaño y costos de producción.

2.1.1 Arquitectura.

Un Sistema Embebido está integrado por sistemas Hardware/Software. Los sistemas hardware (HW) conformados por todos los dispositivos de E/S², almacenamiento y los periféricos empleados para recibir, transmitir la información de los procesos realizados en el sistema, y un componente software (SW) en donde está la parte del procesador que se encuentra dividida en la Central Processing Unit (CPU) y las unidades de memoria; la arquitectura típica

¹ (Camargo, 2011; Rosas, 2011)

² E/S: Entrada/Salida

de un Sistema Embebido se muestra en la Figura 13.

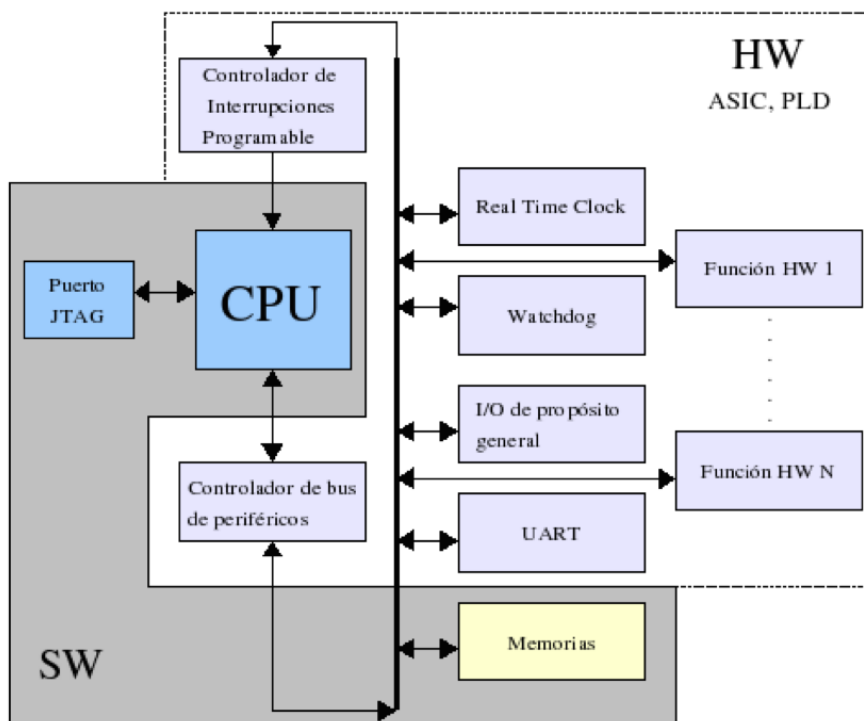


Figura 13. Arquitectura Sistema Embebido

Fuente: Camargo, C. I. (2011) *Transferencia tecnológica y de conocimientos en el diseño de sistemas embebidos* (Tesis de Doctorado) Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

Los componentes principales son de forma similar a un PC, los cuales se describen a continuación.

- *Unidad de Procesamiento:* Encargado por realizar las operaciones por medio de diferentes procesadores. Algunos procesadores de bajo consumo se encuentran ARM, AVR, Intel Xscale, PIC, MIPS, Motorola 68000, entre otros. Estos procesadores son de arquitectura abierta con manuales, guías y especificaciones técnicas para el usuario además tienen un amplio rango de aplicaciones y soporta la interconexión con varios periféricos.

- *Dispositivos de Almacenamiento:* Para el correcto funcionamiento y permitir ejecutar los recursos del sistema es necesario varios dispositivos de almacenamiento, los cuales son: memorias volátiles y no volátiles. (Ver Tabla 1)

Tabla 1. Descripción de los dispositivos de almacenamiento en un SE

Dispositivos Almacenamiento	Guarda información	Ejemplos
Memorias Volátiles	Temporal, mientras esten energizados	SRAM, DRAM y SDRAM
Memorias no Volátiles	Largo periodo de tiempo, sin estar energizados	DVD, disco duro, EPROM, flash y ROM

Fuente: Autor

- *Periféricos:* Son dispositivos complementarios que sirven para adquirir, transmitir y almacenar información de los procesos realizados en el sistema que dependiendo el sistema embebido pueden encontrarse diferentes dispositivos de E/S e interfaces. Entre ellos se encuentran: interfaces de comunicación serial, módems, tarjeta de red (Ethernet), inalámbricas, puertos USB, los conversores Análogos/Digitales, monitor, teclado mouse, controladores para Memoria como la SD/MMC y los componentes de depuración (JTAG, ISP, ICSP y la interfaz BDM).
- *Sistemas Operativos (Software):* Sistemas utilizados para administrar e implementar el hardware/software de los embebidos, permitiendo el uso compacto y eficiente, de los fines diseñados; en el cual permite desarrollar las tareas específicas requeridas.

2.1.2 Aplicaciones³

Hoy en día los sistemas embebidos se encuentran en casi todas las actividades humanas, donde se interactúa con ellos de forma voluntaria e involuntaria, o simplemente porque hacen parte de dispositivos que se utilizan a diario. Véase

³ (Integrantes del Grupo de Investigación, 2009)

Figura 14, en la cual se muestra aplicaciones de los SE, de acuerdo a la distribución del mercado respecto al tiempo de adopción.

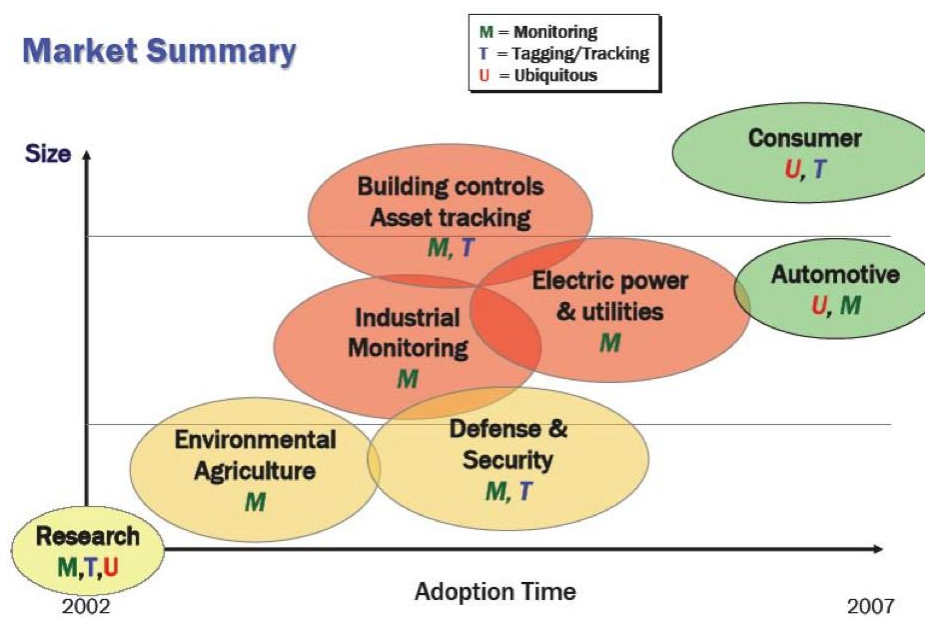


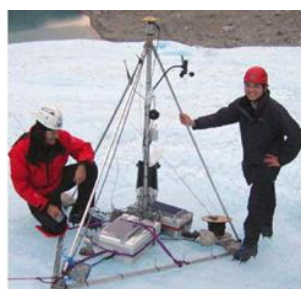
Figura 14. Aplicaciones de los Sistemas Embebidos de acuerdo a la distribución de mercado.

Fuente: Integrantes del Grupo de Investigación EDMANS, (2009). *Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica*. (p.32) Universidad de La Rioja. España.

En la Figura 14 se evidencia como en el 2002 las WSN comenzaron como investigación y con el transcurrir del tiempo se ha incrementado dentro del mercado, por lo que cada día se tiene mayor cantidad de redes y aplicaciones en las que se implementan; debido a que soportan un amplio rango de aplicaciones.

Esto se evidencia en que actualmente estas redes, son consideradas óptimas por su reducido tamaño y a precios no muy elevados, las cuales son idóneas para medir localmente condiciones medioambientales para luego enviar esta información a un nodo central o estación base. Para esto las redes de sensores se dividen en dos tipos: las redes multisalto, son las que la información es retransmitida por varios nodos antes de llegar a la estación base; y las monosalto son las que se conectan directamente a la estación base.

Las aplicaciones de este tipo de redes son variadas en razón al sector organizacional y las tareas específicas y resultados que se persiguen con las mismas. En la Figura 15 se muestran algunas de las aplicaciones que existen.



a) Estación base del sistema de monitorización de un glaciar

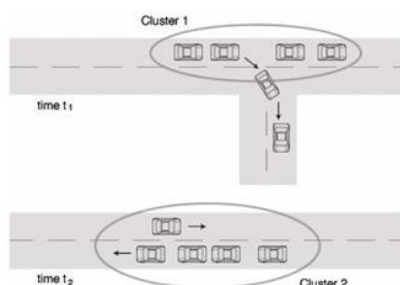
APLICACIONES WSN EN MONITORIZACIÓN DE: GLACIAR, AGRICULTURA, GANADERÍA, SEGURIDAD Y VIGILANCIA, TRÁFICO E INFRAESTRUCTURA CIVIL



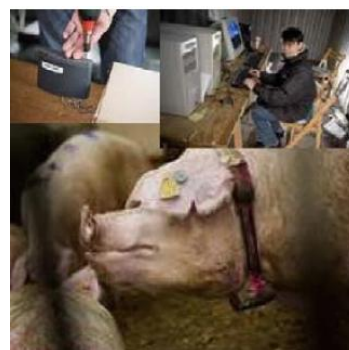
b) Dispositivos implementados en viñedos



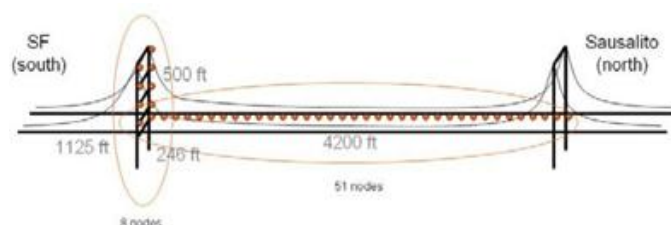
c) Imote2 con cámara integrada



d) Gestión del tráfico



e) Seguimiento de rutina ganado porcino



f) Localización de los sensores sobre el Golden Gate

Figura 15. Aplicaciones en diferentes campos

Fuente: Integrantes del Grupo de Investigación EDMANS, (2009). *Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica*. (p.35-40) Universidad de La Rioja. España. Adaptado por Autor

2.2 Redes de Área Personal o PAN (Personal Area Network)⁴

Este tipo de redes se implementan para interconectar dispositivos como agendas digitales, celulares, computadores, entre otros. Sus tasas de transmisión se encuentran entre los 10 bps hasta los 10Mbps. El grupo de trabajo IEEE 802.15 es el encargado del estudio de las redes WPAN o Wireless-PAN. Las implementaciones más importantes de redes PAN se basan en enlaces infrarrojos, Bluetooth y ZigBee, como se aprecia en la Tabla 2. Este tipo de redes se caracterizan por su baja complejidad en su diseño, bajos costos y reducido consumo de potencia. (Parades, 2008)

“Específicamente ZigBee es un protocolo de comunicaciones inalámbricas que sirve para interconectar sensores”. (Integrantes del Grupo de Investigación EDMANS. Universidad de la Rioja, 2009, p.28). En la Figura 16 se aprecia como las redes PAN son específicas para trabajar en redes de sensores y además muestra como ZigBee resulta una alternativa conveniente dentro de la las redes PAN.

Los sistemas de Telecomunicaciones están regidos por ciertos estándares algunos de los principales grupos de trabajo del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), los principales grupos son:

Tabla 2. Principales grupos de trabajo de la IEEE.

Grupo	Temática
802.1	Protocolos de nivel superior en LANs
802.3	Ethernet
802.8	Tecnologías de Fibra Óptica
802.11	Redes de Área Local Inalámbricas (WiFi)
802.15	Redes de Área Personal Inalámbricas (Bluetooth, Zigbee)
802.16	Redes de Área Metropolitana Inalámbricas (WiMAX)

Fuente: IEEE the world's leading professional association for the advancement of technology. (2009) Recuperado de <http://www.ieee.org/portal/site>.

⁴ (Mendez D. , 2007)

Para evidenciar el uso de las redes de sensores en las diferentes tecnologías inalámbricas se describe las tecnologías más utilizadas, en la Figura 16 se muestran las redes PAN.

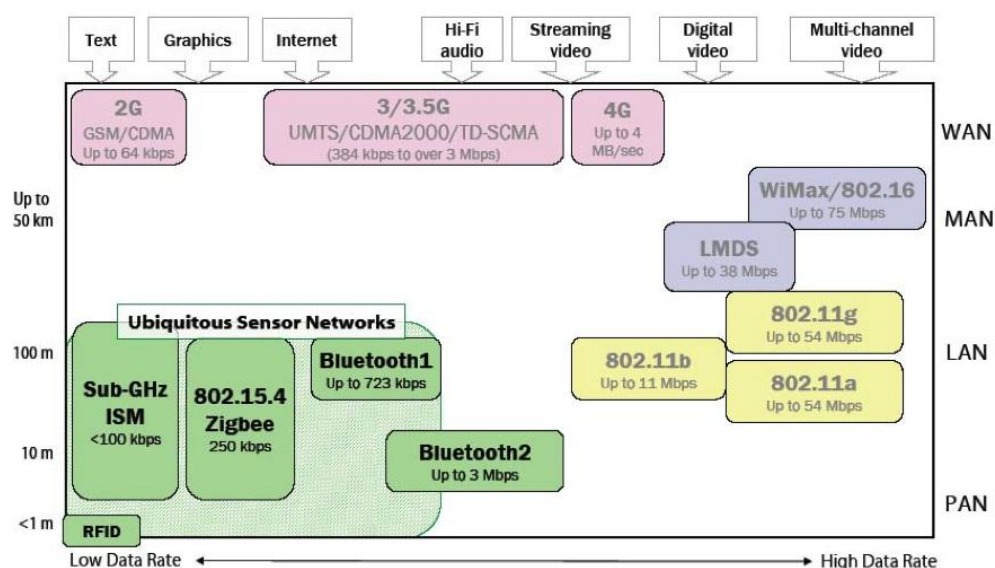


Figura 16. Tecnologías inalámbricas

Fuente: Integrantes del Grupo de Investigación EDMANS, (2009). *Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica*. (p.29) Universidad de La Rioja. España.

Además se compara las tecnologías anteriormente mostradas en la Figura 16 y se describe en la Tabla 3 para evidenciar su cobertura y velocidad de transferencia:

Tabla 3. Tecnologías inalámbricas - transferencia de datos y cobertura

	Transferencia de datos por segundo	Cobertura
WiMax	15 Mb	5 Km
Celular 3G	14 Mb	10 Km
Celular 2G	400 Kb	35 Km
Wi-Fi	54 Mb	50 – 100 m
Bluetooth	700 Kb	10 m
Zigbee	250 Kb	30 m
UWB	400 Mb	5 – 10 m
RFID	1 - 200 Kb	0.01 - 10 m

Fuente: Integrantes del Grupo de Investigación EDMANS, (2009). *Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica*, (p.29) Universidad de La Rioja. España. Adaptado por Autor

Claramente se evidencia como los protocolos más adecuados para ser usados en WSN son protocolos Bluetooth y ZigBee. A pesar de que ZigBee es muy similar a Bluetooth podemos encontrar algunas diferencias en donde resulta más adecuado el protocolo ZigBee para las WSN:

Tabla 4. Comparación entre ZigBee- Bluetooth

Tecnología Inalámbrica	Nodos	Consumo energía	Velocidad	Aplicaciones
ZIGBEE	Máximo 65.535 distribuidos en 255 subredes de nodos	30mA transmitiendo 3μA en reposo (mayor parte dormido)	Hasta 250kbps	Domótica, sensores médicos, juguetería.
BLUETOOTH	8 nodos máximo de una subred.	40mA transmitiendo 0.2mA en reposo	Hasta 3Mbps	Teléfonos móviles y la informática casera

Fuente: Autor

ZigBee utiliza la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical) para usos industriales, científicos y médicos; en concreto, 868 MHz en Europa, 915 en Estados Unidos y 2,4 GHz en todo el mundo. Sin embargo, a la hora de diseñar dispositivos, las empresas optan prácticamente siempre por la banda 2,4 GHz, por ser libre en todo el mundo.

La tecnología ZigBee es más robusta que las otras tecnologías como puede verse en la Figura 17:

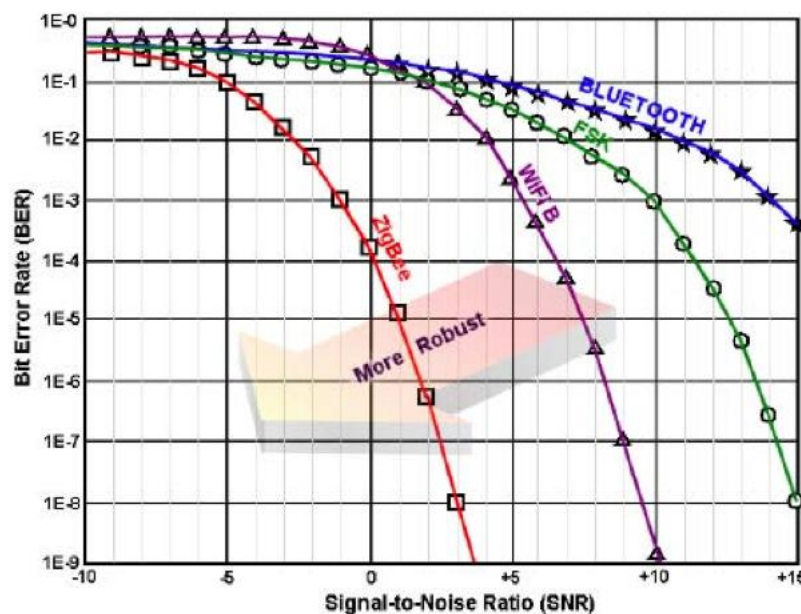


Figura 17. Comparativa de la robustez de las diferentes tecnologías inalámbricas

Fuente: Integrantes del Grupo de Investigación EDMANS, (2009). Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica. (p.30). Universidad de La Rioja. España.

2.3 Wireless Sensor Network (WSN)⁵

Las redes de sensores inalámbricas (WSN) son “una red de característica auto-configurable” (Zennaro, 2010), puesto que la integran un pequeño número de nodos sensores también llamados motes distribuidos espacialmente y comunicados entre sí para lo que se usan señales de radio, con la finalidad de monitorizar y entender el mundo físico, para controlar diversas condiciones en distintos puntos, entre ellas la temperatura, el sonido, la vibración, la presión y movimiento entre otras aplicaciones.

Por tal razón las redes de sensores son óptimas de acuerdo a lo anterior, en las cuales se pueden realizar tareas específicas; estas son algunas cifras en las que se comparan los precios para las redes tradicionales y redes de sensores inalámbricas, determinando que las últimas son las más idóneas en cuanto la optimización de los recursos para desarrollar un sistema de adquisición. (Ver Tabla 5).

⁵ (Integrantes del Grupo de Investigación, 2009)

Tabla 5. Comparativa de precios

	Tradicional	Redes de sensores inalámbricas
Coste del sensor	2000 \$	350 \$
Coste de la adquisición de datos	65 \$	0 \$
Costo del cableado	75\$	15 \$
Coste por sensor	2140 \$	365 \$

Fuente: Integrantes del Grupo de Investigación EDMANS, (2009). *Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica*. (p.18)Universidad de La Rioja. España.

2.3.1 Arquitectura del Sistema⁶

Las redes de sensores están formadas por un conjunto de pequeños dispositivos denominados nodos sensores, que se encuentran dispersos en una determinada área a monitorizar.

Típicamente, el proceso seguido por las aplicaciones de las redes inalámbricas de sensores es el siguiente: primero se realiza una serie de mediciones sobre el medio que conlleva a transformar dicha información digital en el nodo y transmitirla fuera de la red de sensores vía un elemento Gateway a una estación base, donde la información puede estar almacenada y tratada temporalmente para acabar finalmente en un servidor con mayor capacidad que permita realizar análisis de datos.

⁶ (Integrantes del Grupo de Investigación, 2009)

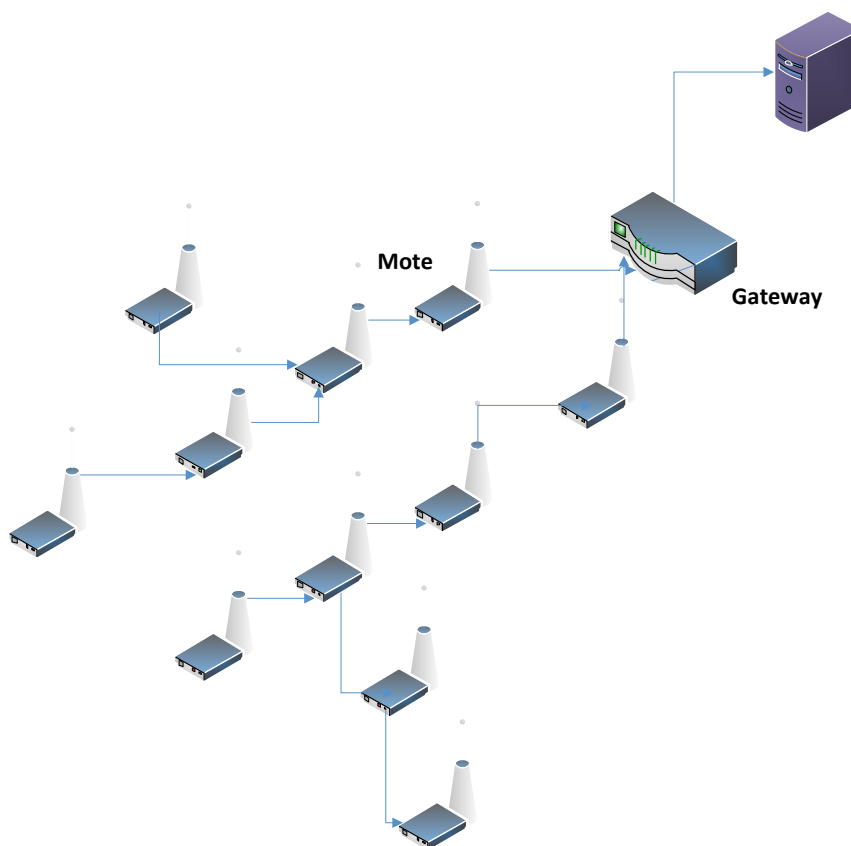


Figura 18. Red inalámbrica de sensores

Fuente: Autor

Como se puede inferir en la Figura 18 la red inalámbrica de sensores está conformada por:

- Nodos inalámbricos
- Puerta de enlace
- Estaciones base

Nodo Inalámbrico. Los nodos inalámbricos también llamados motas, el inglés “mote” por su ligereza y reducido tamaño. Son dispositivos capaces de capturar información proveniente del entorno en que se encuentren asimismo procesarla y transmitirla inalámbricamente hacia otro destino. El hardware de

estos está compuesto por las siguientes partes:

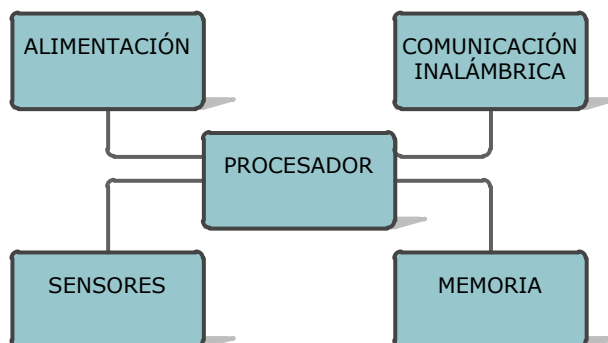


Figura 19. Arquitectura nodo inalámbrico

Fuente: Integrantes del Grupo de Investigación EDMANS, (2009). *Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica*. (p.18)Universidad de La Rioja. España. Adaptado por autor

Sensores. Son dispositivos hardware que producen una respuesta medible ante un cambio en un estado físico, como puede ser temperatura, humedad o precisión entre otros, 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 se deben tener presente son: un pequeño tamaño, un consumo bajo de energía, operar en densidades volumétricas altas, ser autónomo y tener capacidad para adaptarse al ambiente. Existen diferentes tipos, en función de la variable que tengan que medir o detectar entre ellos están: ópticos, térmicos, de humedad, magnéticos, de infrarrojos, presión, fuerza, vibración, ultrasonido entre otros.

Puerta de enlace. Elementos para interconexión entre la red de sensores y una red de datos (TCP/IP). Es un nodo sin elemento sensor, cuyo punto es actuar como puente entre dos redes de diferente tipo. Estas no operan de forma aislada y deben contar con alguna forma de monitoreo y acceso a la información adquirida por los nodos de la red de sensores.

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

2.3.2 Topologías de red.

La topología se refiere a la configuración de los componentes hardware y dependiendo de cómo este distribuidos estos componentes se transmiten los datos. Cada topología es óptima para ciertas circunstancias y puede ser inapropiada en otras dependiendo la distribución configurada.

Existen diferentes topologías que se pueden implementar en la aplicación de WSN como pueden ser estrella, malla o híbrida. Cada topología presenta ciertos desafíos, ventajas y desventajas. Para entender las topologías primero se debe conocer los diferentes componentes de la WSN.

A continuación se nombran los tres tipos de elementos que la conforman:

- *Nodos finales:* Compuesto por sensores y actuadores donde se capturan los datos.
- *Routers:* Permiten salvar obstáculos, problemas de congestión en la emisión de la información y posibles fallos en alguno de los aparatos creando nuevas rutas para redes más extensas.
- *Puertas de enlace:* Recoge los datos de la red, sirve como punto de unión con la red LAN o con Internet.

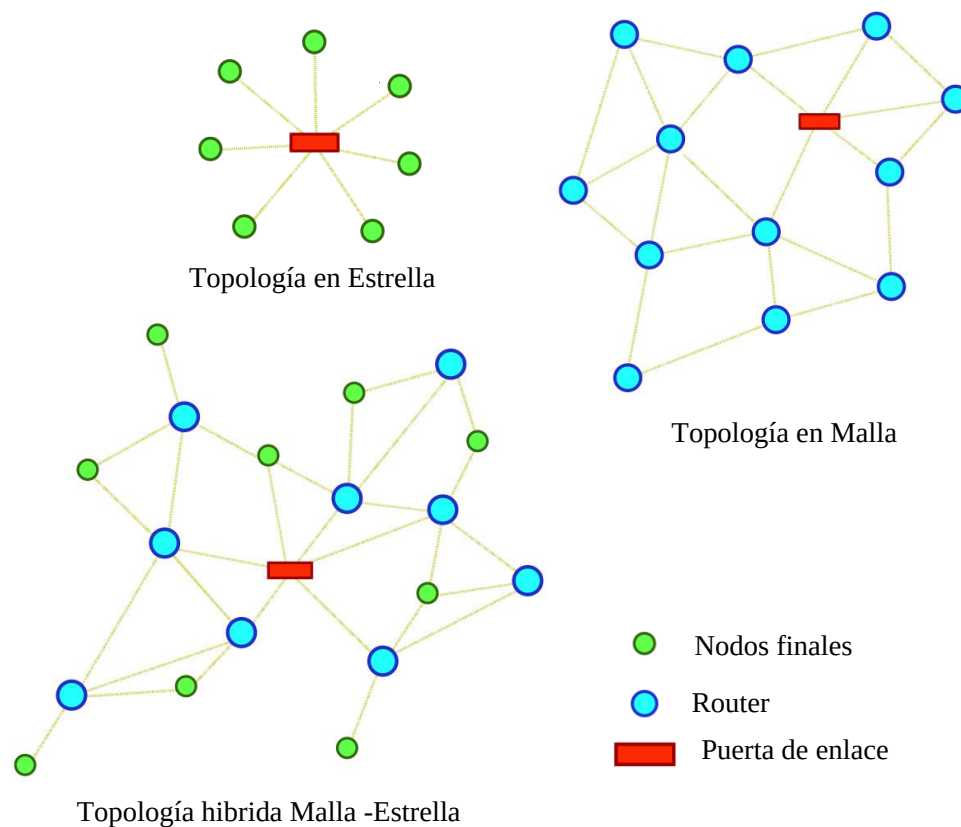


Figura 20. Topologías de Red

Fuente: Autor

Los nodos también pueden estar organizados de manera ad-hoc en una determinada área, capaces de organizarse y de interconectarse a sí mismos de forma inalámbrica con otros semejantes; estas redes son las más usadas en la implementación de redes de sensores inalámbricos llamadas redes malladas tipo ad-hoc. Su principal característica es que todos los dispositivos forman parte de la red, y además de funcionar como terminales finales, realizan funciones de retransmisión de paquetes típicamente realizado por los routers.

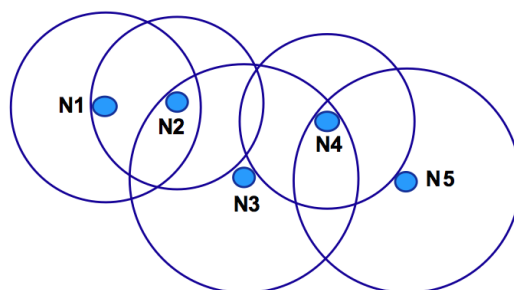


Figura 21. Ejemplo de red ad-hoc

Fuente: Integrantes del Grupo de Investigación EDMANS, (2009). *Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica*. (p.16) Universidad de La Rioja. España.

Teniendo en cuentas las diferentes aplicaciones que pueden encontrarse para las WSN se menciona para el caso una aplicación en el campo de la agricultura; para ello se muestran las etapas que utilizaron en la Universidad Católica de Perú la agricultura de precisión, la cual consta de seis (6) capas que se comunican y conectan entre sí como se puede ver en la Figura 22:

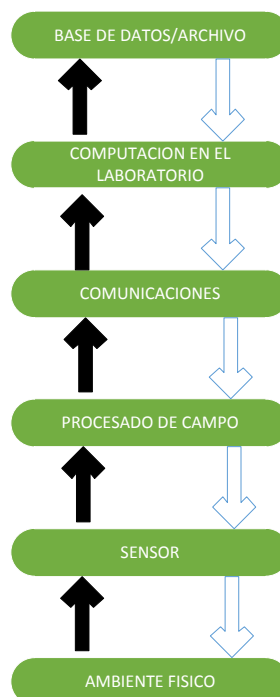


Figura 22. Capas componentes de una red de sensores inalámbricos para agricultura.

Fuente: Villón, D. (2009). *Diseño de una red de sensores inalámbrica para agricultura de precisión*. (p.20). Pontificia Universidad Católica del Perú

2.3.3 Simulación WSN

Hoy en día los software de simulación son herramientas que ayudan a predecir el comportamiento de las redes de comunicaciones; es decir, si se llega a presentar alguna dificultad que pueda afectar el desempeño de la red, es por ello que resultan un componente fundamental para el diseño, implementación y monitoreo de las mismas.

Parámetros para la selección de una herramienta de simulación

Para la selección de una herramienta de simulación de uso específico en una determinada área, es necesario tener en cuenta los siguientes parámetros:

- **Uso investigativo:** Establece los niveles para comparar el uso de las herramientas de simulación en áreas académicas e investigativas, con el fin de explorar los aportes que han logrado las diferentes comunidades respecto de su uso.
- **Tipo de Licencia:** Dependiendo del tipo de licencia se tienen las siguientes: si es libre se permiten ejecutar el programa para cualquier propósito, editar, ejecutar y distribuir el programa para otros usuarios. Y para la licencia comercial esta tiene ciertas restricciones para el usuario, esta es llamada licencia propietaria debido a que los costos, duración de uso, edición y libertad de permisos son definidos por los propietarios de la herramienta.
- **Curva de aprendizaje:** Este parámetro es de suma importancia para lograr el manejo adecuado de la herramienta. Para ello se deben tener ciertos conceptos de programación y conocimientos previos de las redes y los diferentes protocolos a implementar. Además del uso didáctico en las cuales las configuraciones de la red sean de manera intuitiva para el usuario.

- Plataformas que la soportan: Hay variedad de sistemas operativos en los cuales se pueden ejecutar los software de simulación, los cuales son: Windows, Linux, Mac OS y Solaris.
- Interfaz gráfica: Parámetro que facilita la simulación mediante una mínima programación por medio de una interfaz gráfica que permita al usuario.
- Graficación de resultados: Por medio de gráficos se pueden analizar e interpretar los datos de la red conociendo con exactitud medidas de ciertas variables de red, con el fin de realizar un análisis posterior de los datos y comprender así el comportamiento de la red ante diferentes eventos o posibles configuraciones.
- Tecnologías y protocolos de niveles 2 y 3 que soporta: Niveles que soporta en el modelo OSI, para los distintos protocolos y de ser necesario algún protocolo faltante en el software se tienen cuenta módulos por separado que permitan ejecutar otras tecnologías.
- Tráfico que permite modelar: Este parámetro permite generar un tipo de tráfico en los diferentes servicios y aplicaciones los cuales dejan simular el software.

De acuerdo a los parámetros antes mencionados se genera una comparación entre las diferentes herramientas implementados en la simulación ver Tabla 6.

Tabla 6. Comparativos herramientas de simulación

	Opnet	Omnet	GNS3	NS-2
Uso investigativo	Alto	Alto	Bajo	Alto
Tipo de licencia	Comercial	Libre	Comercial/Libre	Libre
Curva de aprendizaje	Alto	Alto	Bajo	Alto
Plataformas que soporta	Windows, Unix	Windows, Unix	Linux, Mac Windows	Windows, Mac Unix
Interfaz gráfica	Alto	Medio	Alto	Bajo
Graficación de Resultados	Buena	Aceptable	Limitada	No tiene
Tecnologías de nivel 2 y 3 que soporta	Alto	Alto	Bajo	Alto
Tráfico que permite modelar	Alto	Medio	Nulo	Alto

Fuente: Capítulo 2. Elección de una herramienta de simulación. Recuperado de http://bibliotecadigital.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/68447/1/eleccion_herramienta_simulacion.pdf. Adaptado por Autor.

En el desarrollo del proyecto se tiene en cuenta un software libre amigable que permita simular las redes inalámbricas de sensores con el fin de evaluar el comportamiento de la red que se plantea en el diseño. La herramienta escogida es el Network Simulator 2 (NS-2), es por hoy el simulador más usado en la academia y centros de investigación en el mundo y que se puede operar en todas las variantes de las plataformas Unix: BSD, Linux, Sun Solaris; y en Windows usando Cygwin. A pesar de no tener Interfaz gráfica ni graficación de resultados este posee software complementario para ello como son NAM y NS-2 Visual Trace Analyzer respectivamente.

La arquitectura de NS-2 es orientada a objetos, basada en la configuración y construcción de Otcl (extensión .tcl), realizando simulaciones por medio de escritura de scripts. Su lenguaje a nivel de datos es C++, debido a que actúa paquete por paquete.

Permite la simulación de varias tecnologías de redes: LAN, WLAN, WPAN; protocolos TCP y UDP; comportamiento de tráfico que incluyen CBR y VBR; además soporta algoritmos de enrutamiento tanto para redes cableadas como inalámbricas.

Además del Network Simulator 2, existe una herramienta (*NS-2 Visual Trace Analyzer*) que proporciona una forma sencilla de analizar los datos los cuales evita tareas exhaustivas permitiendo a los usuarios trazar gráficos, los paquetes de filtros, visualizar posición de los nodos, calcular estadísticas de nodo y de tránsito, y así con los archivos de rastreo por medio de una interfaz de usuario de facilidad de uso.

2.4 Cultivos hidropónicos

Hasta el momento nos hemos aproximado al marco conceptual ingenieril en el que se enfoca la realización de nuestro proyecto de grado. Sin embargo, teniendo en cuenta la aplicación específica a la que se orienta el diseño de nuestra investigación debemos destacar como parte de nuestro marco teórico la temática de la hidroponía. A continuación presentamos brevemente los resultados de nuestra pesquisa acerca de los conocimientos necesarios que relacionan esta temática con la pregunta y los objetivos de este proyecto.

“La hidropónica (hidro=agua y ponos=trabajo o actividad) es traducido literalmente como trabajo del agua y es una técnica de producción de cultivos sin suelo” (Seminario Agro Negocios, 2001). El suelo es reemplazado por el agua con los nutrientes minerales de las soluciones nutritivas. La producción sin suelo de hortalizas permite excelente calidad y uso eficiente del agua y fertilizantes.

La hidroponía es una realidad técnica, posiblemente hoy en día sea el método más intensivo de producción de plantas. En los últimos 20 años ha aumentado considerablemente el interés por el uso de esta técnica para producir cultivos hortícolas dentro de invernaderos⁷.

⁷ (Zepeda, 2012; Seminario Agro Negocios, 2001; Méndez & Vera, 2007)

Ya que la presente investigación es orientada a cultivos bajo invernadero se describirán brevemente:

“Los invernaderos son estructuras con cubierta plástica o de vidrio, que sirven para realizar cultivos a temperaturas superiores a las presentes en el exterior del invernado; aprovechan el efecto producido por la radiación solar, que al atravesar un material traslucido, calienta los objetos que hay detrás”. (Castillo, 2007)

Los invernaderos ofrecen principalmente las siguientes ventajas.

- Los frutos se cosechan en menos tiempo del normal
- Se aumenta la calidad y el rendimiento
- Se puede producir fuera de época específica a cada vegetal o fruto
- Ahorro de agua y fertilizantes
- Facilita el control de insectos y enfermedades
- Es posible cultivar más de una vez en un año

Entre las desventajas:

- Requieren de una alta inversión inicial
- Los costos de operación pueden ser elevados
- Requieren de personal operativo con cierto nivel de preparación

De acuerdo con estas referencias de los invernaderos, se evidencia que aunque se requiera más inversión por parte de los entes dedicados a los cultivos para la implementación de esta tecnología, se compensará con los beneficios que se obtendrán de la misma; en consecuencia se necesita una administración adecuada de la infraestructura. Una prueba de que este sistema es eficiente, es la masificación de su uso en los países desarrollados.

El control climático de los invernaderos implica que en el mismo se mantendrán las condiciones necesarias para que la flora allí pueda desarrollarse de la mejor manera, obteniendo resultados abundantes y de buena calidad. “Los cultivos en sus diferentes etapas de desarrollo están condicionados por cuatro factores ambientales: CO₂, luz, humedad relativa y temperatura.” (Agroinformación, s.f).

El invernadero debe conservar estas variables dentro de los siguientes rangos para mantener el crecimiento de los vegetales:

- Temperatura: Es el parámetro más importante del control climático, por ser el que más influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Existen aseveración de que la temperatura óptima para las plantas de cultivo se encuentra en el rango de 10°C a 20°C Para ello es necesario conocer las necesidades y limitaciones de la especie a cultivar.

El calentamiento del invernadero procedente de la radiación que pasa a través del material de cubierta, se transforma en calor. Esta radiación es absorbida por los materiales nutritivos y las planta. En donde la absorción hace que estos elementos capturen la radiación con longitud de onda más larga calentando el invernadero.

- Humedad relativa: La humedad es la masa de agua en una unidad de masa de aire. Es decir la humedad relativa se refiere a la cantidad de agua contenida en el aire, en relación con la que se podría contener a la misma temperatura. La relación existente entre temperatura y humedad es de tipo inversa.

La humedad relativa es uno factores climáticos más críticos que puede modificar el rendimiento final de los cultivos. En donde se presentan dos casos:

- Si la humedad relativa es muy baja, las plantas transpiran mucho pudiendo deshidratarse.

- Si es muy alta, las plantas reducen su transpiración y disminuyen su crecimiento.
- Iluminación: Este es un factor que influye de manera considerable en resultado de los cultivos, debido a que incide directamente sobre el efecto de la fotosíntesis. Para tener una fotosíntesis máxima es necesario que cuando tengamos mayor luminosidad, se aumentan niveles de los otros factores: temperatura, HR y CO₂. Y si por el contrario hay poca luz, los requerimientos de los otros parámetros también disminuyen.
- CO₂: Este factor es también crítico para el correcto desempeño de la función clorofílica de las plantas. La concentración de CO₂ en la atmósfera es del 0.03%, pero para alcanzar una máxima actividad fotosintética es necesario mantener este elemento en el rango de 0.1 al 0.2 % de concentración. Si se supera el 0.3% de concentración el medio se vuelve tóxico para los cultivos.

Por tal razón para una óptima asimilación de CO₂ y por tanto fotosíntesis, se debe tener temperaturas entre 18 y 23 °C, la luminosidad y humedad relativa óptimas difieren de cada especie a otra. La mejor hora para fertilización de CO₂ es al mediodía, que es cuando se tiene mayor luminosidad natural. Esto es un factor determinante en la prontitud de la cosecha y el rendimiento del cultivo.

Es importante el tema de los suelos para que no se pierdan nutrientes y es por esto que la hidroponía (cultivo en agua o arena) es una solución para que no exista pérdida de nutrientes que en consecuencia afecten la calidad de los productos de una generación de cultivos a otra.

Teniendo en cuenta las anteriores características de la hidroponía y enfocados en nuestro proyecto, a continuación describimos las distinciones que han de tenerse en cuenta para la elaboración de un cultivo hidropónico y la implementación de estos en la producción de lechugas.

2.4.1 Condiciones Medio Ambientales.

Cada cultivo tiene una temperatura de germinación. En algunos casos se puede realizar en una amplia gama de temperaturas y son aquellos que se pueden sembrar durante todo el año. El cultivo al aire libre se realiza de acuerdo con la época de siembra del cultivo, similar a como tradicionalmente se lleva a cabo en el campo. El mantenimiento de la temperatura es también muy importante ya que un cambio brusco podría interrumpir el proceso de germinación o parar incluso el crecimiento de la planta. La humedad se debe controlar mediante el sistema de riego y esto se debe tener presente porque es el agua que contiene la solución nutritiva que necesita para la germinación de las semillas (Seminario Agro Negocios, 2001).

Técnicas hidropónicas. Existen tres tipo de técnicas en la hidroponía: (FundaciónUNAM, 2014)

- **Técnica hidroponía NFT**

Se cultivan hortalizas en tubos redondos o cuadrados de PVC utilizando agua con nutrientes sin ningún tipo de sustrato, lo que hace que la planta disponga directamente de los minerales que necesita para su crecimiento.

- **Técnica hidropónica Raíz Flotante**

Se pueden cultivar hortalizas en cajones de madera o plástico, sobre una placa que flote en agua con nutrientes, lo que facilita el manejo y el espacio del que disponemos.

- **Técnica hidropónica en sustrato**

Esta es de las más utilizadas para cultivar hortalizas de porte alto como los jitomates, además permite utilizar sustratos como aserrín, cascarilla de arroz, arena, entre otros. Lo que permite el sostén de las plantas y mantener la humedad, drenaje, aireación y absorción de los nutrientes.

Las ventajas de la hidroponía que se pueden presentar para cualquier tipo de técnica a implementar son:

- Mayor control en la regulación de los nutrientes, agua y fertilizantes.
- Bajo costo en la desinfección del medio de cultivo
- Aprovechamiento de pequeñas superficies
- Producción de todas las plantas
- Mayor producción en menos espacio
- Hay mayores ganancias con menores inversiones, solo hay una fuerte inversión inicial en la instalación del sistema.

La solución nutritiva donde está es la “esencia” en la técnica hidroponía, haciéndola superior frente al cultivo en suelo, dando como resultado plantas con mayores rendimiento y mayor calidad.

“La solución nutritiva se define como un conjunto de compuestos y formulaciones que contienen los elementos esenciales disueltos en el agua, que las plantas necesitan para su desarrollo.” (Hydro environment)

Los elementos esenciales para su crecimiento se dividen en dos: de acuerdo a las proporciones suministradas; que son llamados los *Macronutrientes* y aquellos que se requieren en menor cantidad los *Micronutrientes*.

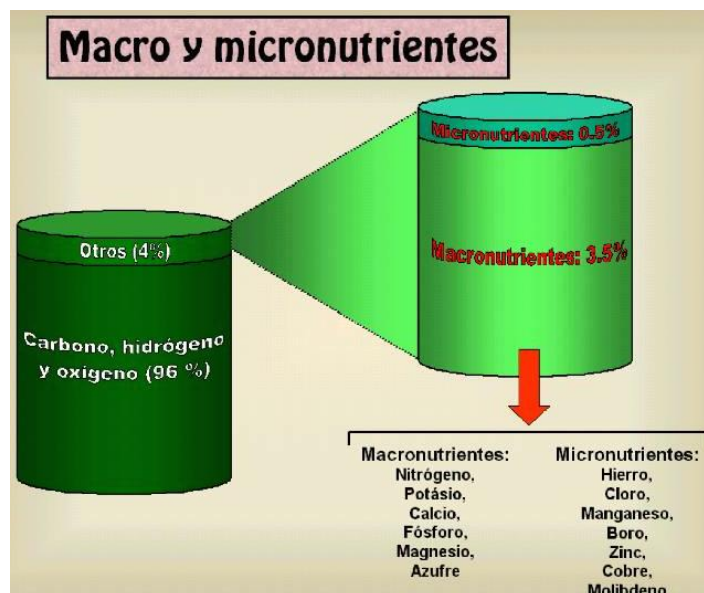


Figura 23. Nutrientes esenciales en hidroponía

Fuente: Universidad Politécnica de Valencia. Parte III. Tema 12: El Agua en las Plantas. Nutrición y Transporte de Elementos Minerales. Nutrición Mineral. Recuperado de http://www.euita.upv.es/variados/biologia/images/Figuras_tema12/Figura12_16.jpg

2.4.2 Cultivo de Lechuga

Este cultivo se dice que comienza hace más de 2500 años, siendo conocido por los griegos y romanos. Las primeras lechugas de las que se tienen referencia son las de hoja suelta. La lechuga es una planta anual y su nombre científico es *Lactuca sativa*. (CosechandoNatural)

Tabla 7. Condiciones ideales para la lechuga hidropónica

Hortaliza	Nombre Científico	Clima	pH	Temperatura	Época de siembra	Tipo de siembra	Distancia mínima entre plantas	Ciclo vegetal
Lechuga	<i>Lactuca sativa</i> L.	Templado	5.0	16-22°C	Todo el año	Indirecta	30-35cm	90-100 días

Fuente: Hydro environment. Condiciones para cada tipo de hortaliza. Recuperado el 27 de febrero de 2014. Obtenido de http://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=47. Adaptado por Autor.

Los requerimientos climáticos del cultivo son:

Tabla 8. Requerimientos cultivos lechuga en general

Requerimiento	Rango
Temperatura	Germinación 19°C Desarrollo vegetativo 16°C en el día y 6° en la noche.
Humedad relativa	Entre 60% y 80%
pH	Entre 6.4 y 7.4
Riego	De 200 a 400 ml por planta

Fuente: Guía para cultivo hidropónico de lechuga. Recuperado el 27 de febrero de 2014. Obtenido de http://www.cosechandonatural.com.mx/guia_gratuita_cultivo_hidroponico_de_lechuga_guia28.html

2.5 Marco legal

En esta sección se presenta el marco legal y de procedimiento tanto desde la dimensión tecnológica como del sector agrícola, las cuales son las siguientes:

2.5.1 Normas aplicadas en las WSN

En cuanto a la dimensión ingenieril se sabe que los estándares inalámbricos más conocidos propietarios para sensores inalámbricos están dadas por la IEEE (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica), en donde los más conocidos son para redes LAN el IEEE 802.11b (“Wifi”), para redes PAN, el protocolo IEEE 802.15.1 (Bluetooth IEEE, 2002) y IEEE 802.15.4 (Zigbee IEEE, 2003). Usa las bandas ISM (*Instrumentation, Scientific and Medical radio bands*) 902-928 MHz (EEUU), 868-870 MHz (Europa), 433.05-434.79 MHz (EEUU y Europa) y 314-316 MHz (Japón) y la banda de GHz de 2.400-2.4835 GHz (universalmente aceptada).

2.5.2 Normas prácticas agrícolas

Así mismo, para la implementación de las prácticas agrícolas es necesario cumplir con ciertas normas y legislaciones que expide el INVIMA (Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos), donde se encuentra el Decreto 3075 de

1997; que exige el registro sanitario indispensables para los alimentos de consumo humano, muestra a detalle todas las instalaciones, manejo de alimentos que se deben tener en óptimas condiciones para la manipulación de alimentos.

Además estos regímenes de control de alimentos en Colombia, debe recordarse que en particular todos los procesos de producción de la lechuga tienden a ser regidos a través de la Norma Técnica Colombiana 5400 de las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA). En estas normas lo que se pretende es mostrar los requisitos generales que se tienen que cumplir para ejercer buenas prácticas en el desarrollo agrícola de frutas, hierbas aromáticas culinarias y hortalizas frescas.

3. Metodología

Habiendo delimitado el tema de investigación mediante la descripción y formulación del problema de investigación, así como su marco teórico, este proyecto apropia la metodología CDIO para su desarrollo mediante un análisis empírico analítico en la línea de investigación de la Universidad de San Buenaventura acerca de las tecnologías de la información y comunicaciones.

3.1 Metodología CDIO: “*Concebir, Diseñar, Evaluar, Implementar, Operar*”.

“Esta metodología ha sido desarrollada por el Massachusetts Institute of Technology (MIT) con ayuda de académicos, industriales, ingenieros y estudiantes como respuesta a los diferentes caminos que están tomando la educación de la ingeniería y las demás del mundo real”. (Camargo, 2011, pág. 66)

El camino metodológico de esta propuesta se compone de seis etapas descritas en la siguiente imagen:

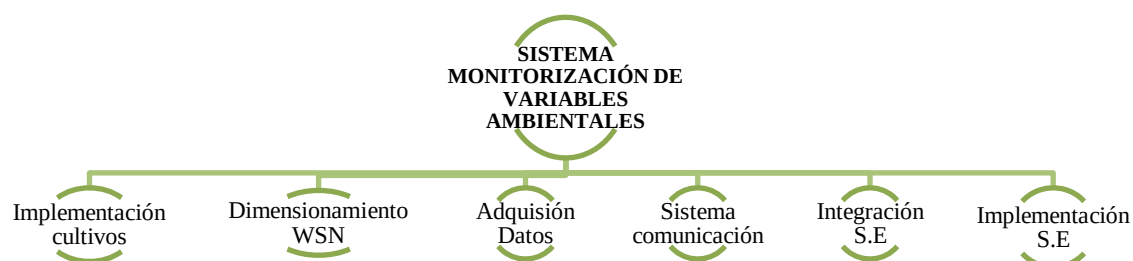


Figura 24. Etapas de la Metodología

Fuente: Autor

Etapa 1: Se implementa el invernadero para el cultivar 56 plántulas de lechuga crespa Simpson. Para ello se tiene en cuenta la densidad de siembra y las dimensiones del cultivo que son: 2.50 metros largo x 2.50 metros de ancho.

Tabla 9. Densidad de Siembra

Distancia entre	cm
plantas	40
hileras	30

Fuente: Autor

Etapa 2: Se realiza la caracterización para el diseño de la red de sensores y de acuerdo a los cálculos determinados se estructura de red planteada en topología estrella con los 5 nodos establecidos en los alcances. Se programa la red mediante el protocolo ZigBee por medio de los módulos XbeeS2, además se simula el respectivo caso empleado en el diseño de la red de sensores, con la respectiva topología implementada, mediante el software NS-2 y finalmente se hace el respectivo análisis de transmisión.

Etapa 3: Se desarrolla la adquisición de los datos para ello se tiene presente los datos (tramas) de los módulos XbeeS2 y la selección de los sensores a implementar en los respectivos nodos. A su vez se realiza la tarjeta que adapte los sensores con los módulos RF a implementar en la red para la transmisión de la información. En esta etapa tiene el lugar el desarrollo de hardware para adaptar estos al protocolo de transmisión.

Etapa 4: Se realiza el sistema de comunicación mediante el protocolo ZigBee, para interconectar los módulos Xbee y desarrollar el algoritmo de procesamiento para identificar los datos recibidos al nodo coordinador de la red PAN.

Etapa 5: Luego se procede a integrar el algoritmo que adapte todo el desarrollo hardware de la red de sensores inalámbrica y la interfaz gráfica al usuario para obtener el resultado del monitoreo de las variables a estudiar, en el sistema embebido comprado en

el mercado. Una vez hecho esto se desarrolla una investigación para conocer cómo funciona el SE (RaspberryPi pi) la cual presta varias tareas que llevan a enriquecer más el proyecto y además su costo no es elevado.

Etapas 6: Finalmente se hace la implementación del sistema de monitorización donde se procede a la realización pruebas de campo para ver que funcione correctamente con el prototipo, para detectar los posibles fallos y corregir. Se toman los datos respectivos del cultivo.

En cuanto al enfoque a emplear en la investigación es **Empírico-analítico** ello significa que se tendrá en cuenta conocimientos de ciertas temáticas para la aplicación a procesos agrícolas que permiten llegar a automatizar un sistema por medio de adquisición de las variables involucradas en el crecimiento del cultivo, a través de la aplicación de procesos de transferencia de tecnología. Los sistemas embebidos se han convertido en una fuente de desarrollo práctico, este tipo de herramientas permite crear aplicaciones específicas de software y hardware para el desarrollo de dispositivos, gracias a sus dimensiones y a sus aplicaciones.

De otra parte, el proyecto se centra en dos aspectos básicos enfocados en las líneas de investigación de la Universidad como lo son: *Análisis y procesamiento de señales (APS)*: en el núcleo problemático de Microelectrónica; y, *Tecnologías de la información y comunicaciones (TIC)*: núcleo problemático Aplicaciones y servicios TIC.

4. Desarrollo ingenieril

Este capítulo describe las fases de desarrollo para la adquisición y transmisión de variables ambientales a través de redes inalámbricas de sensores, y su integración en el sistema embebido para el procesamiento de la información mediante un sistema de monitorización.

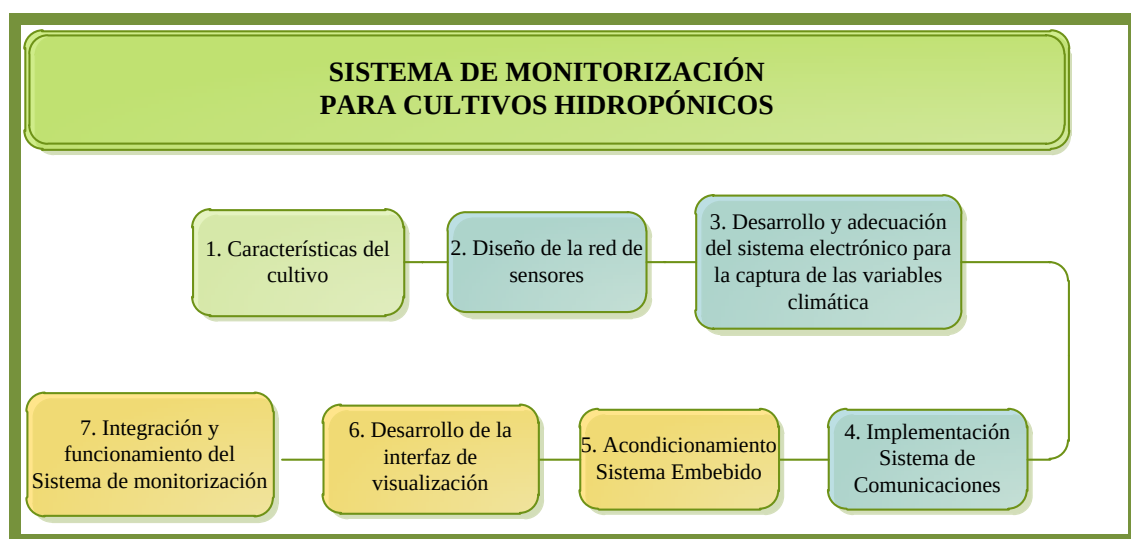


Figura 25. Etapas para el desarrollo del proyecto

Fuente: Autor

En primera instancia se identifica el problema y el contexto en el cual se desarrolla el proyecto, para luego presentar la alternativa de solución mediante el diseño de una red de sensores. Esta red permite captar las variables, se presenta el diseño de las tarjetas de adquisición de la información, a su vez se analiza el comportamiento de la red en el simulador NS2, seguido de esto se acondiciona el sistema embebido para continuar con la implementación del sistema de comunicaciones adaptándolo al sistema RaspberryPi, donde se procesa y desarrolla la interfaz de visualización de las variables climáticas, y finalmente presenta el funcionamiento del sistema monitorización para las variables de humedad relativa y temperatura ambiente sobre el sistema RaspberryPi.

4.1 Descripción Técnica del Problema

La utilización de nuevas tecnologías en la agricultura de precisión ha permitido la implementación de nuevas estrategias que permiten generar condiciones óptimas en los cultivos. En particular, se realiza un sistema de monitorización de variables ambientales para conocer y analizar el estado de las mismas.

El desarrollo del proyecto se basa en la utilización de redes inalámbricas de sensores, y un sistema embebido para un cultivo hidropónico de lechuga crespa tipo Simpson para capturar, procesar, adaptar y visualizar las variables de dicho estudio permitiendo un sistema de monitorización.

En este caso es necesario tener un control climático dentro del invernadero porque cambios bruscos en variables como la humedad relativa y temperatura pueden llegar a afectar el crecimiento floral, y el quemado de las hojas por altas temperaturas. Por tal motivo se escogen los sensores adecuados en estas variables que puedan detectar la información necesaria. (Ver sección 4.4)

Para tal efecto se presenta la hidroponía como una alternativa de solución que permita optimizar los recursos y obtener mayores productos en poco tiempo. (Ver Tabla 9: Ventajas hidroponía)

Tabla 10. Hidroponía: ventajas y desventajas con respecto a la agricultura tradicional

Cultivo en Tierra	Cultivo Hidropónico
Preparación del Suelo	
Barbecho, rastreo, surcado	No existe preparación suelo
Control de Malas Hierbas	
Gasto en el uso de herbicidas y labores culturales	No existen y por lo tanto no hay gastos al respecto
Nutrientes	
Muy variable; pueden aparecer deficiencias localizadas.	Hay un control completo y estable de nutrientes para todas las plantas fácilmente disponible en las cantidades precisas.
Sustratos	
Tierra	Posibilidad de emplear diversos sustratos de reducido costo, así como materiales de desecho
Mano de obra	
Necesariamente se debe contar con conocimientos o asesoría	No se necesita, a pequeña escala mano de obra calificada

Fuente: Alvarado, D.; Chavez, F. & Wilhelmina K. A. (2001). Seminario Agro Negocios. Lechugas hidropónicas. (p. 13-14). Universidad del Pacifico. Recuperado el día 12 de mayo de 2014. Obtenido de https://www.up.edu.pe/carrera/administracion/SiteAssets/Lists/JER_Jerarquia/EditForm/11lechugh.pdf. Adaptado por el autor.

4.2 Características cultivo hidropónico

La primera etapa para diseño del sistema de monitorización corresponde en determinar el entorno al cual se van a cultivar las lechugas, por lo cual se tiene presente las dimensiones del cultivo. El invernadero está formado por una infraestructura elaborada en madera forrada en plástico con dimensiones de 2.60m ancho x 2.50m largo x 2.80m alto.

De acuerdo a esto se tiene el siguiente prototipo para el invernadero ver figura 26

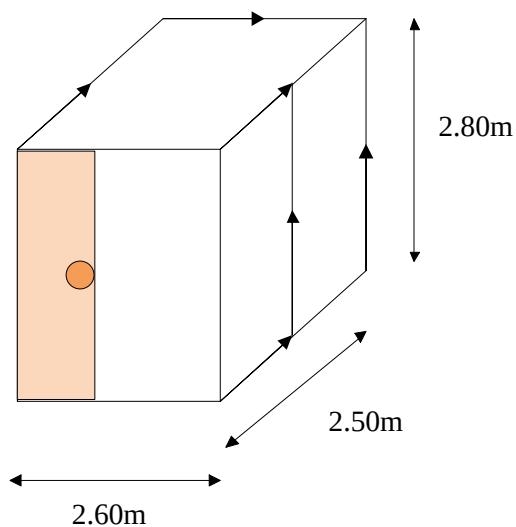


Figura 26. Estructura del invernadero

Fuente: Autor

Para el diseño de la red primero es necesario contar con el prototipo del invernadero, como resultado se evidencia en la Figura 27. De igual manera se tiene en cuenta el sistema de riego y la técnica hidropónica para implementar el cultivo.



Figura 27. Invernadero

Fuente: Autor

A continuación se presentan en detalle las características de los cultivos hidropónicos empleados para su funcionamiento:

- **Sistema de riego por goteo:** mediante una manguera tubular 16MM/40cm suministrados por la empresa Aspersores Colombianos Ltda. se elaboró el circuito de riego por medio de tubos PVC de $\frac{3}{4}$ pulgada que distribuyen el agua de un tanque aproximado de 110 Litros. La altura del tanque es aproximado 3 metros.



Figura 28. Componentes sistema de riego

Fuente: Autor

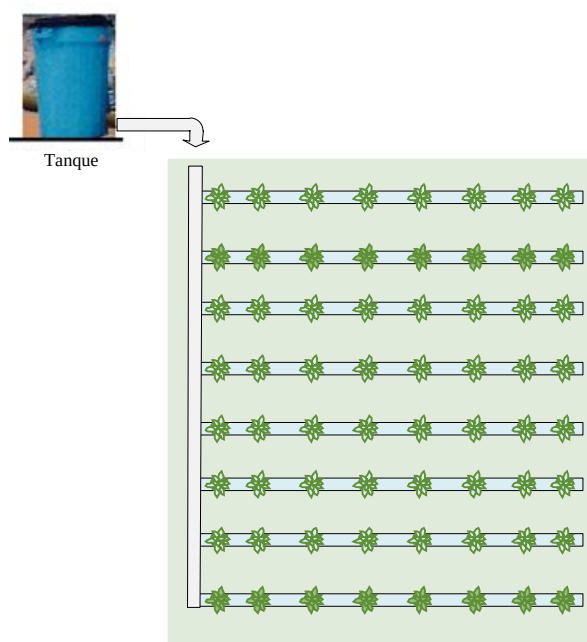


Figura 29. Sistema de riego

Fuente: Autor

En la Figura 30 se describe el flujo de procesos para la producción de lechuga variedad Black seeded Simpson.

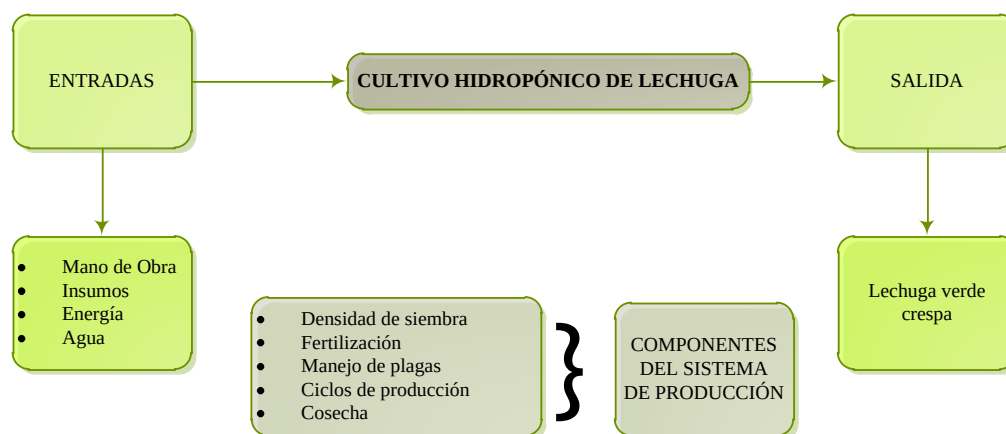


Figura 30. Flujo de procesos

Fuente: Autor

- Técnica hidroponía en sustrato:** Se escoge el sustrato orgánico de cascarilla de arroz debido a que este es un producto altamente comercial en tanto que Colombia es productor de grandes volúmenes de este producto alimenticio. Otra razón principal es su beneficio en la absorción de humedad presente en el caso de los cultivos hidropónicos.

Para colocar el sustrato se diseñó un cajón de madera que soportará la cascarilla de arroz, antes de esto se forra el contenedor con plástico y se perfora un desagüe debajo para que el agua circule. Ver Figura 31.

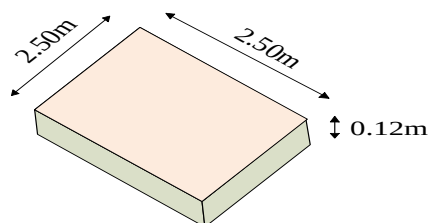


Figura 31. Dimensiones contenedor sustrato

Fuente: Autor

- **Conexiones eléctricas en el invernadero para la monitorización:** Se organizan los circuitos Terminales o End Device (ED) los cuales representan los cuatro nodos en cajas de paso por seguridad para evitar cualquier corto o daño de los dispositivos. A su vez se conectan a las cajas de paso a los terminales prensa estopa eléctricas que sirvan para sacar los cables encauchetado 3x18 de la conexión a los sensores evitando que se entre el agua al circuito de adquisición de datos.
- **Nutrientes:** Para la correcta solución de nutrientes se tiene en cuenta los macro y micro nutrientes por ello se pide asesoría por parte de Colinagro S.A; Empresa de inteligencia en agroproducción dedicada a proveer fertilizantes a empresas agropecuarias en Bogotá. Se elige el fertilizante *Nitrifoliar Completo*, los cuales contienen los compuestos requeridos para el crecimiento de cualquier especie de hortaliza sirviendo específicamente para el cultivo de lechugas implementado.
- **Siembra:** Primero para este proceso se escoge el tipo de lechuga que se va a cultivar para su posterior germinación y una vez obtenidas las plántulas, se trasplantan a el invernadero pasando las necesarias en el área a diseñar para ello se tiene en cuenta una densidad de planta de 40cm entre planta y 30cm entre hileras. (Ver figura 37)
- **Proceso de siembra:** Se selecciona las semillas para la germinación de las lechugas. Se determina que la clase de lechugas a sembrar son las rizadas puesta que estas son óptimas en hidroponía. De acuerdo a las que se encuentran en el mercado de distribución en la empresa Impulsemillas, para esta clase de hortaliza se encuentra la lechuga rizada Black Seeded Simpson.

Las lechugas Simpson son de hojas muy suaves al tacto. Sus hojas son rizadas, de color verde amarillento y de sabor muy agradable. Son frágiles y florecen a veces prematuramente, debido a su fragilidad, se recomienda tener cuidado al momento del trasplante y de la cosecha, evitando romper las hojas. (Guía para el Cultivo de la Lechuga Hidropónica)



Figura 32. Semillas Lechuga B.S Simpson

Fuente: Autor

- **Germinación**

Se escogen dos semillas para sembrar en cada cavidad en el semillero. Luego que la población de plantas haya emergido en su semillero, se eliminaran plántulas dejando solo una por cavidad.



a) Día germinación



b) 9 días de germinación

Figura 33. Germinación

Fuente: Autor



Figura 34. Eliminación de plantas dejando una por cavidad.

Fuente: Autor

La Figura 35 muestra el resultado de haber seleccionado las plantas que van a ser trasplantadas en el invernadero.



Figura 35. Plántulas listas para el trasplante

Fuente: Autor

Luego se procede a trasplantar las plántulas que se encuentran listas para cultivar en el invernadero, como se evidencia en la Figura 36.



Figura 36. Trasplante de las plántulas

Fuente: Autor

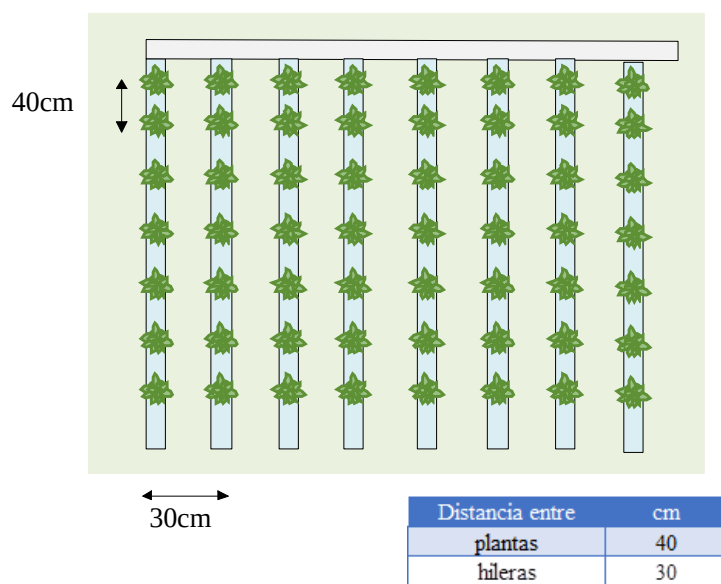


Figura 37. Densidad de siembra: Organización plántulas.

Fuente: Autor

Se colocaron 56 plántulas con densidad de siembra de 8 hileras cada una con 7 plantas correspondientes separadas 40cm entre surco como se indica en la Figura 37.

El resultado final después de haber seleccionado las plántulas de la Figura 35, para realizar el trasplante se muestra en la Figura 38.



Figura 38. Resultado del trasplante

Nota. Fuente: Autor

De acuerdo a lo anteriormente explicado se muestra el prototipo diseñado para la implementación del cultivo.



a) Invernadero vista frontal



b) Invernadero vista lateral



c) Contenedor con sustrato



d) Instalación sistema de riego



e) Trasplante



f) Nutriente

Figura 39. Resultados del prototipo

Fuente: Autor

4.3 Diseño de la red de sensores

Esta etapa presenta una solución basada en el diseño de una red inalámbrica de sensores, para la captura de las variables ambientales y la transmisión de la información al sistema embebido RaspberryPi.

Por lo cual como primera medida se caracteriza el diseño de la red de sensores; proceso que permite conocer los parámetros a estructurar de acuerdo al invernadero implementado. También se analiza el comportamiento de la red de área personal por medio de una simulación mediante el software NS2.

A continuación se presentan los criterios para el diseño de la red a partir del dimensionamiento por medio de los siguientes cálculos presentados para el cubrimiento de la red, en efecto se toma un área de $100m^2$ de referencia, es decir 0,01 hectáreas.

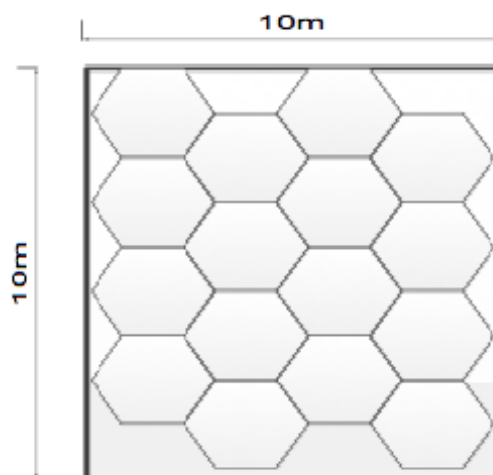


Figura 40. Área tomada de referencia $100m^2$

Fuente: Autor

Sin embargo es pertinente aclarar que del área anteriormente mencionada (Figura 40), solo se trabajó con la cuarta parte del área de referencia simulando un invernadero de ($25m^2$), por consiguiente las dimensiones del cultivo deben ser:

Ancho: 5m Largo: 5m

Con referencia al área anterior es necesario determinar cómo se va distribuir los nodos en la red, por lo cual se plantea como en una red móvil, la cual se distribuye la cobertura por medio de varias celdas hexagonales que garanticen todo el cubrimiento del área a monitorizar.

Para tal efecto se calcula el número de celdas teniendo en cuenta el rango de transmisión de los nodos en lugares cerrados, esto para aprovechar de mejor manera los equipos instalados y obtener la mayor cobertura y uniformidad en el sensado.

La distribución de los nodos es de acuerdo a las celdas de tipo hexagonal, que para el caso se asumen que sean de un diámetro de 2.5m, lo cual garantiza que el arreglo de sensores pueda tener un cubrimiento uniforme del área, en la ecuación se puede observar el cálculo del número de celdas para la red.

Ecuación1. Cálculo número de celdas

$$N \text{ de Celdas} = N \text{ celdas Ancho} * N \text{ celdas Largo} \quad (1)$$

$$N \text{ celdas Ancho} = \frac{5m}{2,5m} = 2 \text{ celdas por ancho} \quad (2)$$

$$N \text{ celdas Largo} = \frac{5m}{2,5m} = 2 \text{ celdas por Largo} \quad (3)$$

$$Nt \text{ celdas} = 2 * 2 = 4 \text{ celdas} \quad (4)$$

De acuerdo a los resultados, la densidad de nodos que se implementan en el cultivo es de 4 uno por cada celda y cada nodo consta de dos sensores; uno de humedad relativa y otro de temperatura ambiente, para un total 8 sensores.

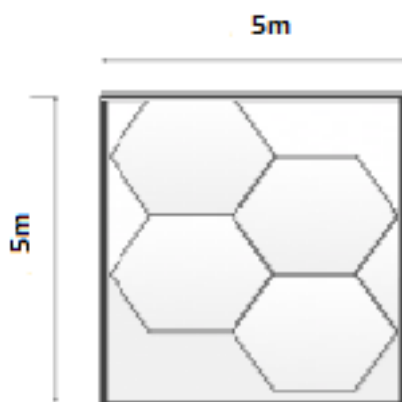


Figura 41. Área $25m^2$ a simular de la proporción $\frac{1}{4}$ parte del área $100m^2$

Fuente: Autor

Por cuestiones de espacio y para pruebas se trabaja con un área de $5m^2$, es decir con una relación de $\frac{1}{4}$ a lo anterior; simulando el área de $25m^2$ antes descrita como se muestra en la siguiente figura:

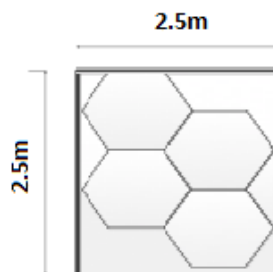


Figura 42. Escenario final a implementar para el diseño del prototipo de la red sensores inalámbricos $5m^2$

Fuente: Autor

Los datos finales para las celdas son de un diámetro de 1.25m y las demás condiciones determinadas para cada celda en el área de $25m^2$. Finalmente los aspectos a tener en cuenta son:

Tabla 11. Resumen de las consideraciones para el diseño final del prototipo en la red de sensores

Área	5m ²
Celdas (nodos)	4 unidades
Diámetro celdas	1.25m

Fuente: Autor

El modelo elaborado para la adquisición es una red de topología estrella. La razón de tal selección se basa en que en este sistema la información enviada sólo da un salto y donde todos los nodos de sensores están en comunicación directa con el coordinador que para el área implementada 5m² es óptima, teniendo presente una puerta de enlace directa que transmita los datos al exterior y permite la monitorización de la red. Debido a que, los nodos finales no intercambian información sino por el contrario utilizan la puerta de enlace para ello, se presenta la siguiente configuración de red.

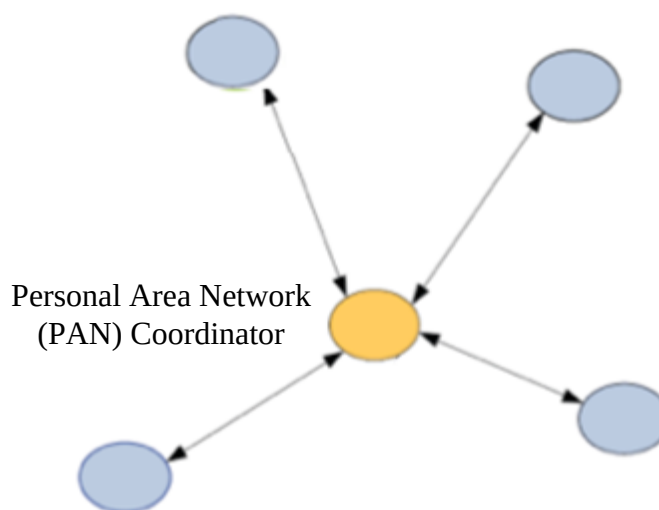


Figura 43. Esquema arquitectura red PAN

Fuente: Autor

Dentro de ese marco de arquitectura (Figura 43), la red se conforma por cinco nodos (un coordinador o maestro, y cuatro terminales o esclavos) que se comunican

inalámbricamente. El receptor está conectado por puerto serial al sistema embebido (RaspberryPi) o computador; para el caso se considera la topología estrella puesto que es la que menor gasto de energía requiere y para la distancia vía radio entre cada nodo y la puerta de enlace es suficiente de acuerdo al área a trabajar, véase la Figura 44.

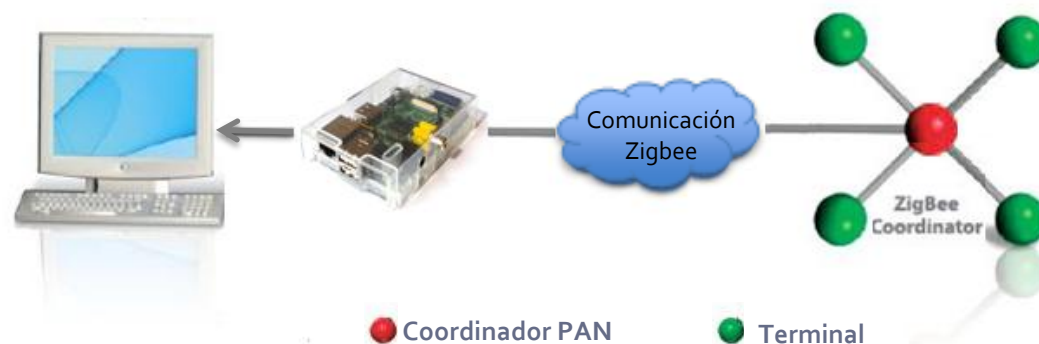


Figura 44. Esquema de la red para el caso - área $5m^2$

Fuente: Autor

Como complemento del diseño anterior se realiza una simulación la red inalámbrica de sensores, para analizar su comportamiento mediante el protocolo IEEE 802.15.4, la cual se describe a continuación:

Simulación Red Inalámbrica de Sensores en NS2

The Network Simulator 2 (NS-2) posee entre sus componentes: nodos, enlaces, paquetes, agentes (quienes implementan los protocolos de las distintas capas), entre otros. Por ello se debe tener en cuenta como simular una red mediante lo siguiente:

- *Crear el inicio de tareas:* Consiste en crear una instancia de la clase *Simulator*, donde en ella se encuentran los métodos que permiten armar la topología y configurar la simulación.

```
set NS [new Simulator]
```

- *Programar los eventos:* Para la ejecución de la simulación es necesario indicarle al simulador un tiempo indicado para que ejecute un evento definido

```
$NS at <tiempo> <evento>
```

- *Crear topología de la red:* Para ello se crean los nodos con sus respectivos indicadores para NS de la siguiente manera

```
set n0 [ $ns node ]
set n1 [ $ns node ]
...
```

- *Enlaces de nodos:* Crear los enlaces entre los nodos y definir el tipo de cola que se manejará.

```
$ns duplex-link $n0 $n1 <ancho de banda> <retardo> <tipo de cola>
```

- *Generadores de tráfico:* sobre los enlaces que se establezcan

```
set udp [new Agent/UDP]
set null [new Agent/UDP]
$ns attach-agent $n0 $udp
$ns connect $udp $null
```

- *Registro de eventos:* Se observa paquete a paquete lo que ocurre donde se establecen los registros de eventos globales o particulares a algún enlace, así también se puede generar datos para la visualización gráfica de la simulación por medio del programa nam

```
$ns trace-all [open caso1.out w]
$ns namtrace-all [open caso1.nam w]
```

- *Ejecutar la simulación:* ordenar al *network simulator* que realice las tareas que se han definido.

```
$ns run
```

Partiendo de lo anterior se adapta los requerimientos necesarios pero se tiene en cuenta el modelo inalámbrico en NS-2, el cual consiste en una serie de nodos designados de acuerdo a la topología que se tenga. Estos nodos móviles poseen características

específicas como son el movimiento dentro de la topología, y la capacidad de recibir-transmitir sobre canales inalámbricos.

Para ello en la simulación se define la constitución interna del nodo inalámbrico, los mecanismos de enrutado, el stack de protocolos que permitirá el acceso al canal inalámbrico. NS-2 presenta unos ejemplos para redes inalámbricas basadas en el estándar IEEE 802.15.4, los cuales facilitan la configuración mediante los siguientes métodos:

- *Creación de la topología inalámbrica:* Se definen los nodos mediante el comando

```
set node_($i) [$ns_ node]
```

Luego se procede a definir las características inalámbricas de los nodos creados mediante el siguiente esquema:

```
#configuracion nodos
$ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \
  -llType $val(ll) \
  -macType $val(mac) \
  -ifqType $val(ifq) \
  -ifqLen $val(ifqlen) \
  -antType $val(ant) \
  -propType $val(prop) \
  -phyType $val(netif) \
  -topoInstance $topo \
  -agentTrace ON \
  -routerTrace OFF \
  -macTrace ON \
  -movementTrace OFF \
```

- *Establecer los valores de la topografía* que definen el área sobre la que se desarrollará la simulación por:

```
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)
```

En el caso de estudio la red IEEE 802.15.4, se consideran los nodos estáticos y por tanto no se definirán en la simulación movimientos a corto plazo.

Los componentes de la red en el nodo móvil son los siguientes:

- *Stack* de red para el nodo móvil consiste en una capa de enlace (Link Layer), es la responsable de la simulación de los protocolos de enlace de datos. Muchos protocolos pueden ser implementados dentro de esta capa. Otra función importante de la capa de enlace es establecer la dirección MAC de destino en el encabezado MAC de los paquetes.
- *Una cola de prioridad de interfaz (IFq)*: Se implementa para dar una prioridad al enrutamiento de paquetes, insertándolos en la cabecera de la cola. Es compatible con la ejecución de un filtro sobre todos los paquetes en cola y elimina los que tienen una dirección de destino especificada.
- *Capa Mac (tipo de Mac 802_15_4)*: Capa de MAC utilizada de acuerdo a la tecnología que se va implementar ZigBee.
- *Una interfaz a la red (netIF)*: Sirve como una interfaz de hardware que se utiliza por el nodo móvil para acceder al canal. La interfaz de comunicación inalámbrica compartida se implementa como la clase Phy / WirelessPhy. Esta interfaz está sujeta a colisiones y el modelo de propagación de radio recibe los paquetes transmitidos por otras interfaces de nodo para el canal.
- *Modelo de propagación* se usan por lo general antenas omnidireccionales, en consecuencia el que mejor se ajusta a las necesidades de la transmisión con nodos inalámbricos es *Two-Ray Ground*, este modelo de espacio libre no considera la reflexión en la tierra, siendo más preciso a mayores distancias entre los enlaces.

NS2 soporta varias tecnologías de los diferentes protocolos de acceso al medio por ejemplo las comunicaciones satelitales. Para el caso de las redes inalámbricas no satelitales las MAC más notorias que ofrece Network Simulator 2 son el protocolo MAC

802.11 para redes WLAN, el protocolo TDMA basado en preámbulo que se usa en algunos sistemas que incluyen las tecnologías celulares, también se tiene la 802.15.4 (SMAC) Sensors-Mac diseñada para redes de área personal de tasa baja, exclusivas para redes de sensores inalámbricos.

Para el protocolo de enrutamiento ad-hoc se dispone de DSDV, DSR, TORA y AODV que para el caso de estudio la que mejor se ajusta de acuerdo a la red de sensores inalámbricos es AODV la cual adiciona las características de descubrimiento y mantenimiento de rutas DSR y el enrutado salto a salto, los números de secuencia y los beacons de DSDV.

Parámetros de la simulación

En la simulación se tuvo en cuenta el protocolo IEEE 802.15.4 antes mencionado y se adaptaron los archivos de propiedad de Jianliang Zheng⁸. Teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- El Tipo de tráfico es CBR (Constant Bit Rate), basado en protocolo de internet UDP (User Datagram Protocol). Las características de este tráfico son: transmisión de una vía, tamaño del paquete e intervalo entre paquetes definido.
- Para el caso se tendrán 5 nodos. Y uno de ellos el nodo coordinador de la red PAN.
- Modelo de radio-propagación: Two Ray Ground donde la potencia de la señal recibida a una distancia d , se tiene la ecuación:

$$Pr_d = \frac{Pt * Gt * Gr * hr^2 * ht^2}{d^4 L}$$

⁸ Recuperado el 20 mayo de 2014. Obtenido de <http://samtrac.informatik.huberlin.de/brn/browser/BerlinRoofNet/>

donde:

P_r d Potencia recibida a la distancia d

P_t Potencia señal transmitida

G_t Ganancia del transmisor

G_r Ganancia del receptor

h_t Dimensión antena transmisora

h_r Dimensión antena receptora

L Pérdida trayectoria

En la simulación se usó una antena omnidireccional, la cual permite transmitir a todas las regiones con la misma intensidad.

Para la capa de enrutamiento se tiene en cuenta el tipo de cola *DropTail* que modela perfectamente una cola FIFO (First in First Out), con un límite de elementos en la cola tomado como el valor típico en las simulaciones de 150, sin llegar afectar el desempeño de la red.

De acuerdo a lo anterior se asumen los siguientes parámetros:

Parámetros	Valor
Modelo de radio-propagación	Two-Ray Ground
Tipo de antena	Antena Omnidireccional
Ganancia del transmisor	1.0
Ganancia del receptor	1.0
Pérdida por trayectoria	1.0
Distancia entre nodos	2.5m

Tabla 12. Parámetros simulación

Fuente: Autor

Las variables de potencia son:

1. Potencia de transmisión (Pt_)

De acuerdo al estándar IEEE 802.15.4, la potencia máxima con la cual se transmite es de 1mW, se tiene en cuanto este valor en la simulación.

2. Umbral de recepción (RXThresh_)

Mínima potencia con la que se recibe el paquete. Para XbeeS2 se tiene una sensibilidad de recepción de -95dBm. Esto sería:

$$PRXThresh_ = -95dBm = 3.16227 * 10^{-3} W$$

3. Umbral de sensado de portada (CSThresh_)

Es el rango de sensado de portadora de los nodos, en el cual debe al menos del mismo valor que el umbral de recepción para el caso:

$$PRXThresh_ = CSThresh_ = -95dBm = 3.16227 * 10^{-13} W$$

Con todos los parámetros anteriormente mencionados se procede con el desarrollo del script (1caso.tcl) para la simulación se considera un tiempo de simulación de 15s, la salida mostrada en el terminal de sistema operativo Ubuntu notifica el establecimiento de la red PAN. (Ver anexo A).

Se finaliza la simulación y se muestra establecimiento de la red en el software nam, complemento de NS2 para la visualización gráfica de la red configurada. Como se aprecia en la Figura 45. A su vez se guarda el archivo (1caso.tr) donde se encuentran todos los resultados de la simulación (Ver anexo B).

En total se generan tres archivos: se programa los parámetros mencionados con extensión .tcl (1caso.tcl) para elaborar la simulación, cuando este archivo se ingresa a ns2 este genera internamente los archivos de resultados

de la simulación que es el entorno gráfico de la red .nam (1caso.nam) y el de resultados .tr (1caso.tr).

Finalmente se puede visualizar la simulación por medio del programa nam, por lo cual se evidencia el establecimiento de la red de área personal y transmisión de los nodos hacia el coordinador:

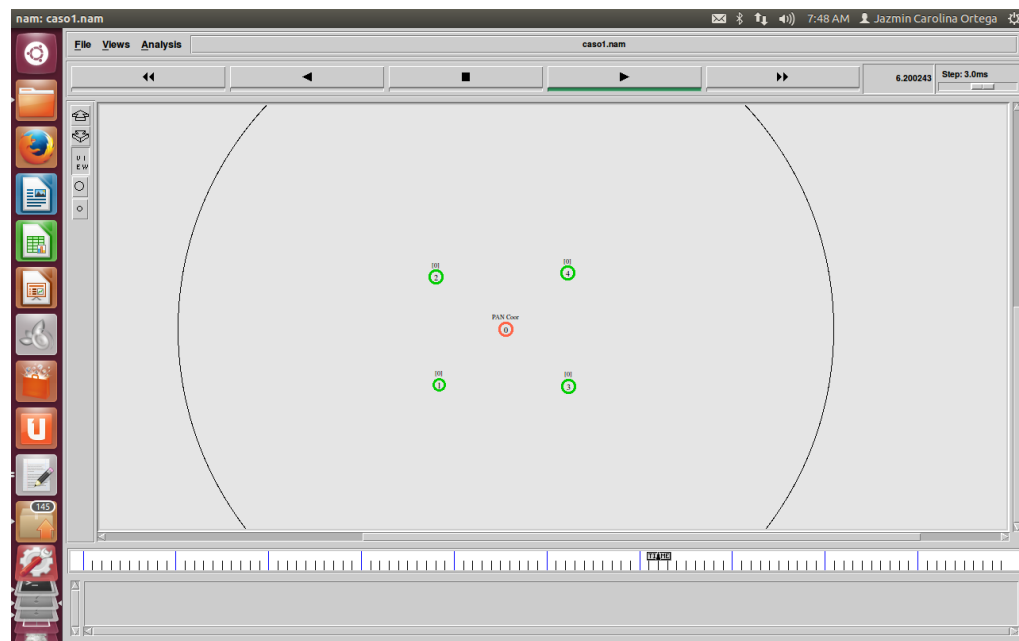


Figura 45. Simulación de la red en NAM

Fuente: Autor

4.4 Desarrollo y adecuación del sistema electrónico para la captura de las variables climáticas

Las variables climáticas seleccionadas para el desarrollo del proyecto corresponden a la humedad relativa y temperatura ambiente, estas variables ambientales suministran información relevante, con el cual se puede monitorizar el estado de un cultivo, ya sea para tener un diagnóstico, seguimiento y/o control de las condiciones adecuadas.

Para la adquisición de las variables ambientales se utiliza un conjunto de componentes electrónicos, los cuales conforman una red inalámbrica de sensores. (Ver Figura 46),

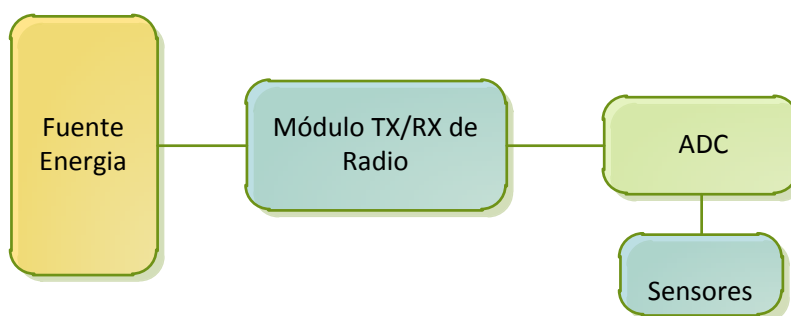


Figura 46. Componentes de una WSN

Fuente: Autor

Teniendo cuenta la Figura 46 se presenta los componentes implementados para desarrollar las tarjetas de adquisición de la red, como primera medida el módulo de radio escogido son los Xbee-S2, lo cual son dispositivos adecuados para las comunicaciones ZigBee, sensores electrónicos de humedad relativa y temperatura ambiente que en la sección 4.1 se explicó la necesidad de evaluar dichas variables, en este orden se realizó una adecuación de la señal para procesarla en los módulos Xbee sin necesidad usar un microcontrolador mediante el acondicionamiento de los sensores.

En cuanto al módulo de transmisión este permitirá la interconexión inalámbrica para adecuar, procesar y transmitir las variables climáticas recibas de los sensores, por

medio de los dispositivos Xbee-S2 antes mencionados, los cuales como se explicó en el apartado 4.3 vendrían a hacer 4 para los nodos de adquisición y 1 de coordinador que se encuentra en la estación base, ubicado en depósito de mantenimiento de la Universidad de San Buenaventura, donde funciona el sistema de información del cultivo que se va a simular ($25m^2$).

Las características de los módulos se ajustan al diseño de red PAN en topología estrella que se plantea (Ver Figura 43), pueden ser programados como coordinador, routers o dispositivos terminales para cualquier tipo de arquitectura. A continuación se resumen las características de los módulos RF en la Tabla 12.

Tabla 13. Características módulos de transmisión Inalámbrica

Xbee	Max data rate	Frequency band	Transmit power	Antenna	IO pins digital	ADC inputs	Range
 Xbee 2mW Chip Antena-Serie 2	250kbps	2.4 Ghz	2mW output (+3dBm)	Built-in	8	(6)10bit	(120m) línea abierta (40m) interiores

Fuente: Características XbeeSerie2. Recuperado el 12 de febrero de 2014. Obtenido de <http://www.xbee.cl/caracteristicas.html>. Adaptado por el autor.

De acuerdo a las características anteriores la razón por la que se adoptó los módulos Xbee fue porque estos tienen la capacidad de recibir o transmitir datos analógicos sin la necesidad de un microcontrolador por medio del ADC (convertor análogo digital) interno. Estos módulos pueden ser configurados para realizar estas operaciones, pero están limitados, ya que no pueden utilizar operaciones lógicas, y tampoco pueden transmitir señales análogas, pero si pueden recibirlas.

Por tanto al muestrear las señales en el módulo Xbee en los conversores A/D los datos resultan equipados en 10 bits. A su vez se puede modificar el tiempo de muestreo mediante el comando IR (unidad en ms), otra característica es el número de muestras las cuales se pretenden tomar antes de enviar datos, mediante el comando IT. “Se puede

llegar a tomar 43 muestras antes de enviar, con un máximo tiempo de muestreo (1muestra/ms)”. (Fortuño, 2012, pág. 34)

Sin embargo para utilizar el ADC se debe tener presente el rango de ventana de trabajo del Xbee-S2 por ello se tiene en cuenta los siguientes datos:

Tabla 14. Características de los conversores A/D del Xbee

Módulo	Número de bits	Tensión de Referencia ($V_{in\ max}$)	Resolución (LSB/V)	F. de muestreo
Xbee	10	1,2	1,17 [mV]	1 [KHz]

Fuente: Autor

En consecuencia el proceso para el sistema de adquisición se tiene presente las siguientes etapas teniendo en cuenta los componentes antes descritos:



Figura 47. Adquisición de las variables climáticas

Fuente: Autor

La instalación de estos dispositivos depende de factores propios del cultivo por tanto debe ser portable, resistente a la intemperie y operado por baterías, en consecuencia se colocan en una tarjeta afuera de la adquisición para evitar inconvenientes y la parte de adquisición dentro de una caja de paso.

Teniendo en cuenta el conversor análogo digital del Xbee-S2 se escoge unos sensores analógicos para optimizar los recursos y utilizar el ADC interno del módulo por tal razón se tienen presente los sensores comerciales análogos que cumplan con amplio rango de trabajo para las mediciones respectivas. También se analiza las características

de energía y sensibilidad que sean adecuados para el desarrollo del proyecto. En consecuencia a lo anterior se determinan los siguientes sensores:

- **Sensor de temperatura TMP36**

El TMP36 es un sensor de temperatura de precisión, son de bajo voltaje La salida de voltaje es linealmente proporcional a temperatura en grados Centígrados, que opera entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una precisión de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ dentro de este rango. La tensión de alimentación oscila entre los 2.7 V y 5.5 V. La función de transferencia lineal tiene una pendiente de $10\text{ mV} / ^{\circ}\text{C}$.

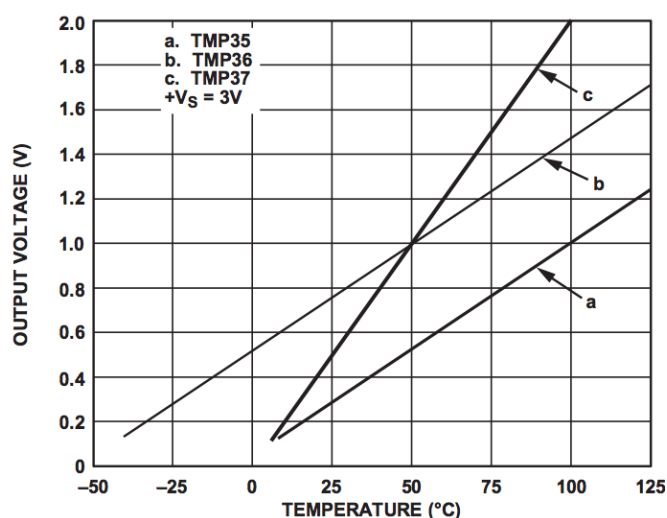


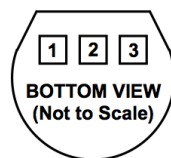
Figura 48. Salida de Voltaje vs. Temperatura (Sensor TMP36 gráfica b.)

Fuente: Datasheet TMP35/TMP 36/TMP 37. Recuperado el 10 de marzo de 2014. Obtenido de http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/TMP35_36_37.pdf

Sin duda la principal ventaja de este sensor es que opera en un mismo rango de tensiones que el módulo XBee lo que simplifica en gran medida el diseño.

En base a las necesidades del proyecto y a las características de los diferentes sensores descritos se ha escogido para desarrollar el proyecto el sensor de temperatura TMP36.

El TMP36 se caracteriza por el poco espacio que ocupa en el diseño y la baja energía que consume, lo que hacen ideal para la aplicación del proyecto.



PIN 1, +V_S; PIN 2, V_{OUT}; PIN 3, GND

Figura 49. Configuración de pines sensor TMP 36

Fuente: Datasheet TMP35/TMP 36/TMP 37. Recuperado el 10 de marzo de 2014. Obtenido de http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/TMP35_36_37.pdf

- **Sensor de humedad HIH 4000-002**

Se escoge el sensor Honeywell modelo HIH4000 por costo-beneficio resulta viable usar un sensor análogo, además este es un sensor lineal con salida analógica ideal para el trabajo que se está realizando, es decir es apropiado para la conexión al Xbee. El voltaje de operación es de 4 a 5.8V. La salida esta relaciona al porcentaje de humedad (0 – 100%) relativa respecto al voltaje de salida, relacionada con la siguiente ecuación

$$V_{out} = V_{Supply} * (0.0062 \text{ sensorRH} + 0.16) \text{ Típicamente a } 25^\circ\text{C} \quad (5)$$

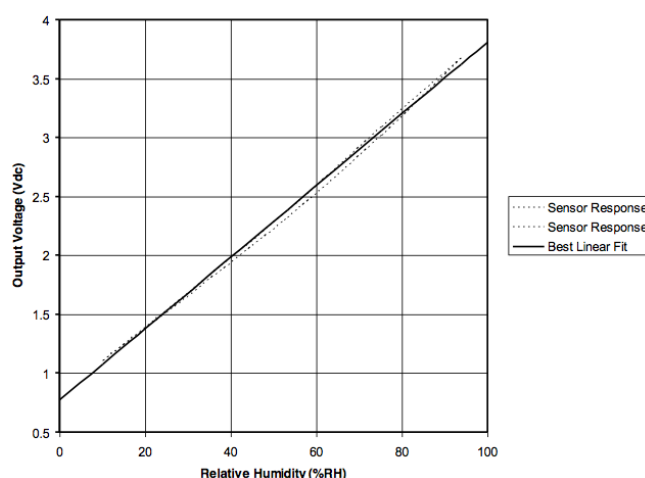


Figura 50. Salida voltaje vs humedad relativa a 25 °C y 5Vsupply

Fuente: Datasheet: Sensor de Humedad, Serie HIH-4000. Recuperado el 12 marzo de 2014. Obtenido de <http://www.farnell.com/datasheets/85556.pdf>

Para el la etapa de adquisición de la señal como se mencionado anteriormente se utiliza el ADC del Xbee y por ello se tiene presente los rangos de la ventana de trabajo para la cual se debe acondicionar los sensores. (Ver tabla 13)

- **Adaptación del sensor para la monitorización de la temperatura**

Para monitorizar la temperatura se debe tener en cuenta la respuesta que ofrece el sensor de acuerdo con la curva temperatura – Tensión:

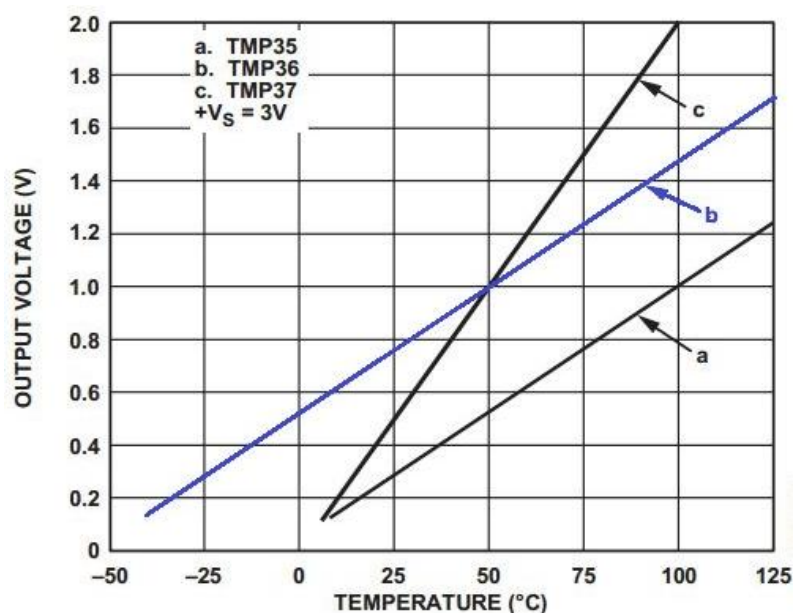


Figura 51. b) Salida de voltaje vs Temperatura

Fuente: Lectura de temperatura con sensor TMP36. Recuperado el 12 marzo de 2014. Obtenido de <http://opironelectronics.blogspot.com/2013/01/lectura-de-temperatura-con-sensor-tmp36.html>

En este caso es necesario saber el rango de operación del sensor cuando es alimentado a $V_{Supply} = 3.3V$ igual al del módulo, para luego estos valores adaptarlos al ADC del Xbee. Por tanto se realizan varias pruebas del sensor de temperatura y se almacenan los datos medidos los cuales se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Datos resultantes medidos en el sensor TMP36

Temperatura (°C)	Voltaje (mV)
16	480
20	600
22	660
24	720
25	750
30	900
35	1050
40	1200

Fuente: Autor

Las tensiones de entrada de las entradas analógicas del Xbee pueden variar entre 0 y 1.2V, mientras que la tensión máxima a monitorizar es 40 °C (1200mV), se debe acondicionar utilizando un factor de conversión para adaptar estos valores. Pero para el caso no es necesario puesto que el valor máximo es igual al rango del ADC.

La relación está dada por el voltaje de salida máximo aceptado por el Xbee sobre el voltaje del sensor que se quiere pretende operar que es igual al del Xbee, ósea 1.2 V. Como se muestra en la ecuación 6.

$$\frac{V_{out}}{V_{sensor}} = \frac{1.2}{1.2} = 1 \quad (6)$$

$$\therefore V_{out} = 1 + \frac{R_f}{R_1} * V_{sensor} \quad (7)$$

$$V_{out} = 1 * V_{sensor} \quad (8)$$

Como tiene una ganancia unitaria se utilizará un amplificador no inversor donde $R_1 = \infty$ y $R_2 = 0$ Por tanto, la señal de salida y de la entrada coinciden: $V_o = V_{sensor}$. Para ello se utiliza el siguiente circuito analógico basado en un operacional no inversor de bajo consumo que consta de dos amplificadores operacionales (LM358), de alta ganancia y frecuencia interna compensada, además que opera con una sola fuente de alimentación en una amplia gama de voltajes con frecuencia de 1MHz.

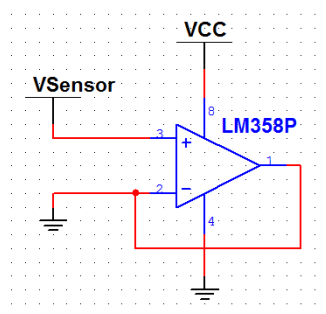


Figura 52. Topología Amplificador no inversor

Fuente: Autor

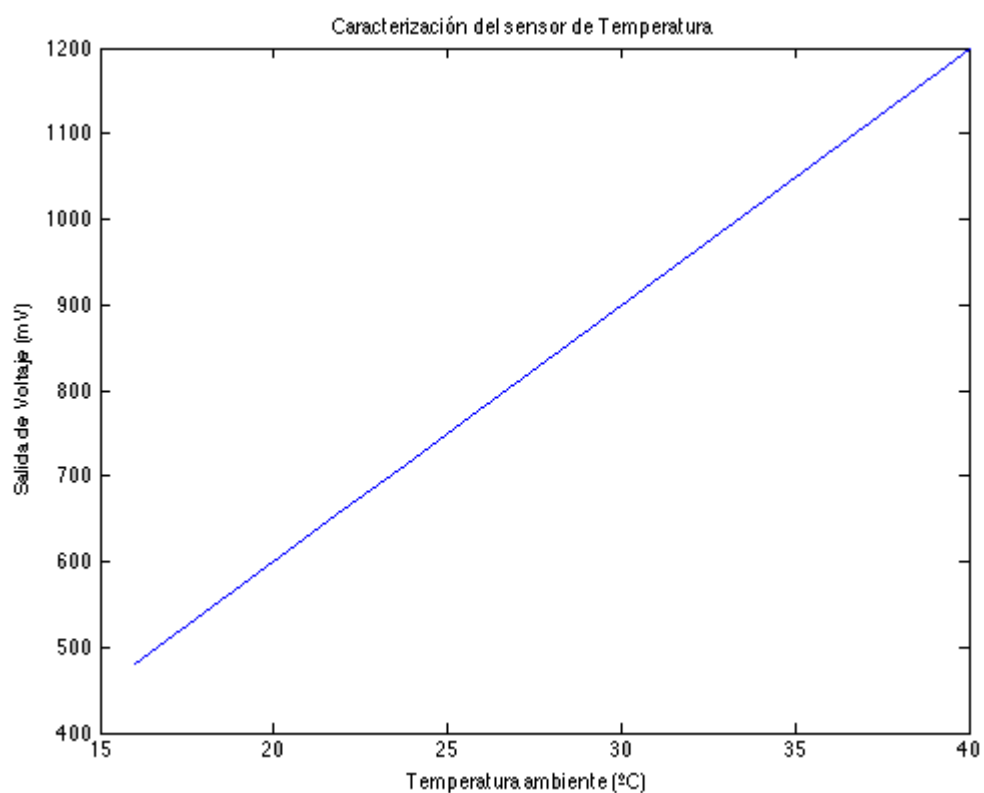


Figura 53. Curva caracterización del sensor de temperatura resultante.

Fuente: Autor

- **Adaptación para la monitorización de la Humedad Relativa (%RH)**

De acuerdo al sensor los datos suministrados en el datasheet se tiene presente la siguiente ecuación:

$$V_{out} = V_{Supply} * (0.0062 \text{ sensorRH} + 0.16) \text{ (9)}$$

Al igual que se realizó con el sensor de temperatura se mide la salida del sensor de humedad cuando el $V_{Supply} = 5 \text{ V}$ en donde describe los datos de salida de acuerdo a la Tabla 16. Se toman algunos valores para tener presente hasta que voltaje puede llegar a sensor cuando la humedad relativa es de 100%.

Tabla 16. Datos de la salida sensor de humedad HIH 4000 002

Humedad Relativa (%)	Voltaje (V)
60	2.66
64	2.8
66	2.85
67	2.88
68	2.91
69	2.94
70	2.97
71	3
81	3.3
88	3.5
97	3.8
100	3.9

Fuente: Autor

Al seleccionar todo el rango de trabajo que es hasta 100%RH ($\cong 3.9\text{V}$), como humedad relativa máxima a monitorizar, este será el valor final de la escala y por tanto se ajusta a 1.2V, tensión de rango del ADC Xbee. Se utiliza el modelo amplificador operacional de este modo para generar la ganancia siguiente:

La relación está dada por el rango máximo de la ventana del ADC del Xbee que es 1.2V sobre el máximo voltaje de salida del sensor que es 3.9V como se muestra en la Ecuación 10.

$$\frac{V_{out}}{V_{sensor}} = \frac{1.2}{3.9} = 0.30 \quad (10)$$

$$\therefore V_{out} = 1 + \frac{R_f}{R_1} * \frac{R_4}{R_3 + R_4} * V_{sensor} \quad (11)$$

$$V_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} * \frac{R_4}{R_1} * V_{sensor} \quad (12)$$

Como vemos, con este circuito podemos tener un amplificador no inversor con cualquier ganancia, incluso si ésta es menor que 1, lo que no ocurriría con el amplificador no inversor simple aplicado anteriormente.

En particular, podemos construir el circuito de la siguiente forma, por lo que la amplificación viene dada por el cociente de las resistencias R_4/R_1 .

$$V_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} * \frac{R_4}{R_1} * V_{sensor} \quad (13)$$

$$\frac{R_4}{R_1} = 0.3 \quad (14)$$

Donde $R_4 = 3k\Omega$ y $R_1 = 10k\Omega$

$$\therefore V_{out} = \frac{10k + 3.3k}{10k + 3k} * \frac{3k}{10k} * V_{sensor} \quad (15)$$

Por lo que el rango ya está para el máximo voltaje de 3.9V que es la máxima humedad relativa (100%) y por tanto se ajusta a 1.2 V que es el rango máximo del ADC.

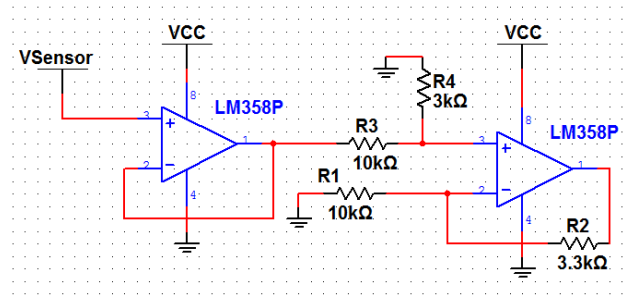


Figura 54. Topología Amplificador no inversor con divisor de tensiones

Fuente: Autor

Se encuentra exactamente la relación necesaria para poder medir la tensión en el Xbee. Los valores seleccionados son $R3 = 10k\Omega$ y para el caso $R2 = 3.3k\Omega$ respectivamente.

$$V_{out} = \frac{10k + 3.3k}{10k + 3k} * \frac{3k}{10k} * 3.9 \quad (16)$$

$$V_{out} = 1.197 \cong 1.2 V \quad (17)$$

De acuerdo a la relación de la Ecuación 10 se adaptada el sensor y por consiguiente la salida del voltaje queda de la siguiente forma como se detalla en la Tabla 17.

Tabla 17. Datos de la salida sensor de humedad HIH 4000-002 con el acondicionamiento del sensor para adaptarlo al ADC del Xbee.

Humedad Relativa (%)	ACONDICIONAMIENTO ADC (V)
0	0.24
5	0.29
10	0.34
15	0.39
20	0.43
30	0.53
40	0.63
50	0.72
55	0.77
58	0.8
60	0.82
64	0.86
66	0.87
67	0.88
68	0.89
69	0.9
70	0.91
71	0.92
81	1.01
88	1.07
97	1.17
100	1.2

Fuente: Autor

Como resultado del acondicionamiento del sensor de humedad relativa, que se evidencia en la Tabla 16, se genera una nueva respuesta del sensor para adecuarlo al ADC del Xbee-S2, como se muestra en la Figura 55.

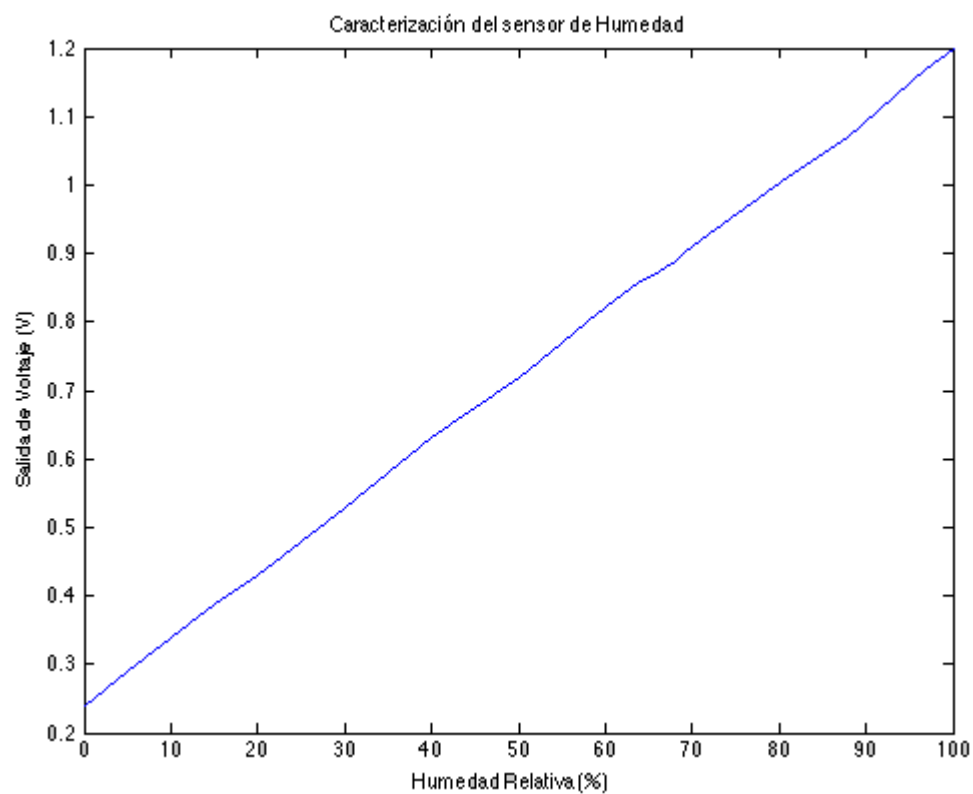


Figura 55. Curva caracterización del sensor de humedad relativa resultante

Fuente: Autor

Con respecto a lo antes planteado en el acondicionamiento de los sensores de temperatura ambiente y humedad relativa se procede con el diseño de las tarjetas donde van a ir los dispositivos para luego ser conectados a la tarjeta de adquisición de los datos. (Ver Figura 56)

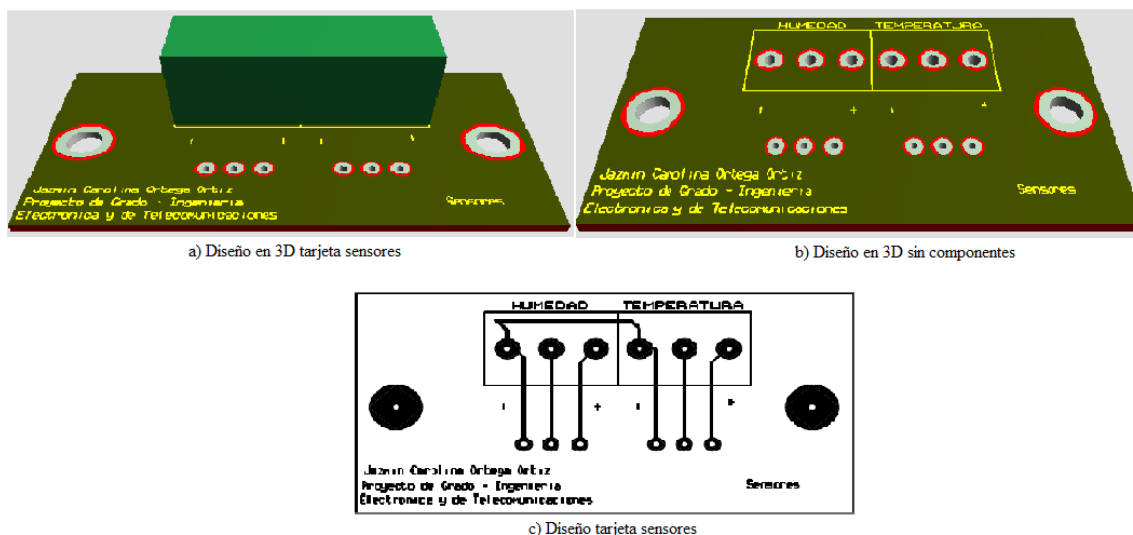


Figura 56. Tarjeta para la conexión de los sensores

Fuente: Autor

Continuando con la etapa de adecuación de la señal y teniendo los sensores acondicionados para adaptarlos al ADC del Xbee-S2, se procede con el desarrollo hardware de la tarjeta de adquisición de las variables climáticas como muestra el siguiente esquema:

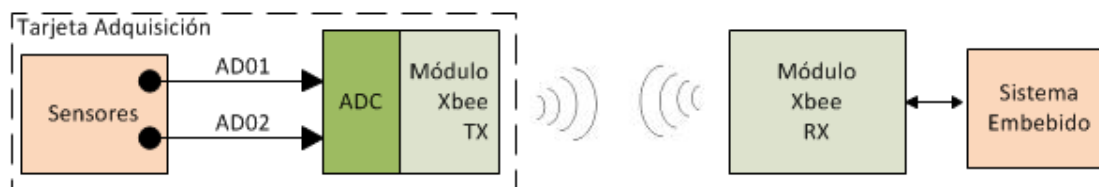


Figura 57. Esquema general adecuación de adquisición de las variables climáticas

Fuente: Autor

El diseño del módulo de adquisición de la señal se tiene presente los dispositivos RF, Xbee-S2, los cuales se configuran en modo API debido a que este tipo de configuración es más preciso, porque permite el uso de tramas con cabeceras que aseguran la entrega de los datos, al estilo TCP. Toda la información cuando el Xbee se

encuentra en este modo entra y sale empaquetada en tramas, las cuales definen operaciones y eventos dentro del módulo.

De acuerdo al modo de configuración anterior se tienen en cuenta los siguientes parámetros que se van a configurar en el coordinador, y los terminales finales las cuales se describen a continuación, su programación se realiza en la herramienta Moltosenso Network Manager que permite configurar los dispositivos Digi International X-CTU.

- *Firmware*

La red de sensores Xbee trabajan con el firmware API para el coordinador y los dispositivos finales. Las versiones actuales para cada uno de los elementos de la red son:

Tabla 18. Versiones de los elementos de la red

DISPOSITIVOS	VERSIÓN FIRMWARE
Coordinador	21A7
Dispositivos finales	2270

Fuente: Autor

- *Dispositivos finales*

Estos elementos deben ser muy bien configurados, debido a que deben tener en cuenta parámetros de ahorro de energía, frecuencia de muestreo, direccionamiento de paquetes y políticas de acceso a la red. Los parámetros de configuración para este proyecto son:

- ✓ ID: Al igual que la anterior se configura con “885”
- ✓ NJ: Este parámetro indica la política de ingreso a la red. Si se pierde la comunicación con el padre, intentará la búsqueda de un nuevo padre cuya ID coincida con la propia. Se configuro en “1”.

- ✓ ST: Este parámetro se refiere al tiempo que el dispositivo va a permanecer encendido antes que entre nuevamente a modo de bajo consumo. Para pruebas se configura el parámetro en 5 segundos “1388”.
- ✓ D1: El voltaje representado por la medición del sensor temperatura, se conectó al pin 19 de los dispositivos finales. Este pin corresponde a la entrada analógica AD3, por lo que se configura este parámetro en “2 ADC”.
- ✓ D2: El voltaje representado por la medición del sensor humedad, se conectó al pin 18 de los dispositivos finales. Este pin corresponde a la entrada analógica AD3, por lo que se configura este parámetro en “2 ADC”.
- ✓ IR: Se refiere a la frecuencia de muestreo del dispositivo, es decir, cada cuanto tiempo va a tomar una muestra del pin analógico y enviara una trama hacia el coordinador con su respectivo valor. Para efectos de prueba, se configura el valor de cada 5 segundos. El parámetro se configura en “1388”.

Se presenta un esquema general de los parámetros que se deben configurar en el programa Moltosenso para la configuración de la red PAN, en la Figura 58.

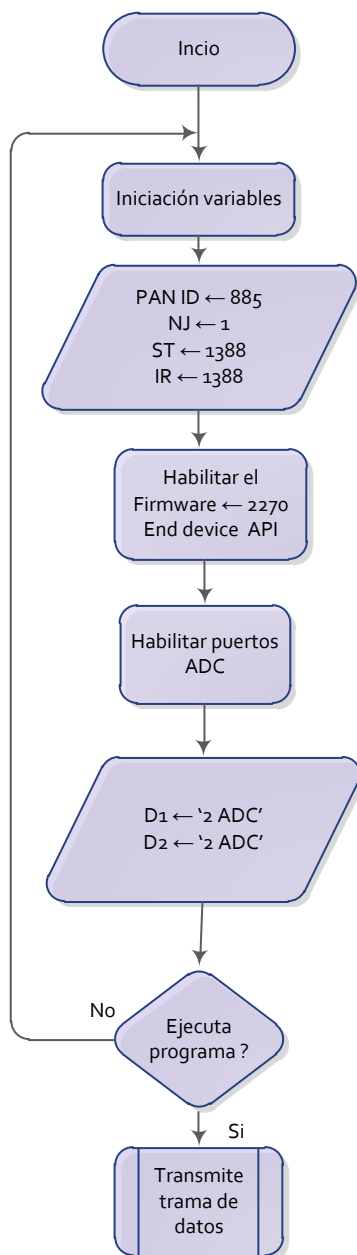


Figura 58. Esquema de configuración dispositivo final

Fuente: Autor

- *Coordinador*

Los parámetros de configuración para el coordinador son:

- ✓ ID: Esta opción permite establecer una PAN ID fija, a la que se deben asociar los demás dispositivos. La PAN ID seleccionada para el caso es “885”.
- ✓ NJ: Con este parámetro se configura el coordinador para permitir el ingreso de dispositivos por un periodo de tiempo determinado, pasado el tiempo no dejara ingresar ningún otro dispositivo. Los módulos que no tengan que ver con la red no pueden ingresar.

En la Figura 59 se muestra el esquema de los parámetros requeridos para activar el coordinador en modo API:

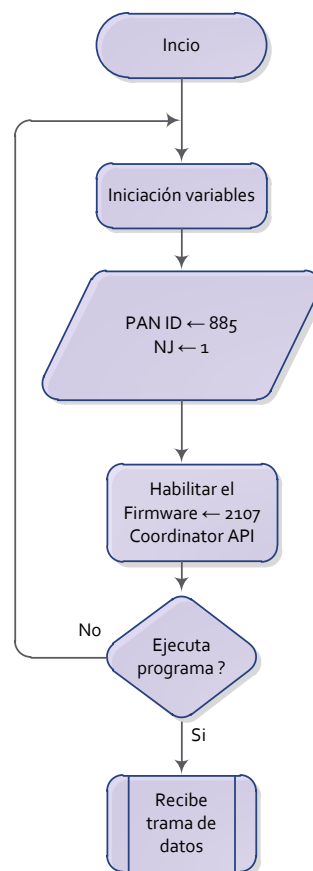


Figura 59. Esquema de configuración dispositivo coordinador

Fuente: Autor

Como resultado de la configuración del Xbee y el acondicionamiento de las variables, se tiene lista la información de los datos como etapa final para generar luego la tarjeta de adquisición, por lo cual va a ser transmitida por medio de los Xbee en tramas, y el receptor es el coordinador que recibe los datos. El esquema de la trama es el siguiente:

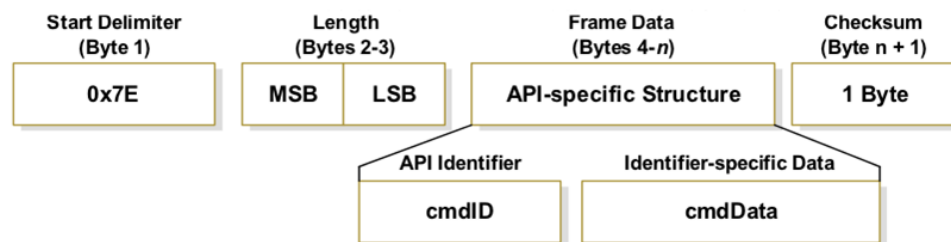


Figura 60. Estructura específica de una trama API

Fuente: Recuperado el 21 abril de 2014. Obtenido de http://1.bp.blogspot.com/-KKVgyz3jXOY/ThAancmZQhI/AAAAAAAAAQY/3V1dHvYgKk4/s1600/xbee_api_frame.png. Adaptado por el Autor.

Con respecto a la anterior Figura 60, la estructura de la trama API es necesario analizar la información que se va a recibir para obtener solo los datos convenientes; que para el caso son los datos de las variables, en su defecto los sensores en cada nodo.

Se verifica una trama para saber si el dispositivo quedó configurado y se toma de ejemplo la trama obtenida del proyecto para identificar los datos recibidos y la dirección de envío.

0x7E 0x00 0x14 0x92 0x00 0x13 0xA2 0x00 0x40 0xAB 0xB9 0x31
0x90 0x60 0x01 0x01 0x00 0x00 0x06 0x02 0x5A 0x02 0xE8 0xA5

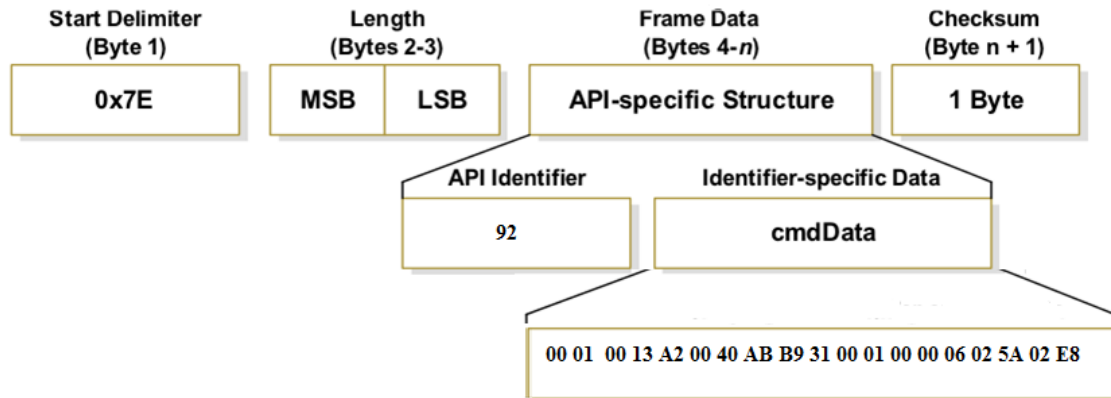


Figura 61. Ejemplo de trama de salida

Fuente: Autor

Tabla 19. Análisis de la trama

p	Ejemplo trama salida	Descripción
a	7E	es el delimitador de las tramas API, toda trama API debe empezar por 7E
q	00 14	Longitud de la trama, son entonces 21 datos a partir de 10 y sin contar el checksum.
u	92	es el tipo de trama API, ésta específicamente es la recepción de muestras de I/O
e	00 13 A2 00 - 40 AB B9 31	Son la dirección o serial del módulo fuente, es decir el Router que envía la información. Parte alta SH y baja SL respectivamente
t	00 01	es el ACK o acknowledgement que debe devolver el receptor para indicar que llegó la trama, debe ser un número diferente de cero.
e	00 06	representa el estado de las I/O digitales configuradas, es decir D2 y D3
A	02 5A	en decimal 602, es el valor de la entrada análoga D1. Sensor Temperatura
P	02 E8	744, en decimal es el valor de la entrada análoga D2. Sensor Humedad
I	A5	es el checksum o algoritmo de verificación de información recibida completa.

Fuente: Autor

De acuerdo a la trama recibida se tiene en cuenta la dirección y el dato que recibe de cada sensor para ello se analiza la información por parte de los sensores:

02 5A: en decimal 602, es el valor de la entrada análoga D1. Sensor Temperatura

$$\text{Valor señal análoga} = \text{Resolución} * \text{valor digital leído} \quad (18)$$

$$\frac{1.2}{1024} \times 602 = 0,7V \text{ dato salida en el pin 19 del módulo XBEE} \quad (19)$$

02 E8: 744 en decimal, es el valor de la entrada análoga D2. Sensor Humedad

$$\frac{1.2}{1024} \times 744 = 0,87V \text{ dato salida en el pin 18 del módulo XBEE (20)}$$

De acuerdo al análisis de la trama se tiene presente solo los datos de la dirección y valores de los sensores que son el de temperatura y humedad, para ello se tiene presente la siguiente ecuación que relaciona el valor de la señal análoga con el valor leído en el ADC.

Con respecto a lo anterior y como resultado del análisis de la trama se tiene en cuenta la siguiente información; solo los siguientes datos como se muestra en la Figura 62.

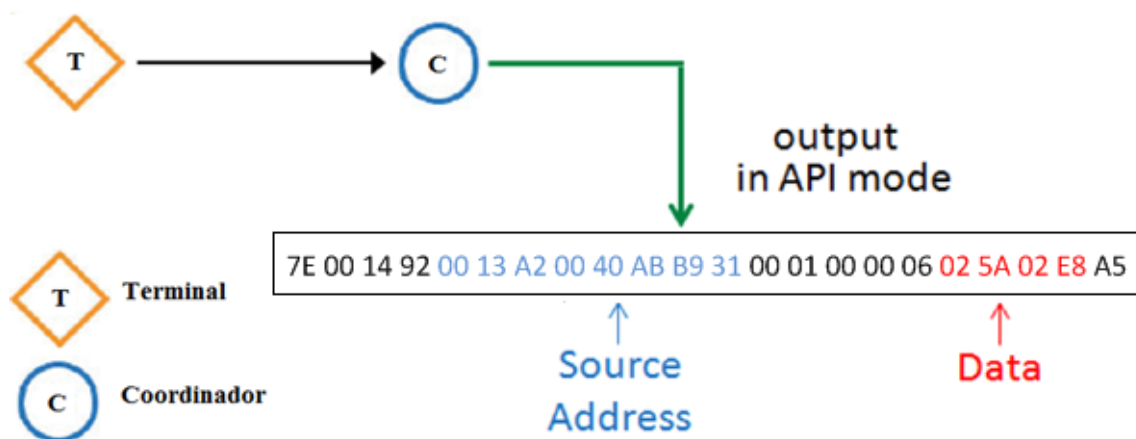


Figura 62. Datos tomados de la trama

Fuente: Autor

Por lo anterior es necesario hacer las conversiones de los datos y para ello se tiene en cuenta la siguiente fórmula que permite obtener los valores analógicos de la trama mediante la siguiente ecuación:

$$V_{out} = Muestra_{AD} * \frac{1200mV}{1024} \quad (21)$$

$$\underline{Vout = Muestra_AD * 0.001171875} \quad (22)$$

Además de la Ecuación 18 se tiene en cuenta las ecuaciones de conversión de los valores para cada sensor. En donde la Ecuación 23 describe la conversión del porcentaje de humedad relativa para el sensor HIH 4000-002. Y a su vez la Ecuación 24 presenta la salida para la conversión de la temperatura en el sensor TMP36.

$$valorhum = \frac{Vout - 0.8}{0.031} \quad (23)$$

$$valortemp = Vout - 0.5 * 100 \quad (24)$$

De acuerdo con el acondicionamiento de los sensores y la programación de los Xbee estos se adaptaron para diseñar la tarjeta de adquisición de datos. Para ello se elabora el circuito que va integrar sensores con la comunicación entre los Xbee, se utiliza el software Eagle para diseñar el circuito debido a que este presenta todos los componentes requeridos para el diseño esquemático.

En el circuito esquemático presenta el acondicionamiento de los sensores presentados en las figuras 53 y 55, así mismo los reguladores de señal de 3.3V para el sensor de temperatura y los módulos RF, también se encuentra un regulador de voltaje de 5V para el sensor de humedad relativa, debido a que se cuenta con una fuente de alimentación de 9V. Y por último se encuentra la conexión de la salida de los sensores al módulo Xbee, teniendo en cuenta las entradas ADC que para el caso fueron el pin 18 (humedad relativa) y pin 19 (temperatura ambiente). Se suministraron unos leds para visualizar la transmisión-recepción de los datos y otro para indicar el encendido de la tarjeta. (Ver figura 63.)

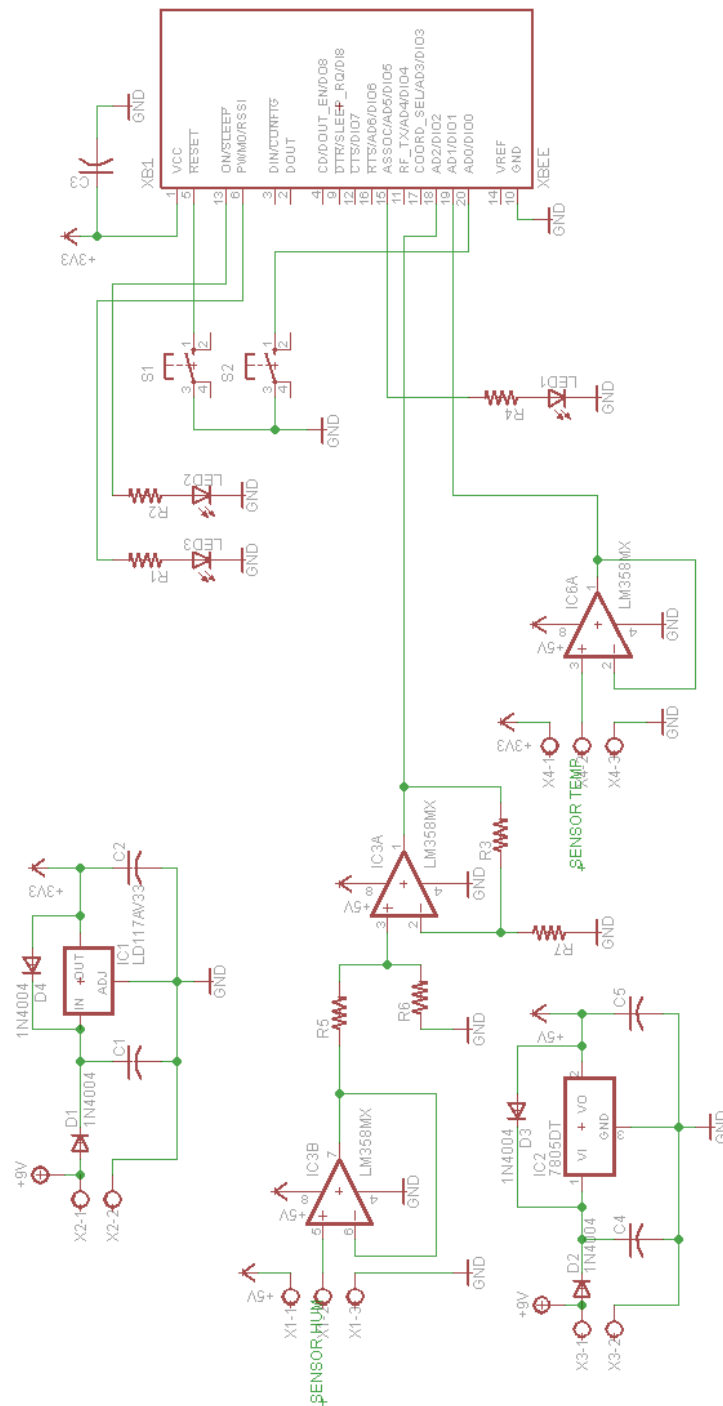


Figura 63. Circuito esquemático de la tarjeta de adquisición datos

Fuente: Autor

Luego de esto se procede a realizar el diseño de la tarjeta de adquisición mediante el circuito esquemático elaborado en la figura 64. Se utilizó el software Proteus v.7.9 en la distribución de Ares y se obtiene el siguiente diseño:

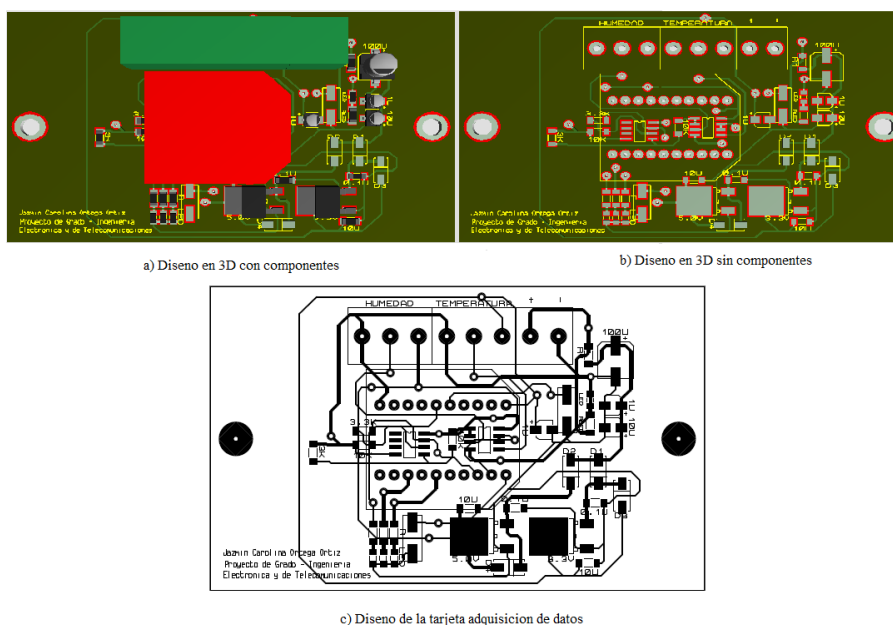


Figura 64. Diseño tarjeta Nodos adquisición de datos

Fuente: Autor

Por cuestiones de montaje en el prototipo se decide colocar los sensores fuera del circuito para evitar que la humedad llegue a proporcionar algún corto, por ello se colocan en cajas de paso como muestra la Figura 76 las tarjetas de adquisición.

4.5 Implementación del Sistema de Comunicaciones

El protocolo IEEE 802.15.4 se ha creado específicamente para el desarrollo de redes inalámbricas de baja velocidad, bajo costo y consumo de potencia. 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 que los alimentarán durante años (Oyarce, 2010).

“Zigbee fue diseñado pensando en paquetes pequeños y se puede observar que para paquetes de menos de 75 bytes, ZigBee tiene, a pesar de su baja velocidad física de transmisión de datos, una velocidad efectiva mayor que Bluetooth” (Dignani, 2011, pág. 33). Por lo tanto, para pequeños paquetes Bluetooth va a gastar mayor energía debido a que necesita mayor tiempo de transmisión/recepción.

Como se puede inferir anteriormente y de acuerdo al estudio de investigación realizado, se presenta el estándar ZigBee como el más idóneo para el diseño de la red inalámbrica de sensores (WSN), la cual se plantea como una solución de comunicación inalámbrica en el proyecto. Por ello es pertinente analizar los estándares implementados en esta tecnología.

Tabla 20. Estándares que apoyan la implementación de WSN

Estándares	Descripción
Capas física y MAC: IEEE 802.15.4	Optimizadas para bajo costo, bajo potencia y desempeño inalámbrico robusto.
Zigbee (2004)	Construido sobre 802.15.4 e incluye un stack de protocolo de red completo para WSN focalizado en redes y control.
Zigbee Pro (2007)	Mejora algoritmos de direccionamiento y ruteo.

Fuente: Córdoba, D.M., (2013). *Estado del arte de las redes de sensores inalámbricos*. (p.10). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Tunja, Colombia

4.6 Acondicionamiento Sistema Embebido

El sistema de monitoreo para variables ambientales del cultivo, adquirido por medio de la comunicación inalámbrica de redes de sensores en la tecnología ZigBee que trabaja con el protocolo IEEE 802.15.4 por las razones anteriormente mencionadas y explicados en los apartados anteriores. Sin embargo, se tiene en cuenta un Sistema Embebido que facilite la integración de los dispositivos de comunicación y las tarjetas de adquisición de las variables ambientales, sin necesidad de utilizar componentes electrónicos complementarios en el sistema de monitorización.

Para implementar el sistema de monitorización se escogió un SE por ser portable y brindar las características de un computador, permitiendo crear una aplicación específica; gestionando de forma eficaz los recursos tanto de hardware como de software para realizar los procesos de captura, almacenamiento y visualización de la información de las variables climáticas.

La actividad específica que realiza el sistema embebido en el sistema de monitorización consiste en capturar la información de las variables ambientales del cultivo hidropónico proveniente de las tarjetas realizadas, procesar y transmitir por medio de un dispositivo externo de comunicación (Xbee-S2), como se muestra en la Figura 65.

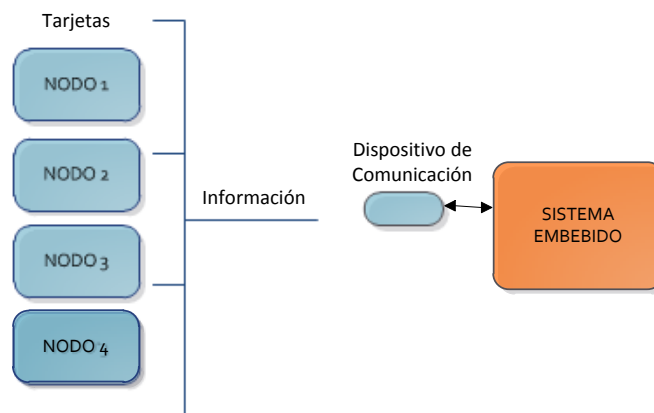


Figura 65. Esquema general para la implementación del Sistema embebido RaspberryPi

Fuente: Autor

El SE RaspberryPi es una placa computadora de bajo costo desarrollada en el Reino Unido para enseñar en las escuelas las ciencias de la computación, la plataforma cuenta con un procesador central ARM1176JZF-S a 700 MHz, un procesador gráfico (GPU) VideoCore IV, y 512 MB de memoria RAM. No incluye un disco duro sino por el contrario usa una tarjeta SD para almacenamiento permanente. La plataforma se presenta a continuación:

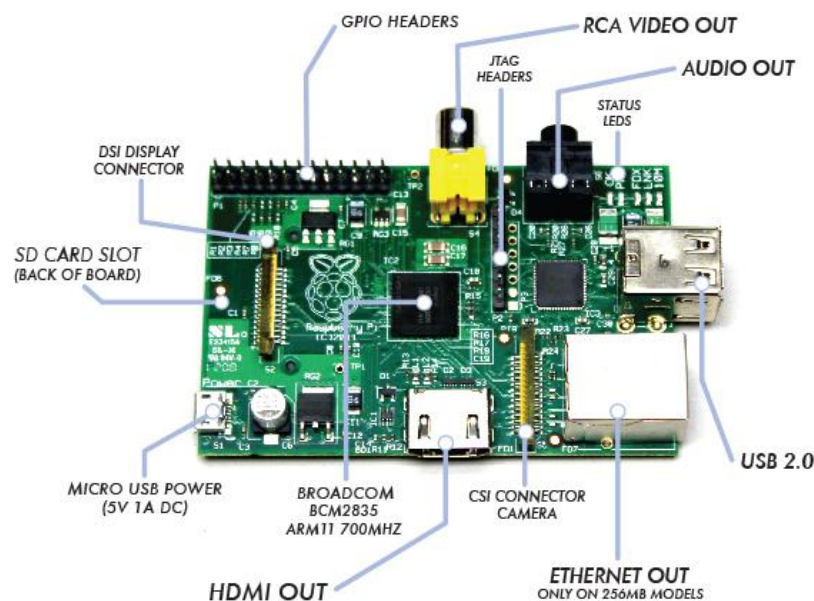


Figura 66. Principales componentes electrónicos y periféricos RaspberryPi

Fuente: Recuperado de <http://blog.ididactic.com/wp-content/uploads/2013/10/351321-raspberry-pi.jpg>

Para el funcionamiento del sistema RaspberryPi es necesario la instalación de un sistema operativo en la memoria SD del sistema, que se hace al introducir una imagen en la tarjeta de memoria. Una instalación convencional puede llevar más de 10 horas si queremos disponer de un entorno de escritorio, por lo que no se usa este método. Se descarga en la página oficial⁹ una imagen del sistema operativo que pueden ser RASPBIAN, PIDORA, OPENELEC, entre otros, en lo cual para el caso se trabajó con Raspbian porque tiene una interfaz gráfica amigable con el usuario es de Debian Wheezy.

⁹ Recuperado el 5 de mayo de 2014. Obtenido de <http://www.raspberrypi.org/downloads>

Para realizar la adecuación del sistema se debe tener en cuenta lo anteriormente descrito; sin embargo se hace necesario contar con todos los dispositivos requeridos para la utilización del sistema RaspberryPi Modelo B, los cuales se describen a continuación: Tarjeta SD de 8Gb, Adaptador de alimentación USB, Cable micro-USB, y para poder conectar dispositivos USB (discos duros, teclado, ratón) es necesario un Hub USB, por ultimo para conectar a la pantalla se debe tener un Cable HDMI o bien adaptador activo de HDMI a VGA si es un monitor de computador.

Posteriormente se realiza la configuración RaspberryPi mediante la descarga del sistema operativo, teniendo en cuenta los siguientes pasos:

1. Instalar Raspbian: Se descarga una imagen del sistema operativo en la tarjeta SD, en el enlace <http://www.raspberrypi.org/downloads>. Luego se procede a descomprimir el archivo (.img). La SD se debe formatear antes de guardar el sistema operativo.
2. Luego se descarga el software libre Win32DiskImager.exe utilidad que permite ingresar la imagen de Raspbian en la tarjeta SD. Se abre el archivo y se descomprime.
3. Se introduce la memoria SD al computador, se elige la imagen a grabar dentro del disco, que se encuentra en C:\2013-07-26-wheezy-raspbian\, para el caso.
4. Una vez copiada la imagen, introducimos la tarjeta SD en nuestra RaspberryPi y se procede a conectar la tarjeta.

Para ingresar al sistema se debe tener presente el siguiente ID y password que en Debian viene por defecto:

usuario: pi
password: raspberry

Luego ingresar al entorno gráfico se realiza por medio del comando

```
pi@raspberrypi - $ startx
```

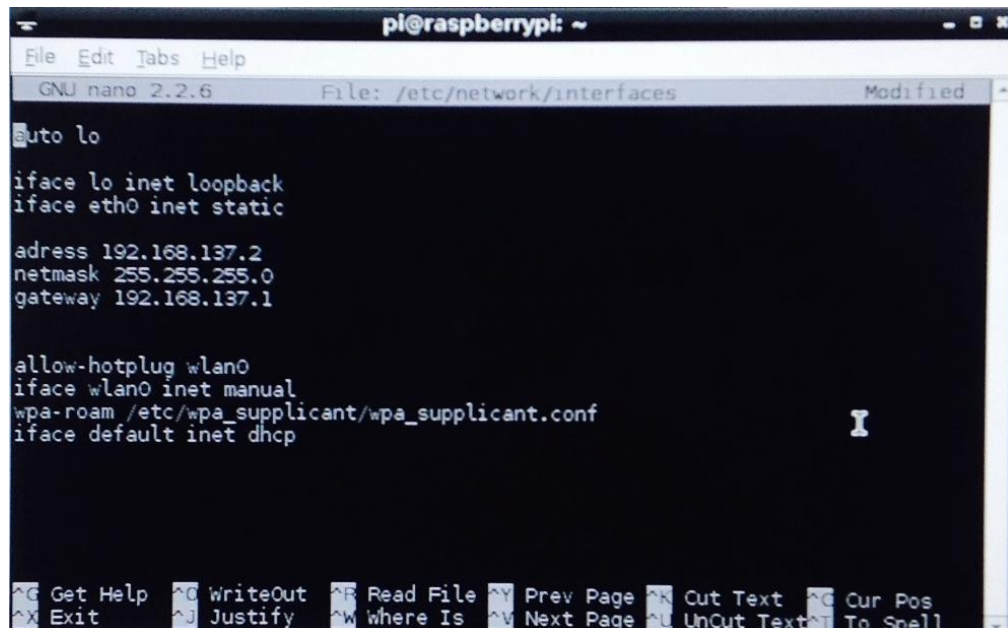
Después de ingresar al entorno gráfico se configura para conectar a internet el RaspberryPi y poder descargar el software necesario para desarrollar la interfaz de visualización de los datos.

La conexión a internet se puede hacer de tres formas: conexión directa al router para ello es necesario un router y un cable RJ45, conexión usando un dongle Wi-Fi o mediante una conexión directa a pc con cable RJ45.

En este caso se realizó mediante una conexión directa a pc con cable RJ45. Lo primero que se hace es en el computador se comparte la conexión a internet entre WiFi y el puerto de Ethernet del pc. Para ello se asigna una dirección ip fija al pc (ejemplo: 192.168.137.1), y posteriormente otra dirección ip fija para el RaspberryPi con el comando:

```
pi@raspberrypi - $ sudo nano /etc/network/interfaces
```

Se ingresa a la siguiente ventana, y se cambia la configuración del eth0 por static se escribe address, netmask y para el Gateway se coloca la dirección ip asignada en el pc. Como se muestra en la Figura 67.



```

pi@raspberrypi: ~
File Edit Tabs Help
GNU nano 2.2.6 File: /etc/network/interfaces Modified
auto lo
iface lo inet loopback
iface eth0 inet static
address 192.168.137.2
netmask 255.255.255.0
gateway 192.168.137.1
allow-hotplug wlan0
iface wlan0 inet manual
wpa-roam /etc/wpa_supplicant/wpa_supplicant.conf
iface default inet dhcp
^G Get Help ^O WriteOut ^R Read File ^Y Prev Page ^X Cut Text ^C Cur Pos
^X Exit ^U Justify ^W Where Is ^N Next Page ^V UnCut Text ^T To Spell

```

Figura 67. Configuración eth0 static

Fuente: Autor

Para ingresar a internet se da click en el navegador Midori y se comprueba conexión a internet escribiendo en la dirección ejemplo google.com, se evidencia como ingresa sin ningún problema.

Teniendo acondicionado el Sistema Embebido y contando con acceso a internet se procede con el desarrollo de la interfaz mediante la integración de la información recibida por la comunicación inalámbrica ZigBee al Sistema Embebido utilizado en el proyecto como estación base. En consecuencia se tiene en cuenta el esquema planteado en la Figura 1.

4.7 Desarrollo de la interfaz de visualización

Para realizar la captura de la información proveniente de las tarjetas de adquisición de las variables ambientales y el sistema de comunicaciones de redes inalámbricas, se tuvo en cuenta el esquema presentado en la Figura 1.

Primero se determina el software adecuado para desarrollar la aplicación, eligiéndose para tal fin *Openframeworks*, por la variedad de librerías que permiten crear aplicaciones multitareas en diferentes plataformas, que se ejecuten ya sea en OSX, Linux iOS, Android, Windows y en la RaspberryPi al mismo tiempo. Y su lenguaje es en código C++.

Como complemento se debe tener en cuenta el IDE el cual va a permitir trabajar con las librerías de *Openframeworks*, para ello se selecciona el IDE Code Blocks, debido a que, es una excelente opción para programar en C, además es un entorno integrado de desarrollo multiplataforma y código abierto, soporta múltiples compiladores entre ellos: GCC (MingW / GNU GCC), MSVC, Digital Mars, Borland C 5.5 u Open Watcom. El compilador que tiene por defecto es MinGW.

Una vez conectado a internet se procede a descargar una versión para Linux de Openframeworks armv6 y descomprimirlo en la carpeta `/home/pi/openFrameworks`. Los comandos utilizados son los siguientes:

```
cd
curl -o http://www.openframeworks.cc/versions/v0.8.1/of_v0.8.1_linuxarmv6l_release.tar.gz
mkdir openFrameworks
tar xvfz of_v0.8.1_linuxarmv6l_release.tar.gz -C openFrameworks --strip-components 1
```

Luego se debe compilar Openframeworks esto tarda aproximadamente una hora. Para el caso se tiene que Openframeworks se encuentra en el `/home/pi/openFrameworks`, se ejecuta los comandos para instalar los paquetes necesarios y compilar Openframeworks.

```
cd /home/pi/openFrameworks/scripts/linux/debian_armv6l
sudo ./install_dependencies.sh
```

Y luego ya es posible compilar Openframeworks con el comando

```
make Release -C /home/pi/openFrameworks/libs/openFrameworksCompiled/project
```

Al igual que en otras plataformas, Openframeworks tiene varios ejemplos que se encuentran en la carpeta `openFrameworks/ejemplos`. Dentro de los ejemplos de los proyectos se clasifican por categorías y para el caso de elaborar la interfaz se toma un ejemplo y se trabaja sobre: `cd/home/pi/Desktop/serialExample/serialExample:` dirección donde se desarrolla la interfaz.

Una recomendación es guardar la aplicación tres niveles bajo la carpeta de Openframeworks.

Luego se procede a instalar el IDE Code Blocks para ello es necesario ir a donde se descomprimió Openframeworks, para el caso es:

```
cd /home/pi/of_preRelease_v0.8.0_linux_cb_FAT/scripts/linux/debian
```

Una vez en el directorio anterior se ejecutan los scripts:

```
./install_codeblocks.sh
./install_dependencies.sh
```

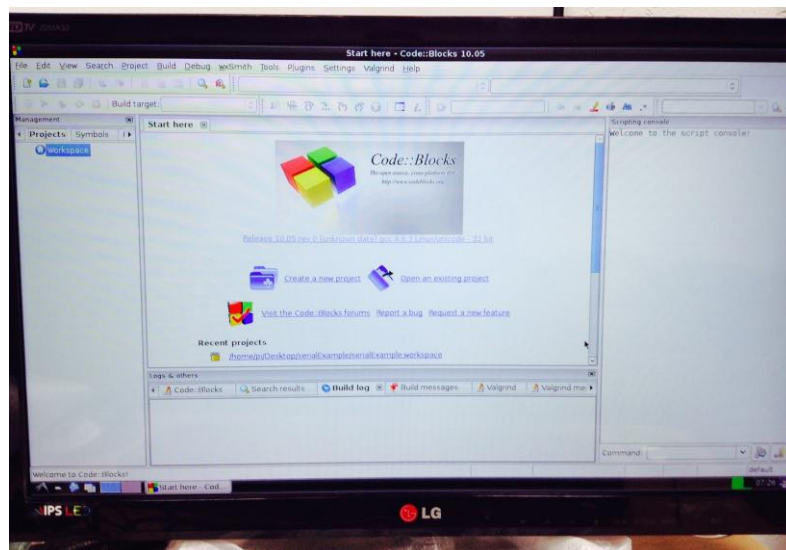


Figura 68. Software Code Blocks RaspberryPi

Fuente: Autor

Teniendo el software sobre la RaspberryPi se realiza la integración de la información de las variables ambientales del cultivo, para ello se desarrolla un algoritmo que permita procesar, almacenar y finalmente visualizar las variables en el sistema de monitorización. Como se muestra en la Figura 69.

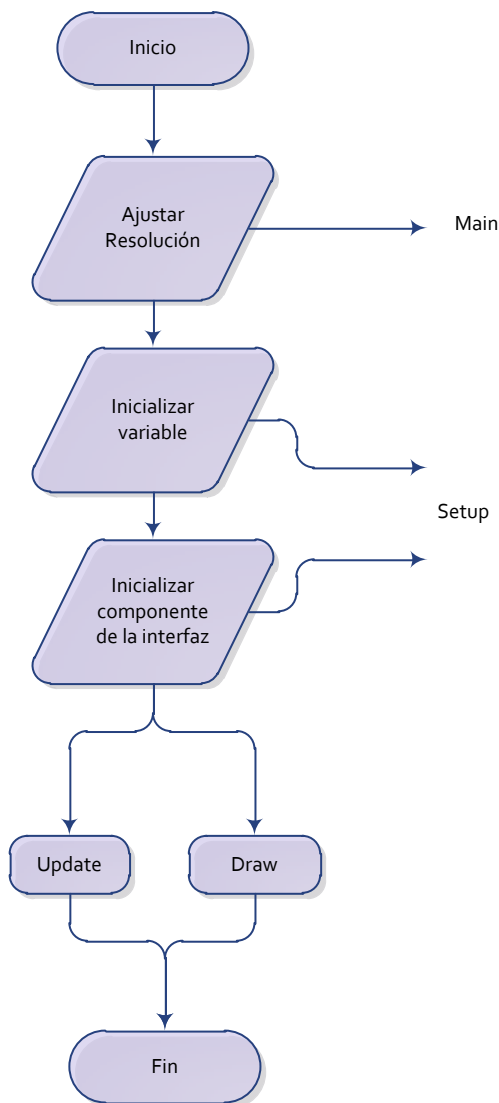


Figura 69. Diagrama de flujo general del Algoritmo lógico

Fuente: Autor

La aplicación está compuesta por dos partes el main donde se ajusta la resolución de la pantalla y el testApp en donde se ingresa el código para la programación de la interfaz y procesamiento de los datos, mediante las librerías de *Openframeworks*. El testApp se divide en dos funciones: update y draw que de forma paralela se ejecutan como se muestra en el esquema general del algoritmo.

El proceso realizado en la función update (Ver Figura 71-72), se compone por la adquisición de la dirección de cada nodo y sus respectivos valores de humedad y temperatura posteriormente se asigna a cada dirección un valor de nodo, y se convierte los datos por medio de la relación de las ecuaciones 19, 20 y 21. Se programa para que se muestren en la pantalla cuando ocurra un cambio de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y $\pm 1\%$ de Humedad Relativa. Sin embargo, cada que llegan los datos de los diferentes nodos se almacenan todos en un archivo de extensión .txt correspondientes para cada nodo. Además se crea una función de tiempoActual() la cual va a generar la fecha-hora de monitoreo y se muestra para cada dato actualizado la fecha y hora.

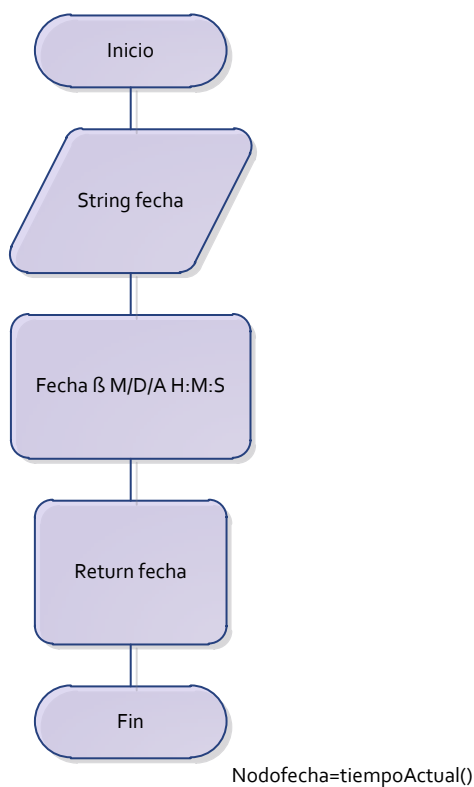


Figura 70. Diagrama de flujo función tiempoActual()

Fuente: Autor

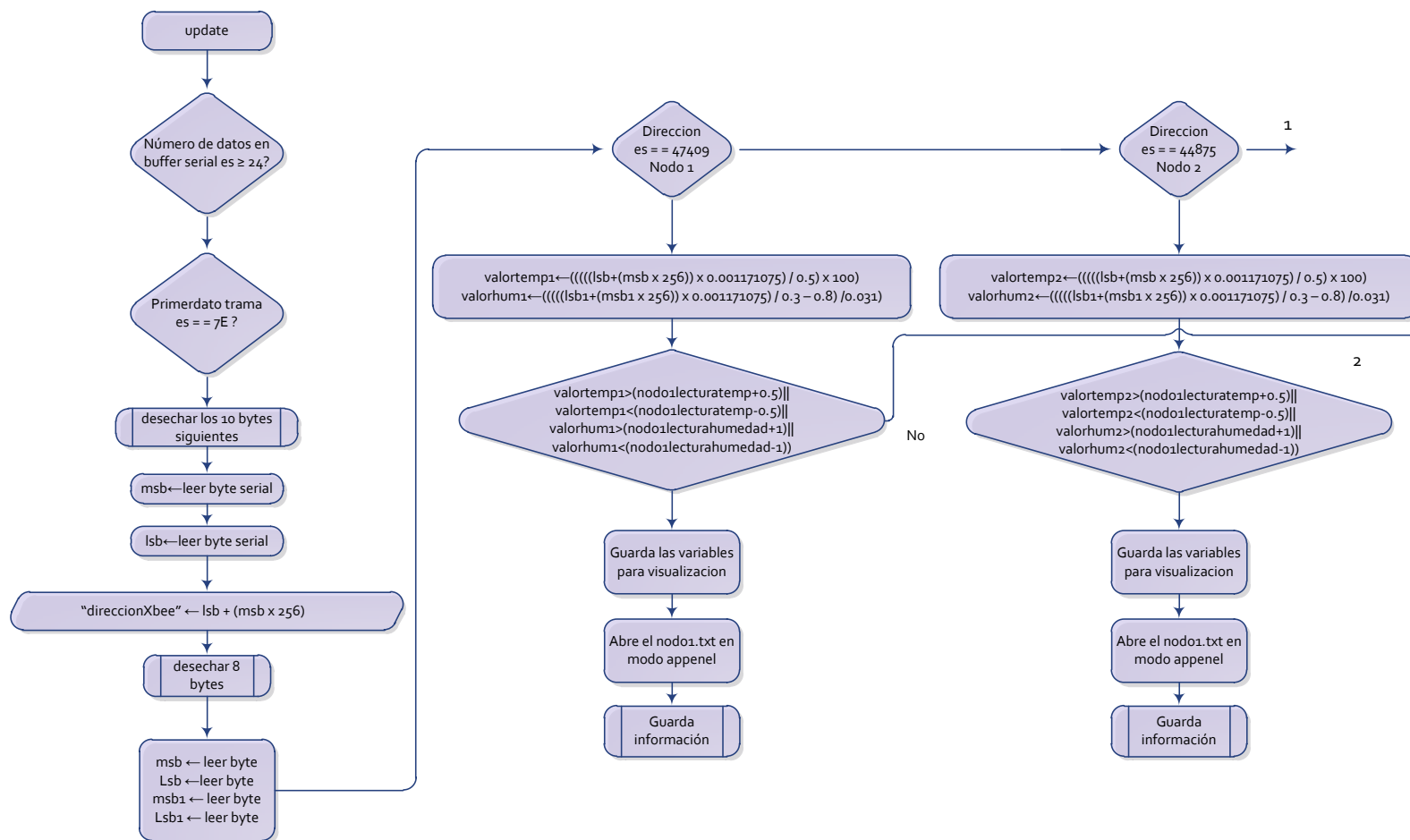


Figura 71. Diagrama de flujo función update

Fuente: Autor

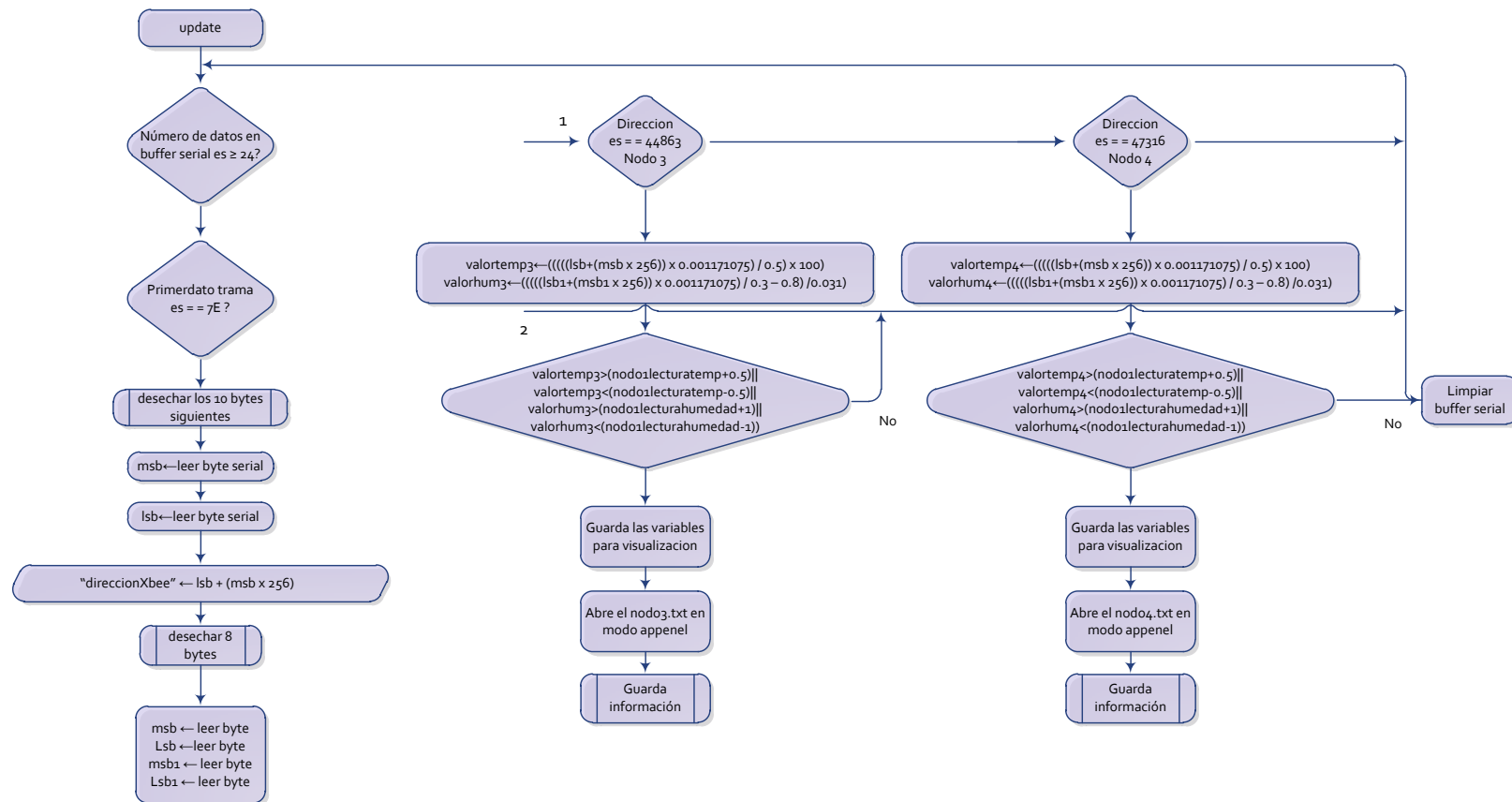


Figura 72. Continuación diagrama de flujo función update

Fuente: Autor

Y posteriormente se configura el proceso de la función Draw (Ver Figura 73) que es la parte de visualización de las variables de humedad relativa y temperatura ambiente además del tiempo y la hora que se van registrando en el momento de la toma de los datos.

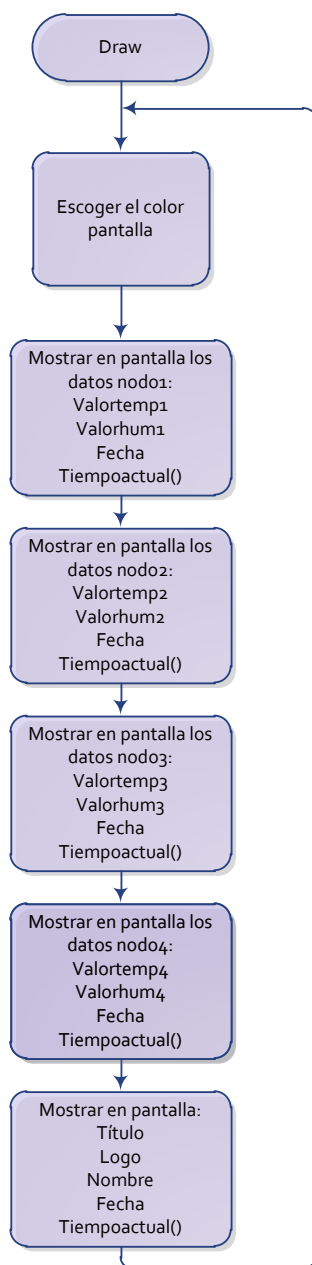


Figura 73. Diagrama de flujo función Draw

Fuente: Autor

4.8 Funcionamiento e integración del Sistema de monitorización

El funcionamiento consiste en adquirir las variables ambientales con el sistema embebido y por medio de un dispositivo ZigBee establecer la comunicación con los demás módulos RF Xbee (creándose una red PAN). El Xbee está conectado por puerto serial permitiendo realizar una comunicación al sistema embebido. El esquema del sistema de comunicaciones implementado se presenta en la Figura 74.

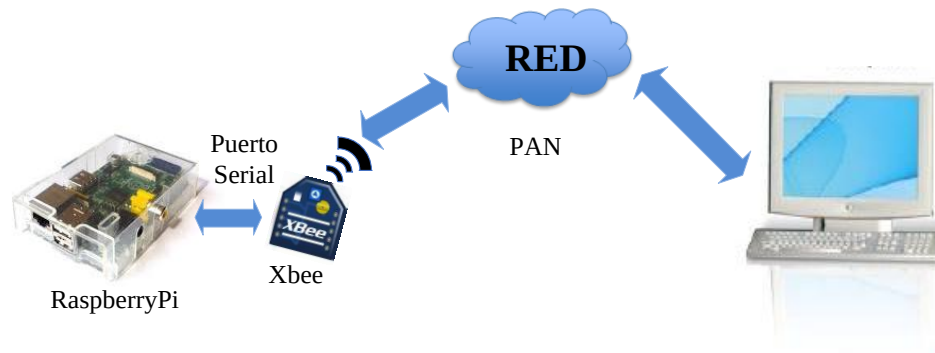


Figura 74. Esquema del sistema de monitorización para la red PAN

Fuente: Autor

En la etapa de integración del sistema embebido con *Openframeworks* se presenta en la Figura 75, la cual se divide en tres procesos principales, correspondientes a:

- **Adquisición y Transmisión de Señales:** se desarrollan módulos de adquisición de las variables mediante los módulos RF Xbee; por medio de su ADC.
- **Administración y procesamiento (implementado en Sistema embebido):** Este software controla la captura y transmisión de las variables ambientales en el sistema embebido. Para realizar estas tareas se desarrolló el algoritmo que organice la información de las tarjetas realizadas y la comunicación con Openframeworks, así como el almacenamiento de los datos. (Ver Figura 71-72)

- Visualización y monitorización (implementado en Openframeworks): este software permite la visualización de las variables. (Ver Figura 73)

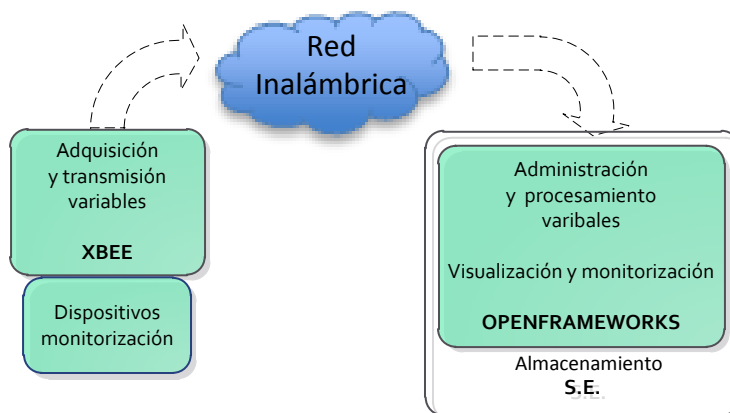


Figura 75. Diagrama de bloques de la integración del sistema RaspberryPi con Openframeworks.

Fuente: Autor

5. Implementación del sistema y Análisis de Resultados

Los resultados en el desarrollo del sistema de monitorización se evidencian en la integración final de las secciones anteriores; la cual permite visualizar las variables de humedad relativa y temperatura ambiente, como se presenta a continuación:

- **Estructura interna nodos de adquisición variables ambientales**

En la integración del sistema de adquisición de los datos se utilizó una fuente comercial variable, la cual dispone a una tensión de salida de 9V con una corriente máxima de 2A, y una caja de paso, en la cual se integran los elementos electrónicos (Ver Figura 76).

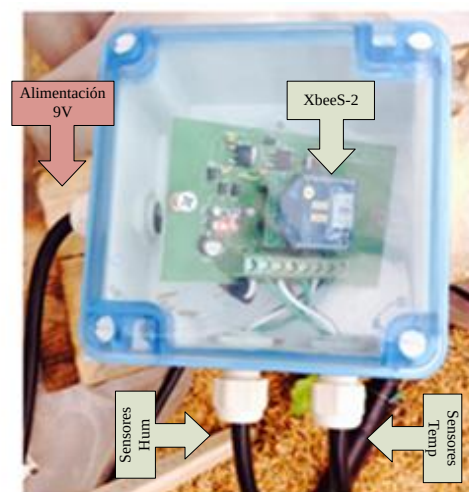
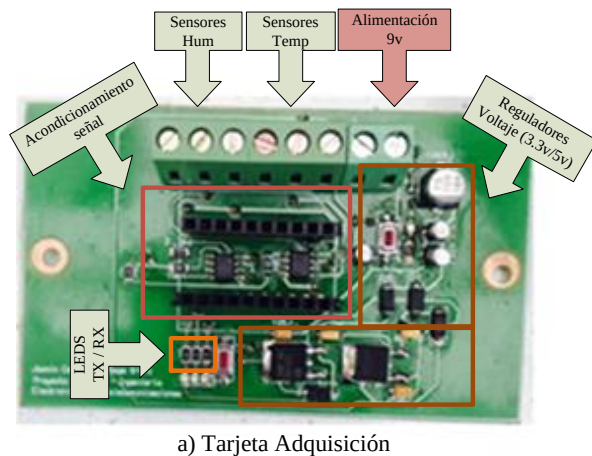


Figura 76. Estructura del dispositivo de adquisición para la monitorización

Fuente: Autor

Para los sensores se diseñaron unas tarjetas con el fin de tenerlas expuestas al entorno y poder adquirir los datos reales del cultivo, en la Figura 77 se muestra la tarjeta implementada en el invernadero:

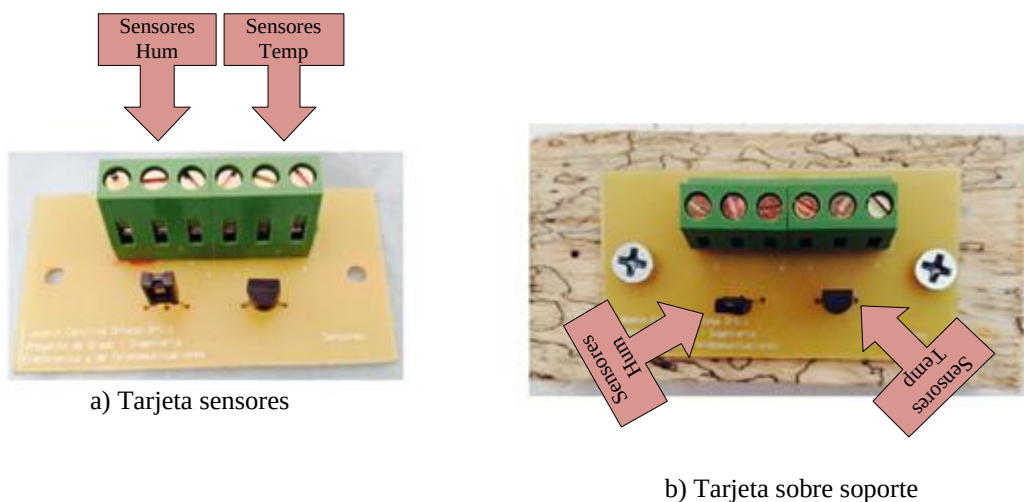


Figura 77. Tarjeta sensores
Fuente: Autor

A continuación se muestra la implementación física de un nodo con la ubicación de los sensores, para todos los casos se realizó de la misma manera:

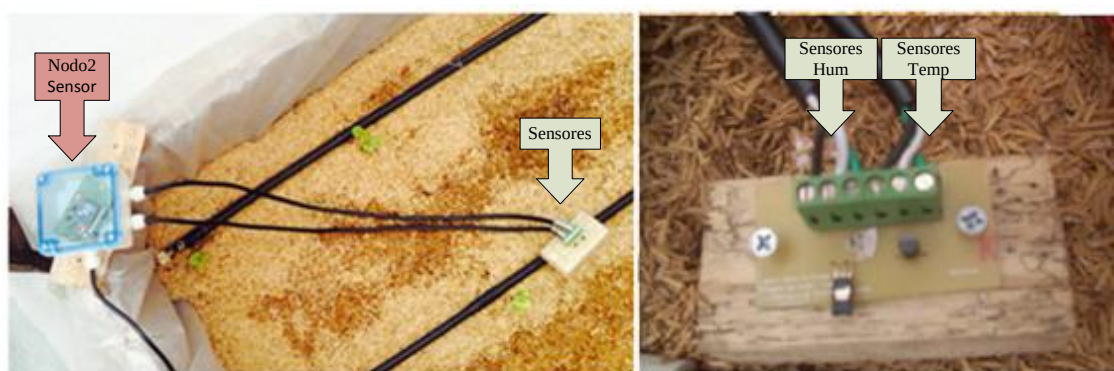


Figura 78. Ubicación sensores de medición humedad relativa y temperatura ambiente
Nota. Fuente: Autor

En la Figura 79 se identifican las conexiones en el Sistema embebido para la visualización de las variables ambientales

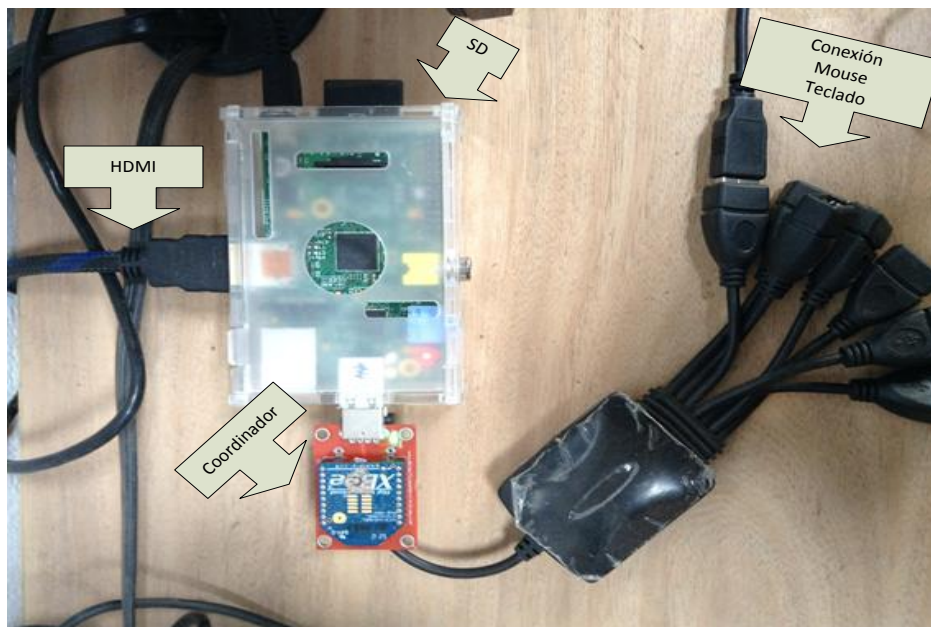


Figura 79. Módulo Coordinador conectado al RaspberryPi.

Fuente: Autor

- **Prototipo implementado**

En el sistema de monitorización se implementó en el siguiente prototipo, el cual consta de 56 plantas distribuidas, la red se colocaron 4 nodos que se encuentran dentro las cajas de paso. Como se muestra en la Figura 80.



Figura 80. Prototipo implementado con sus respectivos nodos

Fuente: Autor

En la estación de monitorización se encuentra el RaspberryPi conectado con los dispositivos necesarios para tener acceso a la visualización de la información. A su vez esta conecta el dispositivo de comunicación inalámbrico Xbee donde llegan los datos y son procesados por el software Openframeworks.



Figura 81. Estación de monitorización

Fuente: Autor

La captura realizada de los datos mostrados en la interfaz gráfica, en donde se distinguen las variables estudiadas para cada nodo con su hora y fecha actual, los cuales se refrescan en tiempo real. Toda la información se almacena en un archivo para cada nodo con la fecha y hora de los datos capturados.

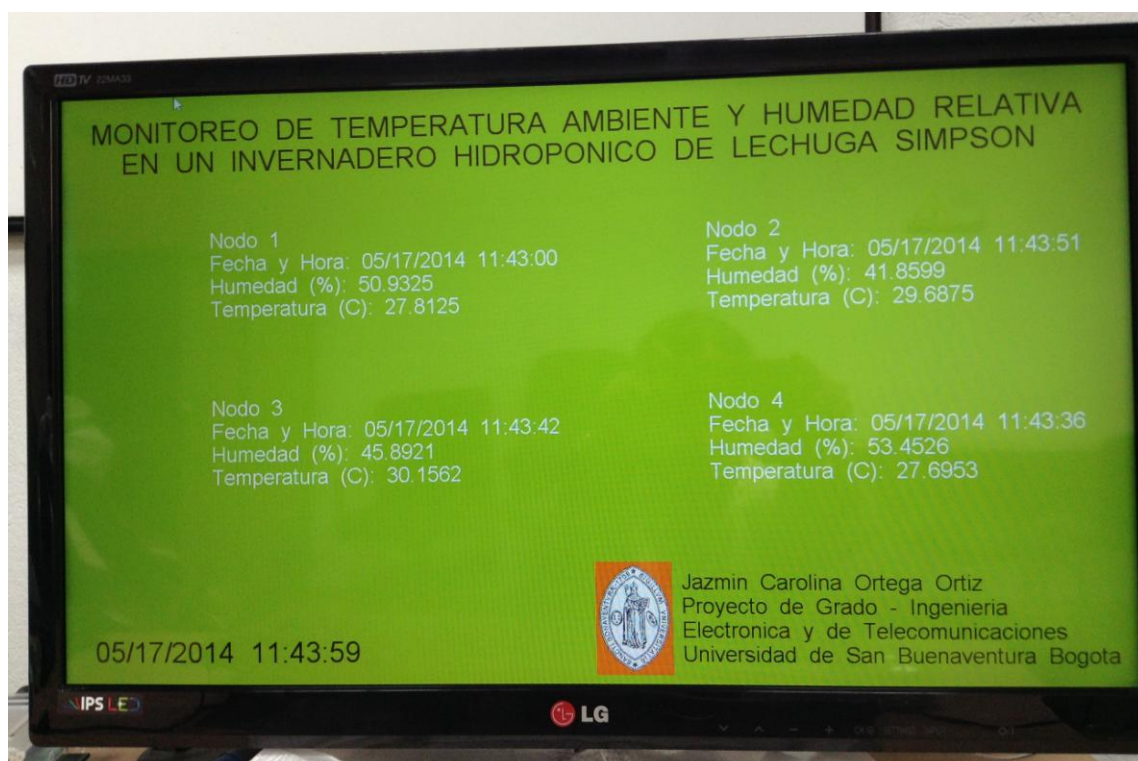


Figura 82. Interfaz de visualización de las variables ambientales

Fuente: Autor

5.1 Resultados Simulación de la WSN¹⁰

En cuanto a los resultados que se obtuvieron de la simulación se puede evidenciar en Anexo A1. Scripts 1caso.tr el resultado del comportamiento de la red, como es la muestra de los datos enviados, recibidos y en cola para ser enviados, con su respectivo tiempo.

¹⁰ Ver Anexo B: Anexos digitales

A continuación se muestra una parte del código de salida para identificar y analizar una porción de la salida de la simulación (1caso.tr); puesto que el resto se encuentra en (Anexo A1. 1caso.tr). Así mismo muestra los resultados la simulación gráfica obtenida de NS2 mediante el programa nam (Ver Anexo A2. Video Simulación Gráfica 1caso.nam).

Se obtiene lo siguiente el establecimiento de la red PAN como se muestra en el script:

```
num_nodes is set 5
INITIALIZE THE LIST xListHead

Traffic: ftp
Acknowledgement for data: on

Starting Simulation...
--- startPANCoord [0] ---
[0.000000](node 0) performing active channel scan
[0.000000](node 0) scanning channel 11
channel.cc:sendUp - Calc highestAntennaZ_ and distCST_
highestAntennaZ_ = 1.5, distCST_ = 35.9
SORTING LISTS ...DONE!
[0.141440](node 0) scanning channel 12
[0.280640](node 0) scanning channel 13
[0.420800](node 0) begin to transmit beacons
[0.421568](node 0) successfully started a new PAN (beacon enabled)
[channel:11] [PAN_ID:0]
...
```

En donde se observa que con los parámetros definidos, en la radio-propagación la distancia alcanzable es de 35.9m para el caso. Además de esto se analizó los resultados obtenidos mediante el software NS-2 Wireless Trace Analyser (Ver Anexo A3. Video Simulación en programa NS-2 Wireless Trace Analyser).

Sin embargo, se muestran los resultados de los paquetes generados perdidos y transferidos mediante el software NS-2 Wireless Trace Analyser. (Ver Figuras 84-85).

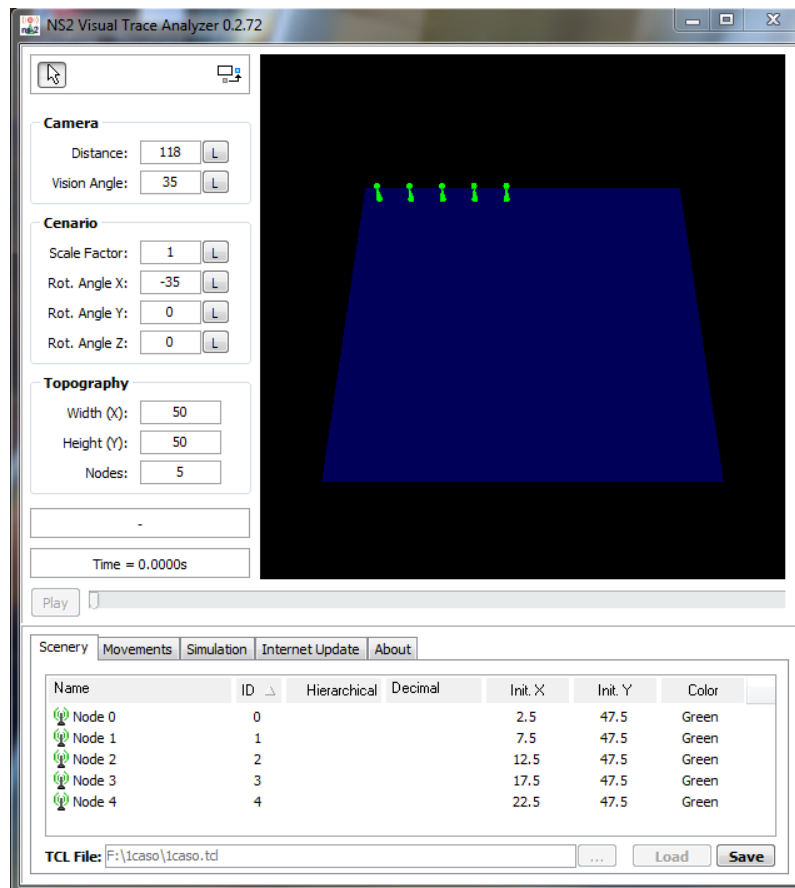
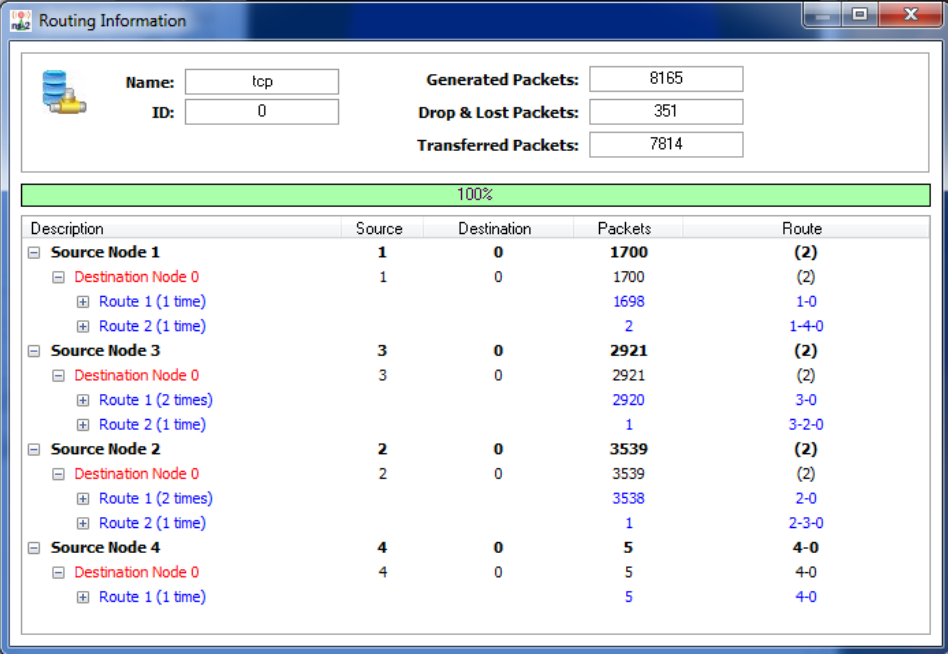


Figura 83. Visualización de la simulación 1caso.tcl en NS2 Visual Analyzer
Fuente: Autor



Routing Information

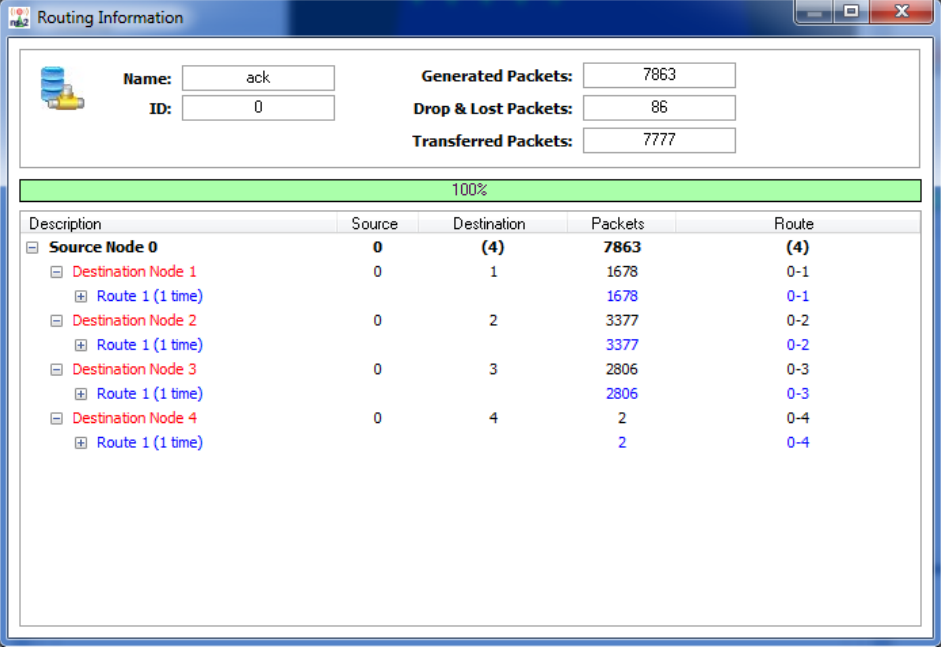
Name: tcp ID: 0

Generated Packets: 8165
Drop & Lost Packets: 351
Transferred Packets: 7814

100%

Description	Source	Destination	Packets	Route
Source Node 1	1	0	1700	(2)
Destination Node 0	1	0	1700	(2)
Route 1 (1 time)			1698	1-0
Route 2 (1 time)			2	1-4-0
Source Node 3	3	0	2921	(2)
Destination Node 0	3	0	2921	(2)
Route 1 (2 times)			2920	3-0
Route 2 (1 time)			1	3-2-0
Source Node 2	2	0	3539	(2)
Destination Node 0	2	0	3539	(2)
Route 1 (2 times)			3538	2-0
Route 2 (1 time)			1	2-3-0
Source Node 4	4	0	5	4-0
Destination Node 0	4	0	5	4-0
Route 1 (1 time)			5	4-0

Figura 84. Paquetes enviados del Nodo1, 2, 3, 4 al nodo destino Nodo0



Routing Information

Name: ack ID: 0

Generated Packets: 7863
Drop & Lost Packets: 86
Transferred Packets: 7777

100%

Description	Source	Destination	Packets	Route
Source Node 0	0	(4)	7863	(4)
Destination Node 1	0	1	1678	0-1
Route 1 (1 time)			1678	0-1
Destination Node 2	0	2	3377	0-2
Route 1 (1 time)			3377	0-2
Destination Node 3	0	3	2806	0-3
Route 1 (1 time)			2806	0-3
Destination Node 4	0	4	2	0-4
Route 1 (1 time)			2	0-4

Figura 85. Paquetes recibidos de los Nodos 1, 2, 3,4 al nodo destino Nodo0

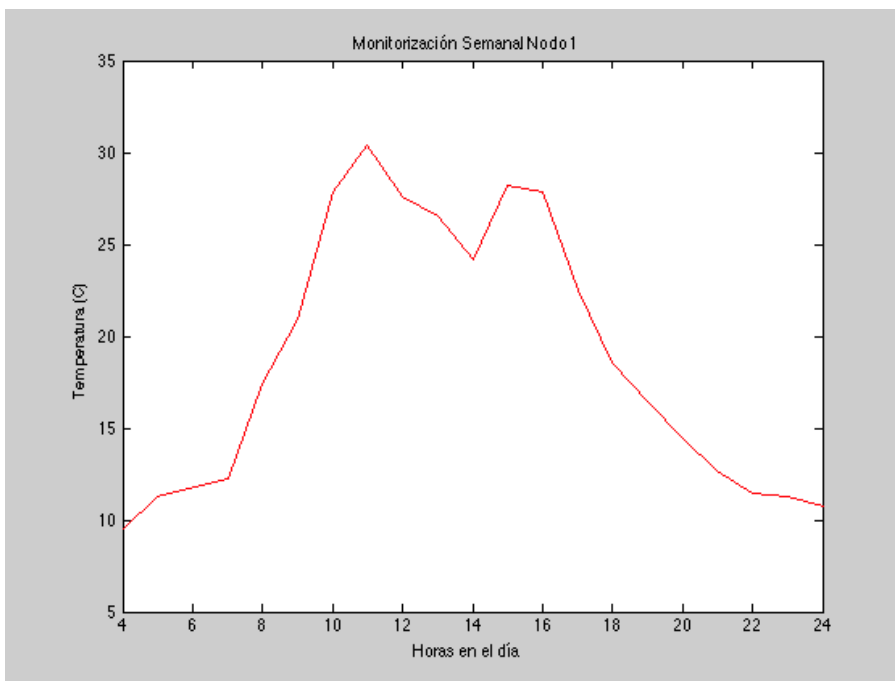
Fuente: Autor

5.2 Resultados monitorización de las variables ambientales

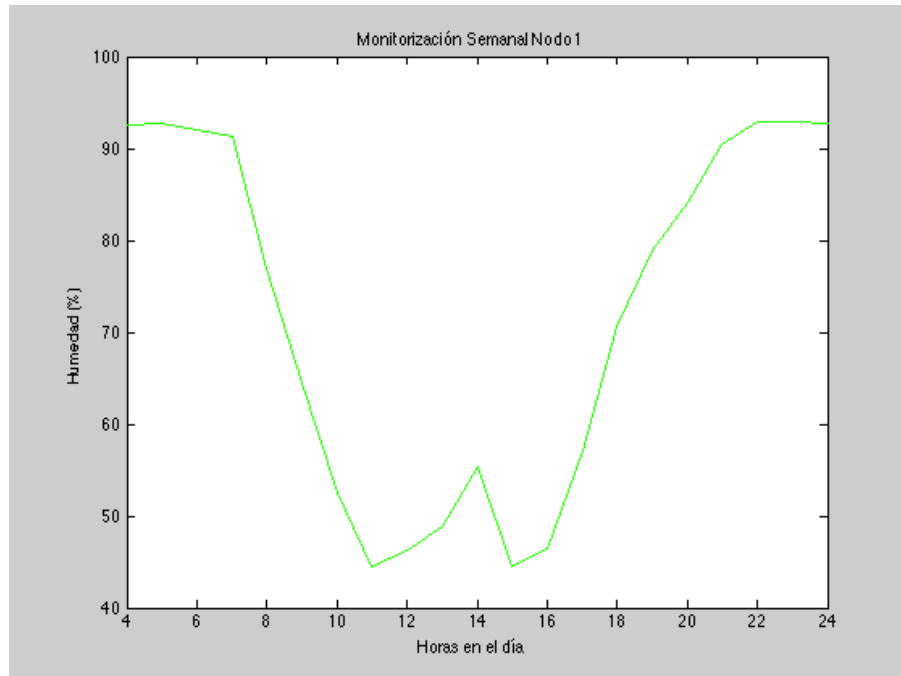
Como resultados de la simulación se presentan los datos almacenados de todo el ciclo vegetal de las lechugas crespas. (Ver Anexo A4. Datos almacenados del proceso de crecimiento de las lechugas).

Las mediciones de la humedad y temperatura se realizaron en todo el día y se tuvieron en cuenta el promedio por semanas de la humedad y temperatura durante el día. Para analizar el proceso de monitorización se graficó por semanas para observar el comportamiento de la humedad y temperatura durante el proceso de crecimiento se tomó una la semana de 2 al 9 mayo. Los resultados se evidencian a continuación:

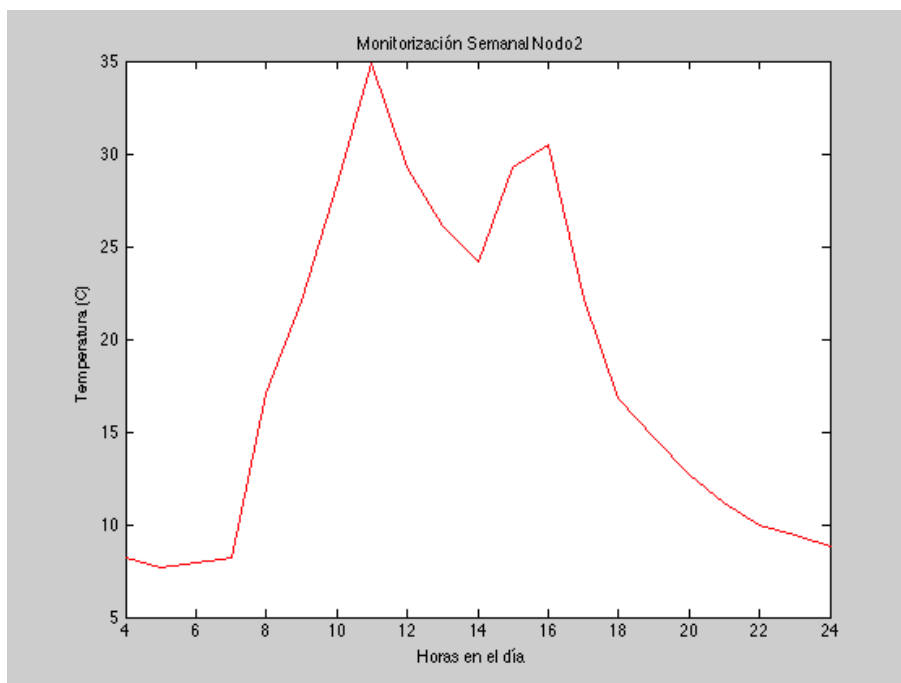
Figura 86. Resultados de los datos del sensor de temperatura nodo 1



Fuente: Autor

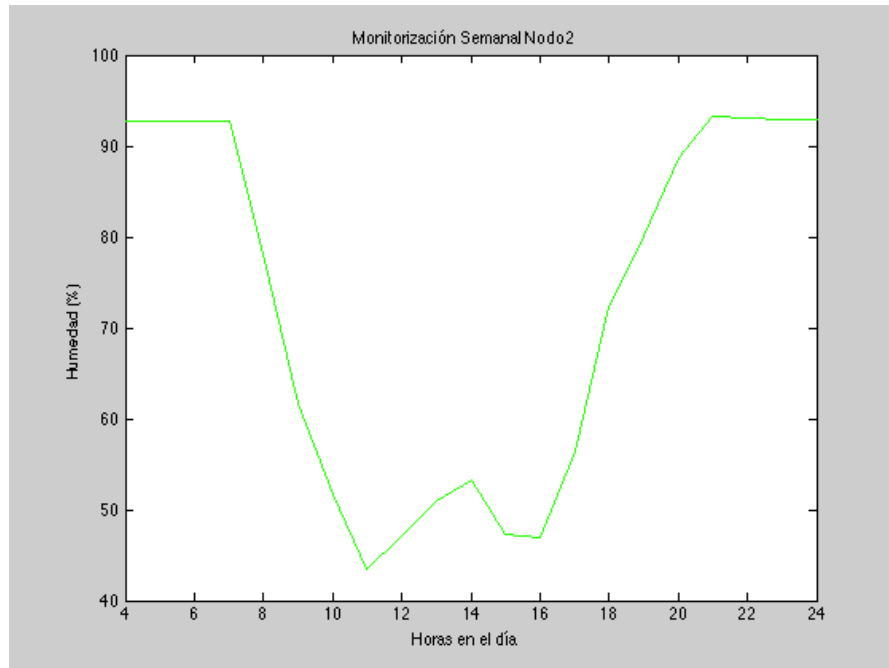
Figura 87. Resultados de los datos del sensor de Humedad relativa nodo 1

Fuente: Autor

Figura 88. Resultados de los datos del sensor de temperatura nodo 2

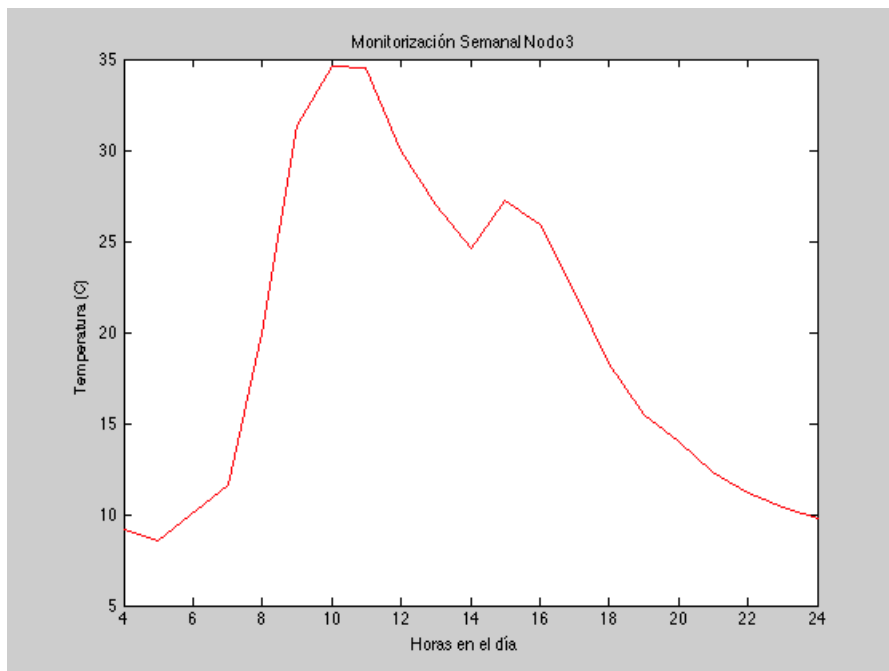
Fuente: Autor

Figura 89. Resultados de los datos del sensor de Humedad relativa nodo 2



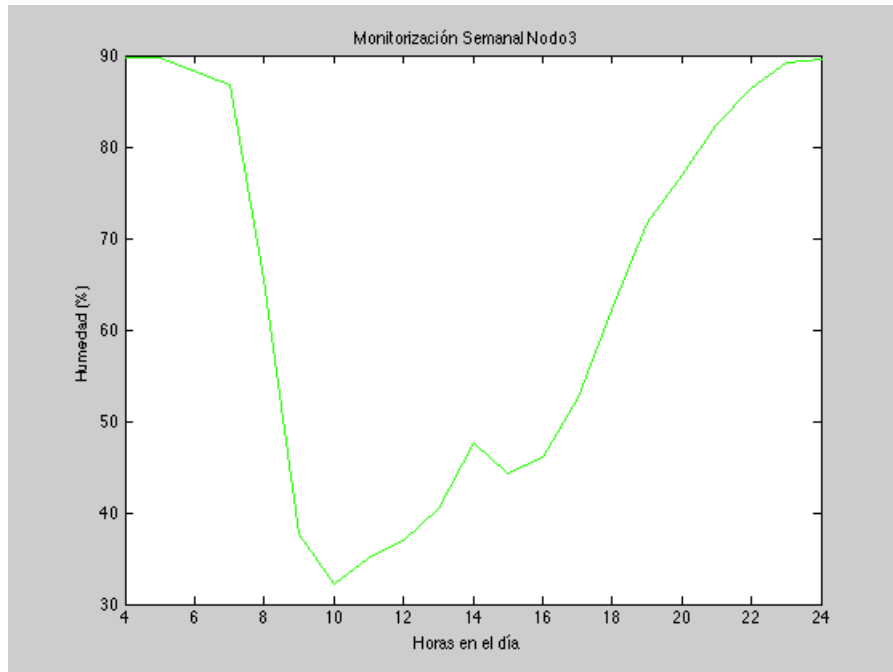
Fuente: Autor

Figura 90. Resultados de los datos del sensor de temperatura nodo 3



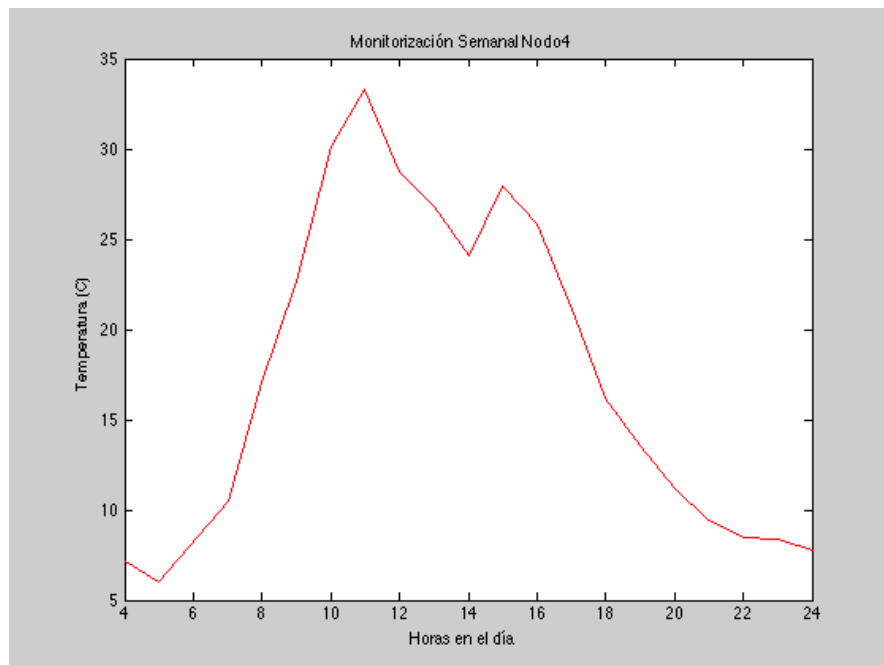
Fuente: Autor

Figura 91. Resultados de los datos del sensor de humedad relativa nodo3



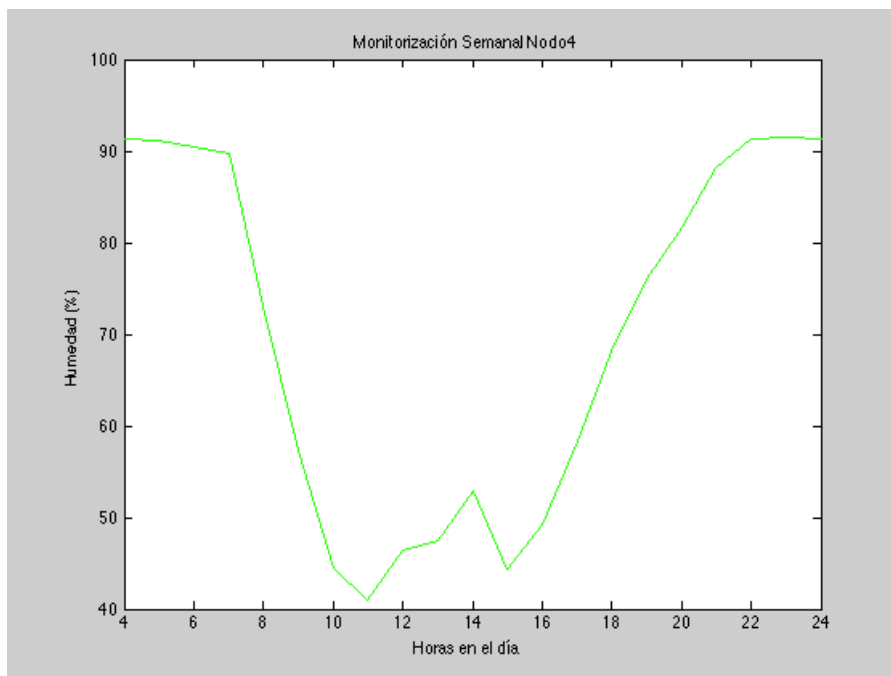
Fuente: Autor

Figura 92. Resultados de los datos del sensor de temperatura nodo 4



Fuente: Autor

Figura 93. Resultados de los datos del sensor de humedad relativa nodo 4



Fuente: Autor

Como se observan en las gráficas anteriores la temperatura aumenta entre las horas de las 10:00 a 17:00 hora, aparte la humedad relativa en esos momentos no es la más óptima puesto que los valores son por debajo de 60%. Es necesario mantener el cultivo de lechugas por debajo de los 20°C, que es la temperatura en la cual sugieren para tener unas condiciones adecuadas. Por tal motivo se procedió a colocarle sombra al invernadero para evitar que se concentre mayor calor por la luminancia que entraba impactando las lechugas crespas.

Las variable de humedad relativa y temperatura ambiental se pudo comprobar que son directamente proporcionales si hay mayor calor es necesario tener un mayor riego y evitar que la luz solar entre de frente, para evitar que se lleguen a quemar las hojas.

En las horas de la noche y mañana (antes de las 8am) se está cumpliendo los requerimientos están por debajo de 10°C lo cual se tendría que controlar en las horas antes descritas 10:00 a 17:00pm que es cuando aún se encuentra el sol radiando.

Es conveniente resaltar que se hizo efectivo el sistema de monitorización para las 5 semanas, que duro el ciclo del cultivo de lechugas crespas. Y como resultado final del proceso de monitorización de las variables se ve reflejado en la Figura 95. Pero antes de eso se muestra el proceso de crecimiento (Ver figura 94).



Figura 94. Proceso de crecimiento de la lechuga

Fuente: Autor



Figura 95. Resultado lechugas (7 junio 2014) Finalización proceso crecimiento

Fuente: Autor

De acuerdo a los datos recolectados se realiza un promedio para cada nodo de la humedad relativa y temperatura para saber cual está siendo el comportamiento regular y se obtiene lo siguiente:

Tabla 21. Promedio de humedad relativa y temperatura ambiente para los nodos

Nodo1		Nodo2		Nodo3		Nodo4	
H	T	H	T	H	T	H	T
66.41	14.7	69.44	12.64	66.41	18.13	64.29	17.4

Fuente: Autor

Así mismo con los resultados anteriores se puede observar que la temperatura y humedad relativa es para los casos entre los rangos específicos para la lechuga, sin embargo es claro como se observa en las gráficas existen unos picos en ciertas horas que no son adecuadas para la lechuga fresca. Como se mencionó anteriormente.

Donde el promedio general para el invernadero y comparando con las condiciones ideales se tiene que:

Tabla 22. Condiciones en el invernadero comparadas con las condiciones ideales

Promedio en los 4Nodos		Condiciones Lechuga	
H	T	H	T
66.64	15.72	60 - 80 %	6 - 19 °C

Fuente: Autor

Se puede observar que a pesar de los cambios de temperatura y humedad que aparecieron en ciertas horas del día se observa como las condiciones generales se encuentran en el rango que son para el cultivo de lechuga. Pero es claro que se debe tener un mayor control de temperatura para esos picos que registran durante horas de medio día por ello como solución se colocó una sombra que sirviera para que la radiación solar entrara con mayor intensidad y esto hiciera que no se concentrara tanto el calor dentro del invernadero.

6. Conclusiones

Este trabajo presenta un sistema de monitorización para cultivos hidropónico de lechugas, utilizando la técnica de sustrato mediante una red inalámbrica de sensores que permite la adquisición y transmisión de variables ambientales tales como humedad relativa y temperatura ambiente a través del protocolo IEEE 802.15.4, así mismo el sistema embebido captura, procesa y permite visualizar las señales ambientales. El sistema RaspberryPi permite el almacenamiento, adaptación y visualización, por medio de una red PAN. Esta información es procesada sobre las librerías de Openframeworks, las cuales son ejecutadas por el software Code Blocks en donde se desarrolla el algoritmo de visualización.

El sistema de monitorización demostró ser una herramienta útil en el campo de la agricultura, específicamente en el seguimiento del cultivo hidropónico de lechugas. En donde la red de sensores para el día 25 junio de 2014, permitió identificar un aumento de temperatura por encima de las condiciones adecuadas de la lechuga. Por tal motivo se comprobó que la temperatura es un factor crítico; puesto que se llegó a quemar algunas hojas en unas lechugas por la gran cantidad de luz solar que recibió esa tarde. Lo cual género que se deshidrataran y se bajara el rendimiento. Sin embargo, se corrigió mediante una sombra para evitar la intensidad luminosa y agregando mayor cantidad de agua para generar mayores condiciones de humedad para esos días de intenso calor. El hecho en particular permite no solo observar la oportuna intervención que se requiere sino también el soporte importante de los sistemas de información durante el proceso de crecimiento.

Así mismo, se comprobó que la incorporación de los sistemas embebidos permite minimizar los costos y maximizar la versatilidad en el manejo de la información. Su portabilidad debido a su reducido tamaño permite un desempeño mejor y efectivo para el

desarrollo de aplicaciones específicas mediante las diferentes características y periféricos que pueden ser adoptados por varios protocolos de comunicación.

Para los módulos inalámbricos Xbee-S2 se comprobó que la transmisión se realiza sin ningún problema hasta una distancia de 35.9m con la presencia de obstáculos como paredes y plástico; de acuerdo a lo que mostró la simulación y distancia que había entre los terminales y el coordinador. El estándar ZigBee ofrece una solución más económica y eficiente a nivel de energía eliminando la necesidad de cambiar baterías con frecuencia, además se comprueba que dicho estándar se puede usar en aplicaciones comerciales, que para el caso se midió la temperatura ambiental y la humedad relativa de los sensores óptimos seleccionados.

En la aplicación de redes inalámbricas de sensores en estos cultivos resultan ser una solución efectiva para: 1. recolección de los datos y creación del sistema de monitorización, y 2. Tal como se menciona en el protocolo IEEE 802.15.4 en dicha aplicación se hace efectivo un consumo bajo de energía y mayor alcance en términos de distancia para la comunicación y uso adecuado de redes PAN. En síntesis el área que cubrió los nodos, los cuales se organizaron por cuatro celdas para la simulación del área de $25m^2$ fue efectiva porque se logró abarcar el entorno descrito y se analizó que la mayoría de paquetes fueron procesados comprobándose que la implementación real ($5m^2$) permitió analizar de la cuarta para la cuarta parte de 0,01 hectáreas.

7. Recomendaciones

Es necesario tener una supervisión diaria del cultivo para evitar que se lleguen a presentar inconvenientes en la quema o deshidratación por la gran intensidad luminosa que se puedan presentar en épocas de verano, debido a que este tipo de cultivos son para clima templado.

Cabe mencionar que para el sistema de monitorización implementado en el cultivo hidropónico fue la técnica de sustrato, donde se estudió los posibles sensores adecuados para las condiciones donde se iban a ubicar si se llegase a implementar otro tipo de técnica por ejemplo la de raíz flotante es necesario ver qué condiciones deben cumplir los sensores de humedad y temperatura para donde van a hacer instalados.

Para los sensores es conveniente utilizar unos de salidas análogas donde queda más sencillo implementar el ADC del dispositivo Xbee-S2, sin llegar a usar un microcontrolador u otros dispositivos en el cual se procesen los datos.

Se recomienda seguir investigando sobre el estándar ZigBee de tal manera que se puedan controlar otras variables como medición de pH y CO₂, variables indispensables en un invernadero, además expandir la red aplicando algún tipo de topología con las variables monitorizadas en este proyecto es decir la temperatura ambiental y humedad relativa.

Trabajos Futuros

Como trabajos futuros se puede implementar un sistema de retroalimentación para alimentar todo el sistema monitorización por medio de energía sostenible aprovechando la variable de radiación solar y teniendo en cuenta la potencia de consumo en el invernadero se podría realizar por ejemplo paneles solares que permitan energizar todos los componentes electrónicos.

Así mismo para evitar el continuo supervisión se puede llegar a generar todo un sistema de automatización que de acuerdo a la información de monitorización realice el control automatizado de las condiciones climáticas adecuadas para el cultivo de lechuga, así mismo el control de riego y nutrientes requeridos.

Para facilidad en el análisis de la información se puede llegar a generar gráficas de los diferentes nodos o de acuerdo a lo que el usuario necesite para el proceso de crecimiento vegetal de cualquier tipo de cultivo. Al igual se puede incorporar un servidor web que permita visualizar la monitorización en internet de acuerdo al estudio de viabilidad de tecnología idóneo en la red inalámbrica que se cuente en campo.

Bibliografía

- ADDIS NETWORK S.L*, “*A FONDO: ZIGBEE – Todo en domótica de fácil instalación*”, *DOMODESK todo en domótica*. (s.f.). Recuperado el 14 de Febrero de 2014, de <http://www.domodesk.com/a-fondo-zigbee>
- Agudelo, S. (s.f.). *Redes de sensores inalámbricos utilizando Zigbee/802.15.4*. Estudiante Especialización Telecomunicaciones - UPB.
- Alvarado, D., Chavez, F., & Wilhelmina, K. (2001). Seminario de Agro Negocios. En *Lechugas Hidropónicas* (pág. 8).
- AMERICA, I. L. (2011). Bluetooth Embedded System for Room-Safe Temperature Monitoring. 4.
- Aransay, A. (2009). *Aplicación de las redes de sensores en el entorno vehicular*. Recuperado el 12 de Agosto de 2013, de <http://www.albertolsa.com/wp-content/uploads/2010/04/rsi-aplicacion-de-las-redes-de-sensores-en-el-entorno-vehicular-alberto-los-santos.pdf>
- Art-interactivo*. (s.f.). Recuperado el 2014 de febrero de 2014, de <http://www.artinteractivo.com/xbee-y-arduino>
- Baruah, S. (2010). Tradeoffs in Implementing an Embedded System Designed for Monitoring and Controlling Temperature and Humidity Using Real Time Linux. *Computer Technology and Development (ICCTD), 2010 2nd International Conference on*.
- Basto, D. L., & Vanegas, C. A. (2011). *Sistema de monitoreo inalámbrico desde una estación remota para el control de la humedad relativa del suelo en una plantación de ají*. Bucaramanga: Universidad Santo Tomas de Aquino.
- Camargo, C. (2011). *Transferencia tecnológica y de conocimientos en el diseño de sistemas embebidos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Características XBee serie2*. (s.f.). Recuperado el 13 de Febrero de 2013, de <http://www.xbee.cl/caracteristicas.html>

- Castillo, C. (2007). *Implementación de un prototipo de red de sensores inalámbricos para invernaderos*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- CosechandoNatural. (s.f.). *Guía para cultivos hidropónicos*. Recuperado el 15 de febrero de 2014, de http://www.cosechandonatural.com.mx/guia_gratuita_cultivo_hidroponico_de_lechuga_guia28.html
- Datasheet HIH 4000-02. (s.f.). Recuperado el 25 de Febrero de 2014, de <http://datasheet.octopart.com/HIH-4000-004-Honeywell-datasheet-13690304.pdf>
- Datasheet LM358. (s.f.). Recuperado el 26 de Febrero de 2014, de <http://pdf.datasheetcatalog.net/datasheet2/d/0krxqjyrr14uhy7yk1if661zzqwy.pdf>
- Datasheet TMP36. (s.f.). Recuperado el 24 de Febrero de 2014, de http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/TMP35_36_37.pdf
- Dignani, J. (2011). *Análisis del protocolo ZigBee (Trabajo final de especialización en Redes y Seguridad)*. Universidad Nacional de la Plata.
- EDMANS, I. d. (2009). *Redes inalámbricas de sensores: Teoría y aplicación práctica*. Obtenido de Universidad de la Rioja : dialnet.unirioja.es/descarga/libro/377564.pdf
- Fortuño, A. (Mayo de 2012). *Desarrollo e implementación de una red de sensores Zigbee mediante el dispositivo XBee de Digi*. Obtenido de <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1957pub.pdf>
- Fundación UNAM. (6 de Mayo de 2013). Recuperado el 12 de Febrero de 2014, de <http://www.fundacionunam.org.mx/blog/ecologia/cultivos-hidroponicos.html>.
- FundaciónUNAM. (2014). *Hidroponia, una sencilla técnica para cultivar plantas*. Obtenido de <http://www.fundacionunam.org.mx/gibex/blog/hidroponia-una-sencilla-tecnica-para-cultivar-plantas/>
- González, J., Patarroyo, A., & Monroy, J. (2011). *Monitoreo de variables ambientales influyentes en la crianza de pollos de engorde utilizando redes de sensores inalámbricos*. Bogotá: Univerisdad de San Buenaventura.
- Guía para el Cultivo de la Lechuga Hidropónica. (s.f.). Obtenido de http://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=52
- Hydro environment. (s.f.). Obtenido de Qué es la solución nutritiva: http://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=33

- Loup, T. M. (2011). Bluetooth Embedded System for Room-Safe Temperature Monitoring. *IEEE (Revista IEEE America Latina)* .
- Medina, J. I. (2011). *Prototipo funcional de un electrocardiógrafo implementado por medio de redes de sensores inalámbricas (WSN)*. Bogotá: Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá.
- Mendez, D. (2007). *Desarrollo de una plataforma para prototipaje flexible de aplicaciones wsn*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Méndez, T., & Vera, W. E. (2007). *Producción de lechuga hidropónica para la exportación al mercado alemán*. Guayaquil-Ecuador.
- Oyarce, A. (Julio de 2010). Recuperado el 15 de febrero de 2014, de www.olimex.cl/pdf/Wireless/ZigBee/XBee-Guia_Usuario.pdf
- Parades, F. A. (2008). *Este tipo de redes se implementan para interconectar dispositivos como agendas digitales, celulares, computadores, entre otros. Sus tasas de transmisión se encuentran entre los 10 bps hasta los 10Mbps.* . Quito.
- Quiroz. (s.f). Recuperado el 12 de Agosto de 2013, de [http://kosmos.upb.edu.co/web/uploads/articulos/\(A\)_Redes_de_Sensores_Inalambricos_Utilizando_ZIGBEE802154_a05yzX_.pdf](http://kosmos.upb.edu.co/web/uploads/articulos/(A)_Redes_de_Sensores_Inalambricos_Utilizando_ZIGBEE802154_a05yzX_.pdf)
- Rosas, N. F. (2011). *Diseño e implementación de un sistema embebido para la adquisición y transmisión de señales biomédicas a través de la red celular*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. .
- Agroinformación. (s.f). Recuperado el 12 de Febrero de 2014, de Control climático en invernaderos.
- Valverde, J. C. (2007). *El estándar Inalámbrico ZigBee*. Perú: Universidad Nacional de Trujillo.
- Xiaohui, & Fanfan. (2011). Design of the Wireless Sensor Network Communication Terminal Based on Embedded Linux. *2011 IEEE 2nd International Conference on*.
- Zennaro, M. (2010). *Introducción a las Redes de Sensores Inalámbricos*.
- Zepeda. (2012). *Efecto de la solución nutritiva en el rendimiento de lechuga(LatucasativaL.) en dos sistemas hidropónicos: camas flotantes y aeroponía*. México.

Zhonbao, C. J. (2011). Design of Embedded Remote Monitoring Terminal Based on 3G Network. *2011 IEEE/ICME International Conference on*.

Anexo A: Script 1caso.tcl

```
#####
#           Script 1caso.tcl           #
#           Adaptado por Jazmin Ortega #
#           Basado en el ejemplo wpan_demo2.tcl #
#           - - - - - #
#           preparado por Jianliang Zheng #
#           (zheng@ee.ccny.cuny.edu)      #
#####

#=====
# Definicion de opciones
#=====
set val(chan) Channel/WirelessChannel ;# Channel Type
set val(prop) Propagation/TwoRayGround ;# radio-
propagation model
set val(netif) Phy/WirelessPhy/802_15_4
set val(mac) Mac/802_15_4
set val(ifq) Queue/DropTail/PriQueue ;# interface
queue type
set val(ll) LL ;# link layer
type
set val(ant) Antenna/OmniAntenna ;# antenna
model
set val(ifqlen) 150 ;# max packet
in ifq
set val(nn) 5 ;# number of
mobilenodes
set val(rp) AODV ;# routing
protocol
set val(x) 50
set val(y) 50

set val(nam) 1caso.nam
set val(traffic) ftp ;# cbr/poisson/
ftp

#read command line arguments
proc getCmdArgv {argc argv} {
    global val
    for {set i 0} {$i < $argc} {incr i} {
        set arg [lindex $argv $i]
        if {[string range $arg 0 0] != "-"} continue
        set name [string range $arg 1 end]
        set val($name) [lindex $argv [expr $i+1]]
    }
}

getCmdArgv $argc $argv

set appTime1 7.0 ;# in seconds
set appTime2 7.1 ;# in seconds
set appTime3 7.2 ;# in seconds
set appTime4 7.3 ;# in seconds
set stopTime 100 ;# in seconds
```

```

=====
# Programa principal
=====

# Initialize Global Variables
set ns_ [new Simulator]
$ns_ use-newtrace
set tracefd [open ./1caso.tr w]
$ns_ trace-all $tracefd
if {"$val(nam)" == "1caso.nam"}{
    set namtrace [open ./$val(nam) w]
    $ns_ namtrace-all-wireless $namtrace $val(x) $val(y)
}
$ns_ puts-nam-traceall {# nam4wpan #} ;# inform nam that
this is a trace file for wpan (special handling needed)

Mac/802_15_4 wpanCmd verbose on
Mac/802_15_4 wpanNam namStatus on ;# default =
off (should be turned on before other 'wpanNam' commands can work)
#Mac/802_15_4 wpanNam ColFlashClr gold ;# default =
gold

# For model 'TwoRayGround'
set dist(5m) 7.69113e-06
set dist(9m) 2.37381e-06
set dist(10m) 1.92278e-06
set dist(11m) 1.58908e-06
set dist(12m) 1.33527e-06
set dist(13m) 1.13774e-06
set dist(14m) 9.81011e-07
set dist(15m) 8.54570e-07
set dist(16m) 7.51087e-07
set dist(20m) 4.80696e-07
set dist(25m) 3.07645e-07
set dist(30m) 2.13643e-07
set dist(35m) 1.56962e-07
set dist(40m) 1.20174e-07
Phy/WirelessPhy set CStresh_ $dist(15m)
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ $dist(15m)

# set up topography object
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)

# Create God
set god_ [create-god $val(nn)]

set chan_1_ [new $val(chan)]

```



```

# configure node

$ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \
                 -llType $val(ll) \
                 -macType $val(mac) \
                 -ifqType $val(ifq) \
                 -ifqLen $val(ifqlen) \
                 -antType $val(ant) \
                 -propType $val(prop) \
                 -phyType $val(netif) \
                 -topoInstance $topo \
                 -agentTrace OFF \
                 -routerTrace OFF \
                 -macTrace ON \
                 -movementTrace OFF \
                 #-energyModel "EnergyModel" \
                 #-initialEnergy 1 \
                 #-rxPower 0.3 \
                 #-txPower 0.3 \
                 -channel $chan_1_

for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
  set node_($i) [$ns_ node]
  $node_($i) random-motion 0           ;# disable random motion
}

source ./caso1.scn

$ns_ at 0.0      "$node_(0) NodeLabel PAN Coord"
$ns_ at 0.0      "$node_(0) sscs startPANCoord"           ;#
startPANCoord <txBeacon=1> <BO=3> <SO=3>
$ns_ at 0.5      "$node_(1) sscs startDevice 1 0"         ;#
startDevice <isFFD=1> <assoPermit=1> <txBeacon=0> <BO=3> <SO=3>
$ns_ at 1.5      "$node_(2) sscs startDevice 1 0"
$ns_ at 2.5      "$node_(3) sscs startDevice 1 0"
$ns_ at 3.5      "$node_(4) sscs startDevice 1 0"

Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 3ms

$ns_ at $appTime1 "puts \"\\nTransmitting data ...\\n\""

```

```

# Setup traffic flow between nodes

proc cbrtraffic { src dst interval starttime } {
    global ns_ node_
    set udp($src) [new Agent/UDP]
    eval $ns_ attach-agent $node_($src) \udp($src)
    set null($dst) [new Agent/Null]
    eval $ns_ attach-agent $node_($dst) \null($dst)
    set cbr($src) [new Application/Traffic/CBR]
    eval \cbr($src) set packetSize_ 70
    eval \cbr($src) set interval_ $interval
    eval \cbr($src) set random_ 0
    #eval \cbr($src) set maxpkts_ 10000
    eval \cbr($src) attach-agent \udp($src)
    eval $ns_ connect \udp($src) \null($dst)
    $ns_ at $starttime "cbr($src) start"
}

proc poissontraffic { src dst interval starttime } {
    global ns_ node_
    set udp($src) [new Agent/UDP]
    eval $ns_ attach-agent $node_($src) \udp($src)
    set null($dst) [new Agent/Null]
    eval $ns_ attach-agent $node_($dst) \null($dst)
    set expl($src) [new Application/Traffic/Exponential]
    eval \expl($src) set packetSize_ 70
    eval \expl($src) set burst_time_ 0
    eval \expl($src) set idle_time_ [expr $interval*1000.0-
70.0*8/250]ms      ;# idle_time + pkt_tx_time = interval
    eval \expl($src) set rate_ 250k
    eval \expl($src) attach-agent \udp($src)
    eval $ns_ connect \udp($src) \null($dst)
    $ns_ at $starttime "expl($src) start"
}

```

```

if { ("${val(traffic)}" == "cbr") || ("${val(traffic)}" == "poisson") }
{
    puts "\nTraffic: ${val(traffic)}"
    #Mac/802_15_4 wpanCmd ack4data on
    puts [format "Acknowledgement for data: %s" [Mac/802_15_4
wpanCmd ack4data]]
    $ns_ at $appTime1 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 0.5ms"
    $ns_ at [expr $appTime1 + 0.5] "Mac/802_15_4 wpanNam
PlaybackRate 1.5ms"
    $val(traffic)traffic 0 1 5.0 $appTime1
    $val(traffic)traffic 0 2 5.0 $appTime1
    $val(traffic)traffic 0 3 5.0 $appTime1
    $val(traffic)traffic 0 4 5.0 $appTime1
    $val(traffic)traffic 1 0 0.5 $appTime1
    $val(traffic)traffic 2 0 0.5 $appTime2
    $val(traffic)traffic 3 0 0.5 $appTime3
    $val(traffic)traffic 4 0 0.5 $appTime4
    $ns_ at $appTime1 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime1)
$val(traffic) traffic from node 1 to node 0\""
    $ns_ at $appTime2 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime3)
$val(traffic) traffic from node 2 to node 0\""
    $ns_ at $appTime3 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime5)
$val(traffic) traffic from node 3 to node 0\""
    $ns_ at $appTime4 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime5)
$val(traffic) traffic from node 4 to node 0\""
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p AODV -c tomato
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ARP -c green
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p MAC -s 0 -d -1 -c navy
    if { "${val(traffic)}" == "cbr" } {
        set pktType cbr
    } else {
        set pktType exp
    }
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 0 -d 1 -c blue
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 3 -d 0 -c
green4
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 0 -d 5 -c cyan4
}

```

```

proc ftptraffic { src dst starttime } {
    global ns_ node_
    set tcp($src) [new Agent/TCP]
    eval \tcp($src) set packetSize_ 50
    set sink($dst) [new Agent/TCPSink]
    eval $ns_ attach-agent \node_($src) \tcp($src)
    eval $ns_ attach-agent \node_($dst) \sink($dst)
    eval $ns_ connect \tcp($src) \sink($dst)
    set ftp($src) [new Application/FTP]
    eval \ftp($src) attach-agent \tcp($src)
    $ns_ at $starttime "$ftp($src) start"
}

if { "$val(traffic)" == "ftp" } {
    puts "\nTraffic: ftp"
    #Mac/802_15_4 wpanCmd ack4data off
    puts [format "Acknowledgement for data: %s" [Mac/802_15_4 wpanCmd
    ack4data]]
    $ns_ at $appTime1 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 0.20ms"
    $ns_ at [expr $appTime1 + 0.5] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate
    1.5ms"
    ftptraffic 1 0 $appTime1
    ftptraffic 2 0 $appTime2
    ftptraffic 3 0 $appTime3
    ftptraffic 4 0 $appTime4
    $ns_ at $appTime1 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime1) ftp traffic
    from node 1 to node 0\""
    $ns_ at $appTime2 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime3) ftp traffic
    from node 2 to node 0\""
    $ns_ at $appTime3 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime3) ftp traffic
    from node 3 to node 0\""
    $ns_ at $appTime4 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime3) ftp traffic
    from node 4 to node 0\""
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p AODV -c tomato
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ARP -c green
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p MAC -s 0 -d -1 -c navy
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 0 -d 1 -c blue
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 1 -d 0 -c blue
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 0 -d 3 -c green4
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 3 -d 0 -c green4
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 0 -d 5 -c cyan4
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 5 -d 0 -c cyan4
}

```

```

# defines the node size in nam
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $ns_ initial_node_pos $node_($i) 2
}

# Tell nodes when the simulation ends
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $ns_ at $stopTime "$node_($i) reset";
}

$ns_ at $stopTime "stop"
$ns_ at $stopTime "puts \"NS EXITING...\n\""
$ns_ at $stopTime "$ns_ halt"

proc stop {} {
    global ns_ tracefd appTime1 val env
    $ns_ flush-trace
    close $tracefd
    set hasDISPLAY 0
    foreach index [array names env] {
        #puts "$index: $env($index)"
        if { ("DISPLAY" == "DISPLAY") && ("env($index)" != "") } {
            set hasDISPLAY 1
        }
    }
    if { ("val(nam)" == "lcase.nam") && ("hasDISPLAY" == "1") } {
        exec nam lcase.nam &
    }
}

puts "\nStarting Simulation..."
$ns_ run

```

- 1caso.out

```

num_nodes is set 5
INITIALIZE THE LIST xListHead

Traffic: ftp
Acknowledgement for data: on

Starting Simulation...
--- startPANCoord [0] ---
[0.000000](node 0) performing active channel scan
[0.000000](node 0) scanning channel 11
channel.cc:sendUp - Calc highestAntennaZ_ and distCST_
highestAntennaZ_ = 1.5, distCST_ = 35.9
SORTING LISTS ...DONE!
[0.141440](node 0) scanning channel 12
[0.280640](node 0) scanning channel 13
[0.420800](node 0) begin to transmit beacons
[0.421568](node 0) successfully started a new PAN (beacon enabled)
[channel:11] [PAN_ID:0]
--- startDevice [1] ---
[0.500000](node 1) performing active channel scan ...
[0.500000](node 1) scanning channel 11
[0.762400](node 1) scanning channel 12
[1.024480](node 1) scanning channel 13
[1.287200](node 1) sending association request to [channel:11]
[PAN_ID:0] [CoordAddr:0] ...
[1.289248](node 1) sending association request command ...
[1.290784](node 1) ack for association request command received
--- startDevice [2] ---
[1.500000](node 2) performing active channel scan ...
[1.500000](node 2) scanning channel 11
[1.762400](node 2) scanning channel 12
[1.782304](node 1) sending data request command ...
[1.783584](node 1) ack for data request command received
[1.786048](node 1) association response command received
[1.786048](node 1) association successful (beacon enabled)
[channel:11] [PAN_ID:0] [CoordAddr:0]
[1.786048](node 1) begin to synchronize with the coordinator
[2.024800](node 2) scanning channel 13
[2.288800](node 2) sending association request to [channel:11]
[PAN_ID:0] [CoordAddr:0] ...
[2.290528](node 2) sending association request command ...
[2.292064](node 2) ack for association request command received

```

```

--- startDevice [3] ---
[2.500000](node 3) performing active channel scan ...
[2.500000](node 3) scanning channel 11
[2.764320](node 3) scanning channel 12
[2.783584](node 2) sending data request command ...
[2.784864](node 2) ack for data request command received
[2.787328](node 2) association response command received
[2.787328](node 2) association successful (beacon enabled)
[channel:11] [PAN_ID:0] [CoordAddr:0]
[2.787328](node 2) begin to synchronize with the coordinator
[3.026720](node 3) scanning channel 13
[3.290400](node 3) sending association request to [channel:11]
[PAN_ID:0] [CoordAddr:0] ...
[3.291168](node 3) sending association request command ...
[3.292704](node 3) ack for association request command received
--- startDevice [4] ---
[3.500000](node 4) performing active channel scan ...
[3.500000](node 4) scanning channel 11
[3.763360](node 4) scanning channel 12
[3.784224](node 3) sending data request command ...
[3.785504](node 3) ack for data request command received
[3.787968](node 3) association response command received
[3.787968](node 3) association successful (beacon enabled)
[channel:11] [PAN_ID:0] [CoordAddr:0]
[3.787968](node 3) begin to synchronize with the coordinator
[4.026400](node 4) scanning channel 13
[4.289440](node 4) sending association request to [channel:11]
[PAN_ID:0] [CoordAddr:0] ...
[4.290528](node 4) sending association request command ...
[4.292064](node 4) ack for association request command received
[4.783584](node 4) sending data request command ...
[4.784864](node 4) ack for data request command received
[4.787328](node 4) association response command received
[4.787328](node 4) association successful (beacon enabled)
[channel:11] [PAN_ID:0] [CoordAddr:0]
[4.787328](node 4) begin to synchronize with the coordinator

Transmitting data ...

```

Anexo B: Anexos digitales

Los siguientes archivos se encuentran en el CD anexo al documento:

- A1.Script caso1.tr
- A2. Video Simulación Gráfica: 1caso.nam
- A.3 Video Simulación en programa NS-2 Wireless Trace Analyser
- A4. Datos almacenados del proceso de crecimiento de las lechugas
- A5. Video funcionamiento del sistema de monitorización
- A.6 Fotos desarrollo del proyecto