



UNIVERSIDAD CATÓLICA
“NUESTRA SEÑORA DE LA ASUNCIÓN”
CAMPUS ALTO PARANÁ
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA CON ORIENTACIÓN
ELECTRÓNICA

ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENsoRES
PARA EL MONITOREO DE VARIABLES Y CONTROL DE ACTUADORES EN UN
INVERNADERO

GABRIELA BELÉN CÁCERES RODRÍGUEZ
GUSTAVO DAVID QUIÑÓNEZ DUARTE

Hernandarias, julio de 2017

UNIVERSIDAD CATÓLICA
“NUESTRA SEÑORA DE LA ASUNCIÓN”
CAMPUS ALTO PARANÁ
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA CON ORIENTACIÓN
ELECTRÓNICA

ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES
PARA EL MONITOREO DE VARIABLES Y CONTROL DE ACTUADORES EN UN
INVERNADERO

GABRIELA BELÉN CÁCERES RODRÍGUEZ
GUSTAVO DAVID QUIÑÓNEZ DUARTE

Tutor:

Lic. Gregorio Ariel Guerrero Moral

Cotutores:

Ing. Mario Eduardo Arzamendia López

Ing. Ladislao Aranda Arriola

Hernandarias

2.017

GABRIELA BELÉN CÁCERES RODRÍGUEZ
GUSTAVO DAVID QUIÑÓNEZ DUARTE

ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES
PARA EL MONITOREO DE VARIABLES Y CONTROL DE ACTUADORES EN UN
INVERNADERO

Proyecto fin de carrera presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Electromecánico con Orientación Electrónica. Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”

Tutor: Lic. Gregorio Ariel Guerrero Moral

Cotutores: Ing. Mario Eduardo Arzamendia López
Ing. Ladislao Aranda Arriola

Hernandarias

2.017

Cáceres Rodríguez, Gabriela Belén; Quiñónez Duarte, Gustavo David (2.017); Análisis, Diseño y Simulación de una Red Inalámbrica de Sensores para el Monitoreo de Variables y Control de Actuadores en un Invernadero. Hernandarias, Universidad Católica. **170 p.**

Tutor: Lic. Gregorio Ariel Guerrero Moral

Cotutores: Ing. Mario Eduardo Arzamendia López

Ing. Ladislao Aranda Arriola

Defensa de Proyecto Fin de Carrera

Palabras clave: Hidroponía. Invernadero. WSAN. 6LoWPAN. Contiki.

GABRIELA BELÉN CÁCERES RODRÍGUEZ
GUSTAVO DAVID QUIÑÓNEZ DUARTE

ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES
PARA EL MONITOREO DE VARIABLES Y CONTROL DE ACTUADORES EN UN
INVERNADERO

Proyecto fin de carrera presentado a la carrera de Ingeniería Electromecánica con Orientación Electrónica como
requisito para la obtención del título de Ingeniero Electromecánico con Orientación Electrónica.

Mesa Examinadora

Hernandarias, 28 de julio de 2.017

Dedicatorias

A Dios y a la Mater, “Mater Perfectam Habebit Curam Et Victoriam”.

A mis padres, Roberto y Aurelia, por ser el principal cimiento para la construcción de mi vida profesional, sentaron en mí las bases de responsabilidad y superación, ofreciéndome el mejor regalo, mi formación.

A mis hermanas, Ana y Adriana, por su apoyo incondicional, por escucharme y ayudarme en todo momento.

Gabriela Belén Cáceres Rodríguez

A mis padres, Elizabeth y Esteban, como retribución a su empeño y sacrificio diario, en pos de mi formación humana y académica. Ante su invaluable esfuerzo, mi eterna gratitud.

Gustavo David Quiñónez Duarte

Agradecimientos

A los tutores de este proyecto, el Lic. Ariel Guerrero, el Ing. Mario Arzamendia y el Ing. Ladislao Aranda, por los consejos, orientaciones y apoyo recibidos, así como también la confianza depositada. Por su atención, paciencia y plena dedicación, estaremos eternamente agradecidos.

Se agradece también al Ing. Édgar Maya, al Ing. Gerardo Fogel, al Ing Wálter Benítez, a la Ing. Yessica Bogado, al Ing. Jorge Barrios y a la Ing. Daysi Ramírez, por las orientaciones brindadas en el marco de la ejecución de este proyecto.

Finalmente, a los miembros de la comunidad educativa de la Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”, campus Alto Paraná, por el apoyo y acompañamiento durante la carrera. A todos ellos, nuestro sincero agradecimiento.

Vence en la batalla quien está firmemente decidido a ganarla.

(León Tolstói)

Resumen

De entre las áreas de aplicación de las redes inalámbricas de sensores y actuadores (WSAN, *Wireless Sensor and Actuator Networks*), la agricultura presenta escenarios sumamente atractivos para la aplicación de esta tecnología. Su uso, junto con buenas prácticas agrícolas, permite obtener mayores beneficios de los cultivos.

El presente trabajo realiza una revisión del estado del arte de la aplicación de WSANs en la agricultura, casos de éxito, perspectivas y desafíos. Basado en este análisis, y con énfasis en los cultivos dentro de invernaderos hidropónicos, se estudian los fenómenos físicos que intervienen en los procesos de refrigeración, deshumidificación, calefacción, dosificación de nutrientes e iluminación.

Teniendo en cuenta estas necesidades, se propone el diseño de una arquitectura WSAN aplicable a invernaderos hidropónicos, analizando para ello los tipos de sensores necesarios, y las plataformas disponibles comercialmente. Se da énfasis al uso del sistema operativo Contiki, ideal para dispositivos de baja potencia, junto al simulador Cooja, para el desarrollo de una aplicación que se encargue de recolectar los datos adquiridos por los sensores, para procesarlos y transmitirlos a través de la red. Además, se considera la utilización de una tecnología innovadora, como lo es estándar 6LoWPAN, ya que está pensada para una mejor integración de las WSANs a la internet y que apunta al modelo de Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*).

Los resultados de las simulaciones realizadas demuestran la factibilidad de aplicar una WSAN como plataforma de comunicación en un invernadero. Para ello, primeramente, se han estudiado algunos procesos que se desarrollan en su interior, tales como la refrigeración y la deshumidificación, aprovechando modelos matemáticos proporcionados por referencias bibliográficas, para obtener los requisitos temporales a los que debe ajustarse el desempeño de la WSAN. Posteriormente, se han realizado simulaciones de la WSAN, verificando que su desempeño en términos de latencia se ajusta satisfactoriamente a las necesidades de los procesos de control.

Palabras clave: Hidroponía. Invernadero. WSAN. 6LoWPAN. Contiki.

Summary

Among the application areas of wireless networks of sensors and actuators (WSAN), agriculture presents extremely attractive scenarios for the application of this technology. Its use, along with good agricultural practices, allows higher profits crop.

This research reviews the state of the art of applying WSANs in agricultural fields, success stories, perspectives and challenges. Based on this analysis, and focusing on crops inside hydroponics greenhouses, physical phenomena, regarding cooling, dehumidification, heating, nutrient dosing and illumination processes are studied.

Given these requirements, the design of a WSAN architecture applicable for hydroponic greenhouses is proposed, analyzing for this purpose types of sensors required, and market available platforms. The Contiki operative system, ideal for low power devices, along with the Cooja simulator, are emphasized to develop an application for collecting acquired data from sensors, process this information and cast it over the network. Moreover, using an innovative technology such as 6LoWPAN is considered, given that it is conceived for a better integration between WSANs and the internet, focusing on the IoT (Internet of Things) model.

Results obtained through practiced simulations show that the use of a WSAN as a communications platform for a greenhouse is applicable. For this, first, processes that take place inside it were studied, such as air conditioning and dehumidification, using mathematical models provided in bibliographical references, in order to identify the temporal requirements to which the performance of the WSAN has to be adjusted. Later, WSAN simulations were executed, verifying that its performance in terms of latency are adjusted to the requirements of controlling processes.

Keywords: Hydroponics. Greenhouse. WSAN. 6LoWPAN. Contiki.

Lista de Figuras

Figura 1 - Aspecto exterior de un invernadero	14
Figura 2 - Aspecto interior de uno de los invernaderos de la FIA-UNE.	14
Figura 3 - Representación de un sistema flotante para hidroponía.....	24
Figura 4 - Representación de un sistema NFT para hidroponía.....	25
Figura 5 - Representación de un sistema DFT para hidroponía.....	26
Figura 6 - Representación de un sistema NGS para hidroponía.....	26
Figura 7 - Previsión del aumento de los dispositivos conectados a la Internet.....	31
Figura 8 - Arquitectura de capas de la IoT	31
Figura 9 - Representación esquemática de una red inalámbrica en invernaderos.	32
Figura 10 - Arquitectura de referencia de una WSAN.	35
Figura 11 - Diagrama de bloques de un nodo sensor.....	36
Figura 12 - Diagrama de bloques de un nodo actuador.	38
Figura 13 - Tipos de topologías para redes inalámbricas.	41
Figura 14 - Modelo OSI versus Modelo TCP/IP.	44
Figura 15 - Plataforma MICAz.	50
Figura 16 - Plataforma Mica2.	50
Figura 17 - Plataforma TelosB.	51
Figura 18 - Plataforma IRIS.	51
Figura 19 - Plataforma Z1.....	52
Figura 20 - Plataforma Imote2.	52
Figura 21 - Plataforma Wasp mote.	53
Figura 22 - Logo del sistema operativo Tiny.....	55
Figura 23 - Logo del sistema operativo Contiki.	56
Figura 24 - Logo del sistema operativo RIOT.	57
Figura 25 - Logo del sistema operativo Linux.....	58
Figura 26 - Logo del simulador OMNeT++.	59
Figura 27 - Logo del simulador NS-3.	60
Figura 28 - Logo del simulador NetLogo.	61
Figura 29 - Logo del simulador CupCarbon.	61
Figura 30 - Logo del sistema operativo Contiki, que proporciona el simulador Cooja.	62
Figura 31 - Food computer.	66
Figura 32 - Food Server.	67
Figura 33 - Curva obtenida para la simulación del modelado matemático del proceso de deshumidificación, propuesto por Fogel.	76
Figura 34 - Plataforma CM5000.	78
Figura 35 - Plataforma Arduino UNO.	78
Figura 36 - Sensor de temperatura del aire y humedad relativa SHT11.....	79
Figura 37 - Sensor de luminosidad S1087.	80
Figura 38 - Sensor de temperatura del agua DS18B20.	80
Figura 39 - Sensor de conductividad eléctrica K1.	81
Figura 40 - Entorno de trabajo del Cooja.....	83
Figura 41 - Topología de red mallada.	84

Figura 42 - Arquitectura del sistema propuesto.....	85
Figura 43 - Pila de protocolos de Contiki.....	86
Figura 44 - Diagrama de flujo de las funciones del nodo servidor.....	89
Figura 45 - Diagrama de flujo de las funciones del nodo servidor.....	90
Figura 46 - Estructura genérica de un a aplicación en Contiki.....	91
Figura 47 - Líneas de código usadas para la obtención de las lecturas de los sensores internos.....	93
Figura 48 - Líneas de código usadas para la obtención de las lecturas de los sensores externos.....	93
Figura 49 - Proceso de almacenar la información de los sensores externos en un buffer.....	94
Figura 50 - Estructura genérica del Makefile de Contiki.....	94
Figura 51 – Comando para ubicar un directorio en Contiki.....	95
Figura 52 - Comando para identificar las motas conectadas.....	95
Figura 53 - Informe de la identificación de motas.....	95
Figura 54 - Comando para la selección de la mota.....	96
Figura 55 - Informe de selección de la mota.....	96
Figura 56 - Comando para compilar y subir la aplicación.....	96
Figura 57 - Confirmación de que la aplicación fue compilada.....	97
Figura 58 - Comando para hacer 'login' en la mota.....	97
Figura 59 – Comando para ubicar el directorio del Cooja.....	98
Figura 60 - Comando para iniciar el Cooja.....	98
Figura 61 - Proceso de carga del Cooja.....	98
Figura 62 - Ventana principal del Cooja.....	99
Figura 63 - Ventana correspondiente a la opción "New Simulation".....	99
Figura 64 - Ventana del Cooja una vez creado el archivo de simulación.....	100
Figura 65 - Selección del tipo de mota en el Cooja.....	100
Figura 66 - Ventana de selección del archivo a simular.....	101
Figura 67 - Ubicación del archivo a simular.....	101
Figura 68 - Resultado de la aplicación ya compilada.....	101
Figura 69 - Ventana para agregar la cantidad de motas deseadas.....	102
Figura 70 - Ventana del Cooja con la mota ya agregada.....	102
Figura 71 - Opciones de visualización.....	102
Figura 72 - Ventana del Cooja corriendo la simulación.....	103
Figura 73 - Estructura de mensaje enviado.....	103
Figura 74 - Estructura de confirmación de la recepción del mensaje.....	104
Figura 75 - Transmisión de mensajes de los nodos fuera del radio de cobertura del servidor.....	105
Figura 76 - Transmisión de mensajes de los nodos dentro del radio de cobertura del servidor.....	105
Figura 77 – Aspecto de un archivo de texto extraído del Cooja.....	108
Figura 78 - Escenario de despliegue de motas para OpenAg.....	109
Figura 79 - Escenario de despliegue de motas para FIA-UNE.....	109
Figura 80 - Estructura de la personal food computer.....	110
Figura 81 - Nodos desplegados para OpenAg, primera situación.....	111

Figura 82 - Nodos desplegados para OpenAg, segunda situación.....	111
Figura 83 - Imagen satelital de los invernaderos de la FIA-UNE.....	112
Figura 84 - Plano de planta básico de la FIA-UNE	112
Figura 85 - Nodos desplegados para FIA-UNE, primera situación.	113
Figura 86 - Nodos desplegados para FIA-UNE, segunda situación.	113
Figura 87 - Latencia promedio experimentada en el escenario OpenAg, con menor cantidad de nodos y TX / RX del 100%.....	118
Figura 88 - Latencia promedio experimentada en el escenario OpenAg, con mayor cantidad de nodos y TX / RX del 100%.....	118
Figura 89 - Latencia promedio experimentada en el escenario OpenAg, con menor cantidad de nodos y TX / RX del 75%.....	118
Figura 90 - Latencia promedio experimentada en el escenario OpenAg, con mayor cantidad de nodos y TX / RX del 75%.....	118
Figura 91 - Latencia promedio experimentada en el escenario OpenAg, con menor cantidad de nodos y TX / RX del 50%.....	118
Figura 92 - Latencia promedio experimentada en el escenario OpenAg, con mayor cantidad de nodos y TX / RX del 50%.....	118
Figura 93 - Latencia promedio experimentada en el escenario FIA-UNE, con menor cantidad de nodos y TX / RX del 100%.....	125
Figura 94 - Latencia promedio experimentada en el escenario FIA-UNE, con mayor cantidad de nodos y TX / RX del 100%.....	125
Figura 95 - Latencia promedio experimentada en el escenario FIA-UNE, con menor cantidad de nodos y TX / RX del 75%.....	125
Figura 96 - Latencia promedio experimentada en el escenario FIA-UNE, con mayor cantidad de nodos y TX / RX del 75%	125
Figura 97 - Latencia promedio experimentada en el escenario FIA-UNE, con menor cantidad de nodos y TX / RX del 50%.....	125
Figura 98 - Latencia promedio experimentada en el escenario FIA-UNE, con mayor cantidad de nodos y TX / RX del 50%.....	125
Figura 99 - Relación de paquetes perdidos frente a TX/RX para OpenAg.	126
Figura 100 - Relación de paquetes perdidos frente a TX/RX para FIA-UNE.	126

Lista de Tablas

Tabla 1 - Elementos minerales esenciales para las plantas.....	29
Tabla 2 - Tabla comparativa entre estándares y tecnologías disponibles.....	49
Tabla 3 - Tabla comparativa de plataformas disponibles comercialmente.....	54
Tabla 4 - Características clave de TinyOS, Contiki, RIOT y Linux.....	59
Tabla 5 - Costo estimativo de los elementos de hardware seleccionados.....	82
Tabla 6 - Paquetes perdidos en el escenario OpenAg, bajo la primera situación, con TX / RX del 100%.....	114
Nota. Los valores mostrados en la tabla corresponden a los valores obtenidos mediante el análisis de los mensajes intercambiados por los nodos, ante una tasa de suceso en la transmisión y recepción de paquetes del 100%. Fuente propia.	
Tabla 7 - Paquetes perdidos en el escenario OpenAg, bajo la primera situación, con TX / RX del 75%	114
Tabla 8 - Paquetes perdidos en el escenario OpenAg, bajo la primera situación, con TX / RX del 50%	115
Tabla 9 - Latencia experimentada en el escenario OpenAg, con menor cantidad de nodos..	115
Tabla 10 - Paquetes perdidos en el escenario OpenAg, bajo la segunda situación, con TX / RX del 100%.....	116
Tabla 11 - Paquetes perdidos en el escenario OpenAg, bajo la segunda situación, con TX / RX del 75%	116
Tabla 12 - Paquetes perdidos en el escenario OpenAg, bajo la segunda situación, con TX / RX del 50%	116
Tabla 13 - Tabla 8 - Latencia experimentada en el escenario OpenAg, con mayor cantidad de nodos.....	117
Tabla 14 - Paquetes perdidos en el escenario FIA-UNE, bajo la primera situación, con TX / RX del 100%	119
Tabla 15 - Paquetes perdidos en el escenario FIA-UNE, bajo la primera situación, con TX / RX del 75%	119
Tabla 16 - Paquetes perdidos en el escenario FIA-UNE, bajo la primera situación, con TX / RX del 50%	120
Tabla 17 - Latencia experimentada en el escenario FIA-UNE, con menor cantidad de nodos.	120
Tabla 18 - Paquetes perdidos en el escenario FIA-UNE, bajo la segunda situación, con TX / RX del 100%.....	121
Tabla 19 - Paquetes perdidos en el escenario FIA-UNE, bajo la segunda situación, con TX / RX del 75%.....	122
Tabla 20 - Paquetes perdidos en el escenario FIA-UNE, bajo la segunda situación, con TX / RX del 50%.....	122
Tabla 21 - Latencia experimentada en el escenario FIA-UNE, con mayor cantidad de nodos.	123

Lista de Acrónimos

BLE	Bluetooth Low Energy
CE	Conductividad Eléctrica
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
DFT	Deep Flow Technique
EDGE	Enhanced Data rates for Global Evolution
FAO	Food and Agriculture Organization
FIA-UNE	Facultad de Ingeniería Agronómica - Universidad Nacional del Este
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile communication
HTTP	Hypertext transfer Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IPv4	Internet Protocol version 4
IPv6	Internet Protocol version 6
ISA	International Society of Automation
ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
MAC	Media Access Control
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NFT	Nutrient Flow Technique
NGS	New Growing System
OSI	Open System Interconnection
PAN	Personal Area Network
RAM	Random Access Memory
RDC	Radio Duty Cycle
RPL	Routing over Low power and Lossy Networks
SASE	Simposio Argentino de Sistemas Embebidos
TCP	Transmission Control Protocol
TIC	Tecnología de la Información y Comunicación
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
UDP	User Datagram Protocol
WiMAX	Worldwide interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WSAN	Wireless Sensor and Actuator Network

Índice

Introducción	1
1 Naturaleza y Contenido del Trabajo de Investigación	4
1.1 Planteamiento del Problema.....	4
1.2 Objetivo General	7
1.2.1 Objetivo Principal.....	7
1.2.2 Objetivos Específicos.....	7
1.3 Justificación.....	8
1.4 Hipótesis.....	10
Marco Teórico.....	11
2 - Conceptos Relacionados a la Agricultura.....	11
2.1 Agricultura de Precisión.....	12
2.1.1 Reseña Histórica.....	12
2.1.2 Concepto.....	13
2.2 Invernaderos	14
2.2.1 Ventajas y Desventajas.....	15
2.3 Climatización de Invernaderos.....	17
2.3.1 Condiciones Climáticas.....	17
2.3.2 Control de la Temperatura para Climas Fríos.....	18
2.3.3 Control de la Temperatura para Climas Cálidos.	20
2.4 Hidroponía.....	21
2.4.1 Reseña Histórica.....	21
2.4.2 Concepto.....	22
2.4.3 Crecimiento de las Plantas.....	22
2.4.4 Ventajas y Desventajas.....	23
2.4.5 Sistemas Utilizados en la Hidroponía.....	24
2.4.6 Solución nutritiva.	27
3 - Conceptos Referentes a las Tecnologías de Información y Comunicación.....	30
3.1 Internet de las Cosas.....	30
3.2 Red Inalámbrica de Sensores y Actuadores	32
3.2.1 Concepto.....	32
3.2.2 Características.....	33
3.2.3 Componentes de una WSAN.....	34
3.2.4 Tipos de Sensores Aplicados en Invernaderos Hidropónicos.....	38
3.2.5 Topologías de Red WSAN	39
3.2.6 Aplicaciones.	41
3.3 Protocolo IPV6.....	42
3.3.1 Concepto.....	42
3.3.2 Direcccionamiento IPv6.....	44
3.4 Estándares Utilizados y Tecnología Disponible.....	45
3.5 Plataformas disponibles.....	49
3.6 Sistemas Operativos	55
3.7 Simuladores.....	59
4 - Integración de las Tecnologías de Información y Comunicación en la Agricultura	63
4.1 Trabajos Relacionados	63
4.2 Iniciativa OpenAg	65
4.2 Food Computers	65
Metodología de la Investigación	68
5 - Diseño Metodológico	68
5.1 Selección del Problema a Investigar	68

5.2 Elaboración del Plan para Resolver el Problema	69
5.3 Elaboración del Diseño de la Investigación	70
5.3.1 Método.....	70
5.3.2 Definición de la Información Necesaria.....	70
5.4 Definición del Alcance.....	74
5.5 Comprobación de la Hipótesis	75
Ingeniería del Diseño	77
6 - Diseño y Simulación de una Red Inalámbrica de Sensores y Actuadores	77
6.1 Aspectos Referentes al Hardware	77
6.1.1 Sistemas Embebidos.....	77
6.1.2 Sensores.....	78
6.1.3 Costo Estimativo de los Elementos de Hardware Seleccionados.....	82
6.2 Aspectos Referentes al Software.....	82
6.3 Diseño de la Red y Protocolos Implementados.....	84
6.3.1 Topología.....	84
6.3.2 Arquitectura del Sistema.	85
6.3.3 Protocolos Implementados.	86
6.3.4 Estructura Funcional de la Aplicación Diseñada.....	88
6.4 Diseño de la Aplicación en Contiki.....	91
6.4.1 Archivo de una Aplicación en Contiki.	91
6.4.2 Compilar una Aplicación en Contiki.	94
6.4.3 Simular una Aplicación en Cooja.....	98
7 - Simulaciones y Resultados	105
7.1 Parámetros Analizados	106
7.1.1 Paquetes Perdidos.....	106
7.1.2 Latencia.	106
7.2 Metodología del Análisis	107
7.3 Descripción de los Escenarios Simulados.....	109
7.3.1 OpenAg.....	110
7.3.2 FIA-UNE.	112
7.4 Resultados	114
8 - Conclusiones y Trabajos Futuros	128
8.1 Conclusión.....	128
8.3 Propuestas.....	129
8.4 Trabajos Futuros.....	130
Referencias Bibliográficas	131
Anexo I.....	140
Anexo II	147
Anexo III.....	151

Introducción

El Paraguay presenta a la agricultura como una de sus actividades económicas principales, siendo practicada de forma extensiva por grandes empresas, debido a la disponibilidad de tierras aptas para el cultivo, y recursos naturales suficientes; así como también por miles de familias, que dependen de la agricultura como actividad básica de sustento.

Pero, pese a la riqueza de recursos naturales, la actividad agrícola, como toda actividad económica, debe enfocarse a la sustentabilidad, para tratar de paliar el efecto que la misma produce sobre la explotación masiva de estos recursos y fortalecer su crecimiento sostenido, considerando que el aumento en superficie de las áreas cultivadas indica, en proporción directa, el aumento en superficie de bosques nativos sacrificados en pro de la expansión agrícola.

Cobra importancia también el manejo del agua, que como recurso no renovable, requiere ser aprovechado de manera razonable y eficiente, en vista de que su mala administración perjudica directamente a la capacidad productiva de las tierras cultivadas, derivando en el desperdicio del propio recurso, motivo por el cual es necesaria la búsqueda de alternativas que ayuden a optimizar su uso. Cambios demográficos registrados en los últimos años, junto a problemáticas tales como el cambio climático y la escasez de recursos, en regiones tradicionalmente dedicadas a la agricultura, hacen que los productores busquen alternativas que permitan sacar un mayor rendimiento de sus parcelas. Con ese afán, se va logrando perfeccionar técnicas de cultivo más sustentables, entre ellas la hidroponía, que es una técnica que prescinde del uso de la tierra para hacer crecer plantas y hortalizas, empleando soluciones nutritivas que alimentan las raíces de estos cultivos (Oasis Easy Plant, s.f).

Los invernaderos permiten manejar adecuadamente las variables climáticas relevantes para las plantaciones, al ser espacios cerrados donde, apoyados por sistemas que incorporan

sensores y actuadores, es posible monitorear y controlar variables como la temperatura, humedad y luminosidad del interior. “Con la hidroponía se logra controlar los factores edáficos que limitan a la parte de la raíz, y con los invernaderos se controlan los factores ambientales que afectan a la parte aérea” (Oasis Easy Plant, s.f, p.17). Sistemas como éstos usan para su despliegue una red cableada como medio físico para la comunicación. Sin embargo, los últimos avances en ciencia e ingeniería han permitido implementar soluciones de redes inalámbricas de sensores y actuadores (WSAN, *Wireless Sensor and Actuator Network*) para diversos escenarios que presenta la agricultura.

Ojha, Misra y Raghwanshi refieren que “estos sistemas logran el monitoreo de parámetros ambientales mediante nodos sensores inalámbricos, también conocidos como motas. Debido a que las WSANs son escalables, redes ya desplegadas pueden ser mejoradas simplemente aumentando el número de motas que componen su arquitectura, para el monitoreo de parámetros adicionales” (Citado en Cáceres, Quiñónez, Guerrero, Arzamendia y Aranda, 2.016, p.1). Esta tarea de monitoreo permite al usuario acceder a una cantidad de información mayor que a la que accede mediante el uso de herramientas manuales, y así tomar decisiones más adecuadas con respecto al manejo de su plantación.

El objetivo principal de este trabajo fue diseñar una herramienta eficaz para el monitoreo y control de entornos de producción agrícola, tomando como caso de estudio las necesidades existentes dentro de un invernadero hidropónico, y presentarla como un elemento de apoyo a la hora de evaluar y determinar las condiciones favorables para los cultivos.

A fin de cumplir con el objetivo de este trabajo, se propone el diseño de un sistema de control sobre una plataforma de comunicación inalámbrica. Además, se considera la utilización de una tecnología innovadora, como lo es 6LoWPAN (*IPv6 Over Low Power Wireless Personal Area Networks*), ya que está pensada para una mejor integración de las WSANs a la

internet y que apunta al modelo de Internet de las Cosas (IoT, del inglés *Internet of Things*), que últimamente ha atraído mucha atención en el ámbito académico.

De esta forma, el uso de tecnologías de la información, junto con buenas prácticas agrícolas, permitirá obtener mayores beneficios de los cultivos, haciendo posible una actividad agrícola no sólo más eficiente, sino también económicamente más rentable.

1 Naturaleza y Contenido del Trabajo de Investigación

1.1 Planteamiento del Problema

A nivel local, la hidroponía va ganando terreno frente a una agricultura mayoritariamente convencional, sumando productores en distintas partes del país que se vuelcan hacia esta técnica, atraídos por las ventajas que la misma ofrece en cuanto a producción y recuperación de la inversión. Son varios los proveedores que ya ofrecen soluciones a la hora de montar y equipar invernaderos hidropónicos de todos los tamaños, ya sea para una agricultura familiar, hasta para grandes establecimientos agrícolas. Empresas como Hidropar, Hidro House e Hidrosolo señalan también un alto interés de consumidores mayoristas, como cadenas de restaurantes y supermercados, que exigen de sus proveedores una elevada calidad en los productos.

Representantes de Hidropar, empresa de origen brasileño, con casi dos años de presencia en el mercado local, relatan la buena experiencia que han tenido desde sus inicios en el Brasil, en el área de la hidroponía, lo que les motivó a expandir sus actividades comerciales, instalándose en el Paraguay, donde en poco tiempo se ha convertido en una de las principales referencias en el área, en cuanto al montaje de invernaderos hidropónicos, venta de insumos y asistencia técnica para el productor.

La Facultad de Ingeniería Agronómica de la Universidad Nacional del Este (FIA-UNE) lleva adelante un proyecto de desarrollo de hortalizas hidropónicas, encabezado por la Dra. Daisy Ramírez. Con este fin, tiene montados tres invernaderos en su campus universitario de la ciudad de Minga Guazú, en donde se pone en práctica esta técnica con fines académicos y también económicos, pudiendo así cubrir los costos productivos y sustentar la investigación.

Las soluciones comerciales adoptadas con más frecuencia contemplan el uso de herramientas manuales, tanto para la verificación del estado del agua disponible en el reservorio, así como para la medición de las condiciones climáticas dentro del invernadero, requiriendo la intervención del personal para ejecutar esta tarea, y también tareas complementarias, en caso de obtenerse resultados desfavorables; tareas como la adición de nutrientes al agua o el accionamiento de extractores de aire.

También están disponibles en el mercado herramientas que ayudan a la hora de realizar las tareas de monitoreo, que permiten, por ejemplo, hacer un control del agua en intervalos determinados por el usuario, de forma tal a que el sistema, de por sí, pueda determinar la necesidad de añadir nutrientes, y hacerlo de forma automática. Pero, a pesar de los beneficios que sistemas como éstos pueden proporcionar, los mismos están poco adoptados a nivel país, debido, de manera principal, al alto grado de inversión, tanto para la adquisición como para la implementación. Se menciona un alto grado de inversión, considerando la falta de desarrollo de tecnologías propias, que puedan aplicarse a esta área, teniendo que recurrir a soluciones extranjeras, cuyos costos se acentúan con las tasas de importación, y cuyas características pueden no adecuarse a la medida de las necesidades del productor.

Herramientas de automatización para sistemas hidropónicos incorporan elementos que se encargan de dosificar los nutrientes a ser adicionados al agua, en base a la medición de los niveles de conductividad eléctrica y pH de la misma, y por lo general se limitan a esta tarea. Sin embargo, para los cultivos hidropónicos, es fundamental también que se vigile la temperatura del agua utilizada, considerando que las raíces de estos cultivos permanecen en todo momento en contacto con la misma, por lo que su aumento o disminución tiene un impacto directo en el desarrollo apropiado de éstos; y como todo cultivo en general, también es necesario que puedan desarrollarse en un entorno que presente condiciones climáticas favorables para ello, tales como la temperatura de ambiente o el nivel de humedad; pero el

hecho de que acceder a estas herramientas tecnológicas implique una importante inversión, que en muchos casos no puede ser realizada por los agricultores, limita la expansión de éstas, por lo que resulta fundamental plantear alternativas que permitan abaratar los costos.

Ante la situación expuesta, se plantea la siguiente problemática:

- ¿Cuáles son las tareas a realizarse, a fin de presentar una herramienta técnicamente viable, para el monitoreo y control de un invernadero hidropónico?

Considerando lo expuesto, se plantean las siguientes preguntas específicas:

- ¿Cómo identificar las tareas que debe cumplir esta herramienta, y los elementos que debe usar para ello?
- ¿Qué debe ser estudiado de forma previa al diseño?
- ¿Qué pasos deben seguirse, a fin de diseñar esta herramienta?
- ¿Qué se debe hacer, a fin de determinar su viabilidad técnica?

1.2 Objetivo General

1.2.1 Objetivo Principal.

Realizar análisis, diseño y simulación de una red inalámbrica de sensores y actuadores, a ser desplegada en un invernadero hidropónico, a fin de sentar las bases de viabilidad técnica para el despliegue de dicha red.

1.2.2 Objetivos Específicos.

- Determinar los procesos a ser ejecutados, básicamente, para el desarrollo de cultivos en invernaderos hidropónicos, así como los sensores y actuadores que intervienen en los mismos.
- Realizar un estudio de las WSANs (características, protocolos, topologías, actuadores, estándares y sistemas operativos), para emplear el conocimiento adquirido en el diseño de la red de monitoreo de las condiciones climáticas de un invernadero.
- Determinar una plataforma disponible comercialmente, que pueda utilizarse con la tecnología de las WSANs, para el despliegue de los nodos inalámbricos de la red, así como un sistema operativo compatible. Seleccionar y validar la pila de protocolos a utilizar, y desarrollar el *firmware* de las motas.
- Simular mediante herramientas de *software* el funcionamiento de la red, cubriendo sus aspectos topológicos. Verificar los requisitos temporales asociados a los requisitos del lazo de control de los diversos subsistemas de un invernadero hidropónico.

1.3 Justificación

Las estadísticas de la empresa Cisco Systems, Inc. indican que para el 2.020, cerca de 20.000 millones de dispositivos electrónicos tendrán la capacidad de conectarse y comunicarse. Ese es el fenómeno por detrás del cual la IoT emerge como centro de muchas investigaciones, procurando establecer un conjunto de protocolos y estándares que permitan su adopción generalizada, para hacer de nuestras actividades cotidianas, más fáciles y organizadas. Este modelo de Internet contempla una interacción basada en la computación ubicua, entendida como la integración de dispositivos en la vida cotidiana de las personas, de manera inconsciente, para realizar sus actividades diarias.

Es así como día a día nos encontramos con tecnologías cada vez más innovadoras, que agrupadas en un conjunto, han recibido el nombre de "Tecnologías de Información y Comunicación" (TIC). En cuanto a su uso masivo, éste podría nuevamente impactar de forma negativa sobre el medio de sustento de muchos productores incapaces de asumir los retos que imponen los cambios tecnológicos, creándose una brecha entre aquellos que adoptaron efectivamente a las TIC como aliadas en el trabajo, y los que no. Sin embargo, este paradigma puede fácilmente romperse mediante el incentivo y la colaboración de distintos sectores de la sociedad, a fin de identificar debilidades que impiden el desarrollo en zonas rurales (De la Cruz, 2.006, p.1).

En la práctica, el uso holístico de las TIC en la agricultura, conceptualizada en China como ‘agricultura inteligente’ significa aprovechar plenamente los logros de la moderna tecnología de la información para desarrollar la agricultura, incluyendo los ordenadores y las redes, la Internet de las cosas, la computación en nube, la tecnología 3S (teledetección, sistemas de información geográfica y GPS) y la tecnología de comunicación inalámbrica (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2.016, p.2).

Cifras de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, del inglés *Food and Agriculture Organization*) indican que para el 2.050 serán unos 9.600 millones las personas que demanden alimentos a nivel mundial, advirtiendo la misma sobre la necesidad de adoptar medidas con urgencia, sobre todo en materia de producción agrícola. Es así que presentan el enorme desafío de aumentar gradualmente la capacidad productiva mundial, teniendo que incrementar en un 70% para ese entonces, con relación a la capacidad actual, a fin de evitar una posible crisis mundial en cuanto al acceso a los alimentos (Guerrini, 2.015). Para poder combatir esta problemática, la industria agrícola deberá adaptarse a través del uso de nuevas tecnologías, y considerando ésto, resulta de vital importancia la inversión en el desarrollo de herramientas que incorporen sistemas de automatización para mejorar los rendimientos y mantener los márgenes de ganancia como actividad económica.

Inevitablemente, serán los recursos tecnológicos los principales protagonistas a la hora de enfrentar el panorama poco favorable estimado por la FAO. De entre ellos, la tecnología de redes inalámbricas de sensores se destaca por incorporar un sistema de adquisición y procesamiento automático de datos agrometeorológicos in-situ, para una mayor precisión, determinando el estado de los cultivos. Este sistema está compuesto de sensores montados en plataformas de *software* libre, llamadas “motas”. Estas motas se interconectan unas con otras formando la red, pudiendo comunicarse de forma autónoma y flexible, en tiempo real; es capaz de obtener información del entorno y enviarla de forma inalámbrica a una central (Maya, 2.014). Adicionalmente, pueden incorporarse actuadores que permitan introducir cambios a los sistemas de iluminación, ventilación, etc.

Maya (2.014) refiere que 6loWPAN permite el intercambio de flujos de información punto a punto e integración de dispositivos de bajo consumo de manera transparente en internet, soportando múltiples opciones de topología. La aplicación de este protocolo permite la capacidad de interactuar y comunicarse con una red de objetos, permitiendo la

interoperabilidad de las redes *LowPan* e Internet y así optimizar el uso de los estándares de Internet sobre redes inalámbricas de baja potencia.

1.4 Hipótesis

La tecnología WSAN puede aplicarse al monitoreo y control de invernaderos hidropónicos, a fin de tener un completo manejo sobre las variables ambientales que determinan la calidad de la producción, constituyéndose en una herramienta para la automatización de estos invernaderos.

Marco Teórico

La fundamentación teórica del proyecto abarca desde el capítulo 2 hasta el capítulo 4, donde en el capítulo 2 se presentan los conceptos estudiados con relación a la agricultura, tratando temas como la agricultura de precisión, los invernaderos y su climatización, y la hidroponía.

En el capítulo 3 se presentan los conceptos estudiados con relación a las tecnologías de la información y la comunicación, tratando temas como la Internet de las cosas, redes inalámbricas de sensores y actuadores, el protocolo IPv6, los estándares utilizados y la tecnología disponible, así como los sistemas operativos y los simuladores más utilizados.

El capítulo 4 describe la integración de las tecnologías de la información y comunicación en la agricultura, presentando los conceptos de la iniciativa OpenAg y las *food computers*.

2 - Conceptos Relacionados a la Agricultura

En este capítulo se introducen los conceptos relacionados a la hidroponía, sus características y requisitos, así como también las distintas técnicas implementadas en los cultivos hidropónicos. También se aborda el concepto de los invernaderos; sus principales características y ventajas.

2.1 Agricultura de Precisión

2.1.1 Reseña Histórica.

La agricultura fue concebida como la primera actividad productiva de sustento del hombre, destinada a satisfacer, junto con la caza y la pesca, sus necesidades alimentarias. Sin embargo, de ser una actividad básica, ésta pasó a convertirse en un modelo de actividad extensiva con el surgimiento de los primeros sistemas económicos, que agregaban un valor comercial a lo producido. Sin embargo, su evolución se dio muy lentamente. Castro y Marques (2.009) menciona, en ese entonces, que recién en los últimos 120 años la agricultura había sufrido una enorme transformación. Primero, con la adopción de maquinaria de trabajo pesado, la agricultura pasó a ser mecanizada. Más tarde, en los últimos 50 años, con la inclusión de avances en el área de la óleo-dinámica, las máquinas se habían vuelto más sofisticadas al incorporar mecanismos de asistencia para el comando y el control. Luego, en los últimos 20 años, se había presenciado la introducción de varios complementos a los sistemas anteriores, apoyados por sensores electrónicos que posibilitaron la creación de automatismos. Finalmente, a lo largo de la última década, se vino haciendo presente una creciente adopción e integración de las tecnologías de la información, adquiriendo popularidad de a poco la expresión de “agricultura de precisión”.

La Agricultura de Precisión se concibió desde EE.UU. como un círculo que se retroalimentaba año a año, y donde el único objetivo culminaba con la realización de dosis variable de insumos. O sea, se incorporó la idea de utilizar la tecnología de información para adecuar el manejo de suelos y cultivos, a la variabilidad natural y/o inducida presente dentro del lote (García y Flego, 2.008, p.99).

Según la literatura, el registro más antiguo de que la variabilidad era conocida, data de 1.929, y en el mismo, presentado en forma de boletín informativo de un campo experimental

de Illinois, se recomendaba al productor diseñar un mapa con pruebas de acidez realizadas en muestras de suelo, para la aplicación de calcáreo. Sin embargo, Stafford (2.000) hace referencia de que hace siglos ya era considerada la variabilidad espacial en el trabajo de campo (Citado en Inamasu y Bernardi, 2.014, p.22).

2.1.2 Concepto.

El concepto sobre el que se basa la agricultura de precisión es aplicar la cantidad correcta de insumos, en el momento adecuado y en el lugar exacto; corresponde a una estrategia de administración que utiliza tecnología de la información y las comunicaciones para recolectar datos útiles desde distintas fuentes, con el fin de apoyar decisiones asociadas a producción de cultivos (García y Flego, 2.008, p.100).

La agricultura de precisión está normalmente asociada a la utilización de equipos de alta tecnología (sea *hardware*, en el sentido genérico del término, o *software*) para evaluar o monitorear las condiciones de una determinada parcela de terreno, aplicando después los diversos factores de producción (semillas, fertilizantes, fitofármacos, reguladores de crecimiento, agua, etc.) de acuerdo a los resultados obtenidos. Tanto el monitoreo como la aplicación diferenciada, o a medida, exigen la utilización de herramientas tecnológicas (Castro y Marques, 2.009).

Según Plant (2.001), el uso de la agricultura de precisión está supeditado a los beneficios económicos que la misma pueda tener, y define tres criterios de evaluación. Primeramente, que las variabilidades de los factores dentro del área de cultivo influyan en la producción final; luego, que las causas de la variabilidad puedan ser identificadas; y finalmente, que la información obtenida pueda ser usada para mejorar las prácticas de manejo del cultivo y la productividad.

2.2 Invernaderos

Los invernaderos son estructuras cerradas, montadas generalmente con componentes metálicos, recubiertas con placas transparentes o translúcidas, sean éstas de vidrio, plástico, policarbonato, PVC o acrílico, en cuyo interior se procura mantener un ambiente propicio para el crecimiento de las plantas. Esta modificación es principalmente fruto del efecto invernadero que ocurre cuando la radiación incidente es atrapada en su interior debido a la propiedad específica del material de la cubierta y la limitación (FAO, 2.002).

Este sistema se utiliza para asegurar la producción y calidad de los cultivos durante todo el año. El concepto de cultivos bajo invernadero representa el paso de la producción extensiva, hacia una intensiva. Para ello, los invernaderos han de reunir condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo. Los controles de temperatura, humedad relativa, corrientes de aire y composición atmosférica son esenciales, como lo son, además, el control del agua y de los fertilizantes, el mantenimiento del nivel de oxígeno cerca de las raíces y la sanidad del cultivo, para asegurar óptima calidad y productividad (FAO, 2.007)



Figura 1 - Aspecto exterior de un invernadero.
Extraído de: <https://www.planttec.com.br/fotos-de-estufas-agricolas.asp#all>



Figura 2 - Aspecto interior de uno de los invernaderos de la FIA-UNE.
Fuente propia.

Los invernaderos pueden ser clasificados, en relación al control de los factores meteorológicos, en climatizados, semiclimatizados y no climatizados. Los climatizados son los que poseen mecanismos eléctricos, electrónicos y mecánicos, de accionamiento automático, para el control de temperatura, humedad relativa, ventilación y luz; su empleo depende de una explotación agrícola económicamente rentable y elevada. Los invernaderos semiclimatizados están dotados de cierto grado de automatización en lo relacionado a control de temperatura, humedad y luz, y se usan para explotaciones agrícolas altamente rentables. Los invernaderos no climatizados son los más viables económicamente para el pequeño y mediano productor, con vistas a la producción comercial de hortalizas para el mercado local; no poseen ningún tipo de equipo de acondicionamiento, y su utilización está limitada a la aplicación de factores físicos de la propia naturaleza del ambiente (FAO, 2.007).

2.2.1 Ventajas y Desventajas.

Oasis Easy Plant (s.f), en cuanto a ventajas y desventajas, menciona en su Manual de Hidroponía las siguientes:

Ventajas Técnicas de los Invernaderos.

- Control de heladas y de las bajas temperaturas.
- Control de la insolación y de las altas temperaturas.
- Control de la velocidad del viento.
- Control de varias especies de plagas al funcionar como una barrera física.
- Control de los excesos de humedad edáfica y de las enfermedades causadas por ello.

- Menor presencia de enfermedades al controlar vectores, exceso de humedad y daños mecánicos por viento.
- Control de la humedad relativa.
- Posibilidad de controlar el dióxido de carbono (CO_2).

Ventajas Económicas.

- Más altos rendimientos y mayor calidad de productos de alto valor económico.
- Producción continua y más precoz (varios ciclos por año).
- Programación de las cosechas para fechas en que el mercado ofrece mejores precios.
- Más seguridad de éxito por no depender tanto de los factores meteorológicos.

Desventajas de los Invernaderos.

- Altos costos de instalación y operación.
- Desconocimiento del diseño apropiado.
- Desconocimiento y dificultad técnica de manejo del suelo.
- Desconocimiento y dificultad técnica de manejo del clima.
- Necesidad de mercado seguro.
- Solo rentable para especies de alto valor comercial.

2.3 Climatización de Invernaderos

La necesidad de llevar un control sobre las variables climáticas obedece al hecho de que es fundamental para el crecimiento saludable de las plantas, que las mismas estén en un ambiente en el cual los niveles de luminosidad, humedad, concentración de dióxido de carbono y oxígeno sean los adecuados. A su vez, estos factores están íntimamente relacionados entre sí y actúan sobre el crecimiento vegetativo, posibilitando la absorción por raíces de los nutrientes (...) favoreciendo la producción de elementos orgánicos por medio de la fotosíntesis; permitiendo la transpiración del vapor de agua excedente en la planta, cuando la humedad no es excesiva y la temperatura es la apropiada; facilitando la respiración óptima del vegetal en un medio provisto de oxígeno y valores normales de dióxido de carbono (CO_2), temperatura y humedad (Ferrato y Panelo, 2.003).

2.3.1 Condiciones Climáticas.

Entre las condiciones climáticas que cobran importancia dentro de un invernadero, se pueden mencionar: la luz, la temperatura, la humedad relativa, y el dióxido de carbono (CO_2).

Luz.

Este factor hace posible la mayoría de los procesos biológicos, incluyendo la fotosíntesis, convirtiéndose en uno de los más importantes, debido a que la luz interviene en todos los procesos de crecimiento de las plantas. Ésta trabaja como fuente primaria de calor (la energía luminosa se transforma en energía calórica), y estimula la regulación de todos los tejidos vegetales (Oasis Easy Plant, s.f, p.16).

Temperatura.

También actuando sobre los procesos biológicos, la temperatura determina el crecimiento adecuado de las plantas, considerando que éstas no pueden desarrollarse fuera del rango de 0 - 50°C, y tienen dificultades para hacerlo fuera del rango de 10 - 25°C, considerado el ideal (Oasis Easy Plant, s.f, p.16).

Humedad Relativa.

De no mantener niveles adecuados de humedad relativa, pueden observarse consecuencias por exceso o por defecto, siendo común en el primer caso que se dificulte la capacidad de las plantas para absorber nutrientes, y en el segundo, que se reduzca la tasa de fotosíntesis (Oasis Easy Plant, s.f, p.16).

Dióxido de Carbono (CO_2).

Actúa como nutriente principal de las plantas, siendo el aire la única fuente de la cual lo pueden absover. La concentración de éste determina la velocidad de crecimiento de las plantas (Oasis Easy Plant, s.f, p.16).

2.3.2 Control de la Temperatura para Climas Fríos.

Vista la influencia de la temperatura sobre las plantas, a continuación, se describen algunos procesos de calefacción de invernaderos:

Sistemas de Calefacción Antiheladas.

Se emplean calefactores que, de ser utilizados adecuadamente, resultan muy útiles debido a su bajo costo y diversidad de elementos combustibles compatibles (desde carbón hasta materiales orgánicos). Como desventaja, puede nombrarse la posibilidad de que éstos afecten a las plantas, cuando la instalación no contempla el uso de una chimenea de salida para los gases producidos (FAO, 2.002).

Sistemas de Calefacción por Aire Forzado.

En estos sistemas se contempla el uso de ductos que reparten el aire caliente a distintas zonas del invernadero, logrando una distribución uniforme del calor. Los ductos pueden ser instalados a distintas alturas, dependiendo de la necesidad de las plantas, y llevan a lo largo de su longitud una serie de perforaciones por las cuales la masa de aire caliente proveniente del quemador, fluye hacia el exterior; y como son de plástico, permiten que este sistema sea bastante económico de implementar, resultando ideal para aplicaciones temporales (FAO, 2.002).

Sistemas de Calefacción por Agua Caliente.

Frente al uso de tubos de plástico, este sistema resulta costoso de implementar, requiriendo el uso de tubos de acero por los cuales se hace circular agua, a temperatura entre los 60 - 80°C. Si bien son útiles para la calefacción en invierno, o de requerirse, en cualquier

otra época del año, su uso puede derivar en el aumento indeseado de la humedad relativa en el interior del invernadero (FAO, 2.002).

2.3.3 Control de la Temperatura para Climas Cálidos.

El aumento de la temperatura en el interior, cosa que se aprecia hasta en días fríos, es uno de los principales fenómenos físicos a combatir en los invernaderos, ocasionado por la incidencia de los rayos solares sobre la cubierta translúcida del invernadero, y se agrava cuando no se provee de un sistema de ventilación adecuado (FAO, 2.002).

Ventilación.

A fin de lograr un intercambio de aire entre el interior y el exterior del invernadero, se pueden plantear soluciones tanto de ventilación natural como de ventilación forzada. Con la primera, se busca aprovechar la distribución de presiones en la cubierta debido al viento, y por ende, la diferencia de presión entre el invernadero y el exterior. La segunda, introduce mecanismos de ventilación artificial que, aun siendo más efectivos que la ventilación natural o pasiva, no son comunes de observar debido al costo que representa la instalación y el consumo eléctrico (FAO, 2.002).

Refrigeración por Evaporación.

La base del funcionamiento de este sistema radica en el principio de absorción de calor de las partículas de agua que se lanzan al aire luego de evaporarse. Para ello, se hace chocar el flujo de aire contra una pantalla porosa, saturada de agua. Su implementación implica una alta

inversión en cuanto a instalación y consumo de energía eléctrica y agua. También se requiere que esta última se mantenga a temperatura fresca dentro de un tanque cerrado (FAO, 2.002).

2.4 Hidroponía

2.4.1 Reseña Histórica.

Los inicios de la Hidroponía como técnica se remontan a la antigua China, Egipto e India. Se sabe que desde el principio del siglo XVII, varios estudiosos procuraban determinar cómo hacían las plantas para obtener los nutrientes necesarios para su crecimiento, pero tuvieron que pasar más de 100 años para que lograran hacerlo, de la mano de John Woodward, miembro de la Sociedad Real de Inglaterra, que en 1.699 inició sus experimentos a fin de determinar si era el agua o las partículas del suelo las que nutrían a las plantas. Posteriormente, en 1.860, los alemanes Sachs y Knop fueron los primeros en hacer crecer las plantas en una solución nutritiva, llamando al proceso "nutriculture". En poco tiempo, muchos científicos, en diversos países, comenzaron a utilizar esta nueva técnica en sus laboratorios (Gilsanzs, 2.007, p. 9; Douglas, 1.987).

Los esfuerzos continuaron hasta que, en 1.929, el profesor William F. Gericke, de la Universidad de California, transformó lo que era un principio de hacer crecer plantas en ausencia de tierra, dentro de laboratorios, en una técnica de uso extensivo, esparciéndose en Estados Unidos y Europa, al punto de ser empleada durante la segunda guerra mundial, para proveer de vegetales y frutas frescas a las tropas en conflicto (Gilsanzs, 2.007, p. 9).

2.4.2 Concepto.

El término Hidroponía deriva de dos palabras griegas: *hydro*, agua, y *ponos*, trabajo.

La combinación de estas dos palabras significa ‘trabajar con el agua’, e implícitamente, el uso de soluciones de abonos químicos para cultivar plantas sin tierra (Douglas, 1.987).

La hidroponía es el cultivo de plantas en soluciones acuosas, aunque también involucra a todas aquellas formas en que se cultivan plantas con algún soporte orgánico o inorgánico, inertes o no inertes (arena, grava, carbón, perlita, lana de roca, etc.), es decir, con tasa variable de aportes a la nutrición mineral de las plantas, sin el uso de suelo, en donde son alimentadas mediante una solución de nutrientes minerales (sales minerales) que se les suministra por medio del agua. Por tanto, se opone a la agricultura tradicional, que utiliza la tierra (Oasis Easy Plant, s.f.).

2.4.3 Crecimiento de las Plantas.

Con respecto al crecimiento de las plantas, James Sholto Douglas (1.987) expresa lo siguiente:

Para garantizar un crecimiento satisfactorio, todas las plantas superiores o verdes, requieren de ciertas condiciones esenciales: agua, luz, aire, sales minerales y sustentación para las raíces. Al contrario de lo que sucede con los animales y los seres humanos, la mayoría de las plantas no consigue ingerir elementos sólidos u orgánicos. Por ende, son obligadas a absorber partes de esos nutrientes en forma de gases retirados del aire atmosférico, y parte de las soluciones de sales inorgánicas y sustancias químicas disueltas en agua. Esas sustancias simples son transformadas por varios órganos de las plantas, en tejidos vivos. Esa transformación es hecha con la energía proveniente de la luz del sol. Una cierta cantidad de oxígeno es necesaria para la realización de estos procesos, aunque la mayor contribución para el crecimiento y desarrollo está dada por el gas conocido como dióxido de carbono, también presente en el aire atmosférico. Las sales minerales son absorbidas, juntamente con el agua, por medio de finísimos y

microscópicos pelos localizados en las raíces de las plantas. Esta absorción es hecha con la participación de una fuerza conocida como ósmosis.

Las plantas siempre crecen para arriba, en dirección a la luz. Para que queden firmes, es fundamental que haya alguna forma de sustentación. Para las plantas que crecen en el suelo, esta sustentación es proporcionada por la tierra, pero en cultivos hidropónicos, es necesario providenciar otra alternativa en forma de mecanismos o medio de sustentación. La elección correcta de éste es muy importante, especialmente porque las raíces de las plantas necesitan respirar tanto como las hojas y las ramas. Además, debe haber humedad suficiente en torno a las raíces, para evitar que se sequen y mueran por falta de agua y nutrientes.

2.4.4 Ventajas y Desventajas.

Juan Gilsanzs (2.007), en cuanto a ventajas y desventajas, nombra las siguientes:

Ventajas.

- Menor número de horas de trabajo y más livianas.
- No es necesaria la rotación de cultivos.
- No existe la competencia por nutrientes.
- Las raíces se desarrollan en mejores condiciones de crecimiento.
- Mínima pérdida de agua.
- Mínimo problema con las malezas.
- Reducción en aplicación de agroquímicos.
- El Sistema se ajusta a áreas de producción no tradicionales.

Desventajas.

- Inversión inicial elevada.

- Se requieren conocimientos de fisiología y nutrición.
- Desbalances nutricionales causan inmediato efecto en el cultivo.
- Se requiere agua de buena calidad.

2.4.5 Sistemas Utilizados en la Hidroponía.

Sistema flotante.

Esta es la forma más sencilla de implementar la técnica de la hidroponía, y también la más económica. Aquí se emplean recipientes donde las plantas permanecen flotando en la solución nutritiva gracias a unas planchas de espuma, de forma tal que las raíces, a medida que vayan desarrollándose, estén en contacto con ella y puedan captar los nutrientes. Esta solución debe ser renovada como mínimo de forma semanal, ya que tiende a contaminarse por la formación de algas en la espuma, estimuladas por la luz que ésta recibe (Gilsanzs, 2.007, p.17).

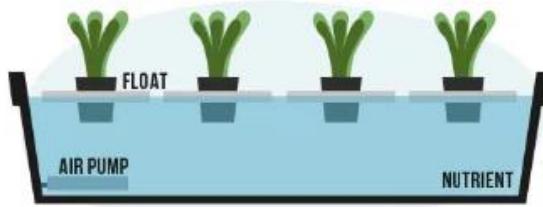


Figura 3 - Representación de un sistema flotante para hidroponía.
Extraído de: <https://www.hydroponics.name/hydroponics-systems/deep-water-culture-system/>

Sistema NFT (Nutrient Flow Technique).

Este sistema funciona básicamente gracias al flujo de la solución nutritiva a través de caños instalados de forma horizontal, y que presentan orificios en la parte superior, dentro de los cuales las plantas crecen. Aquí, la solución nutritiva es almacenada dentro de un tanque, para luego ser distribuida por las cañerías, llegando así hasta cada una de las plantas mediante la circulación continua del líquido (Gilsanzs, 2.007, p.17).

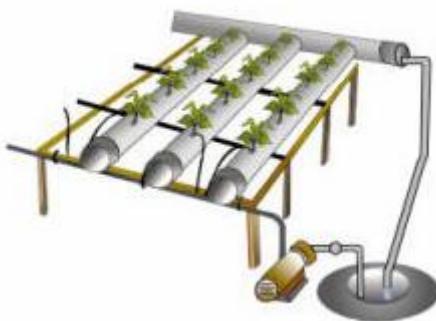


Figura 4 - Representación de un sistema NFT para hidroponía.

Extraído de: https://www.diyhydroponics.com/#!_hydroponic-ebooks-and-plans/dama-hydroponic-ebook

Sistema DFT (Deep Flow Technique).

Este sistema emplea un principio similar a la técnica NFT, de hacer circular continuamente la solución nutritiva para alimentar a las plantas, pero en vez de que éstas se desarrollos dentro de caños, se utilizan unos recipientes conectados entre sí, donde permanecen flotando, al igual que el sistema flotante, convirtiéndose en un sistema híbrido entre los dos (Gilsanzs, 2.007, p.21).

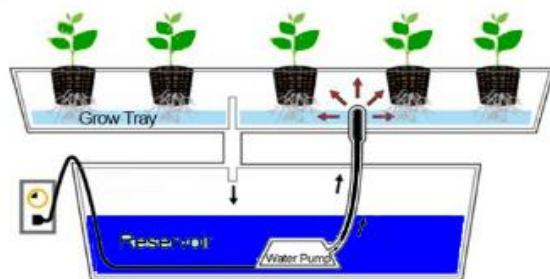


Figura 5 - Representación de un sistema DFT para hidroponía.

Extraído de: <https://www.hidropunklampung.blogspot.com.br/2017/05/hidropunk-sistem-deep-flow-technique.html>

Sistema NGS (New Growing System).

Este sistema funciona a través del uso de películas plásticas dispuestas en varias capas, funcionando de forma específica. La solución nutritiva hidrata las raíces de las plantas en los primeros niveles, los excedentes descienden a través de otras películas plásticas inferiores para colectarse en el depósito, y volver a circular. Con este sistema se logra gran control y optimización del agua y de nutrientes (Oasis Easy Plant, s.f, p.26).



Figura 6 - Representación de un sistema NGS para hidroponía.

Extraído de: <https://www.ngsystem.com/en/ngs/multibanda>

2.4.6 Solución nutritiva.

Con respecto a la nutrición de las plantas, Oasis Easy Plant (s.f) hace hincapié sobre la necesidad de formular una solución nutritiva balanceada y equilibrada, a partir de un análisis del agua, la especie vegetativa a cultivar, su etapa fenológica y las condiciones ambientales que se tengan, y para asegurar resultados satisfactorios afirma que se deben controlar los siguientes factores:

- Calidad del agua: todas las fuentes de agua naturales contienen impurezas, algunas benéficas para el crecimiento de las plantas, y otras perjudiciales; si se pretende iniciar un proyecto de hidroponía de tamaño comercial, se debe hacer un análisis químico del agua que se vaya a usar como fuente para evitar posibles problemas nutricionales.
- Temperatura de la solución: es muy importante para la mayoría de cultivos, ya que, si no se encuentra en su temperatura ideal, la planta detendrá su crecimiento y en algunos casos, se puede manifestar deficiencias nutrimentales. De manera general, la temperatura de las raíces no debe bajar de 13°C ni estar sobre los 30°C, pero puede variar dependiendo del cultivo el rango; por ejemplo, la lechuga crece mejor a temperaturas radiculares más bajas de ese rango, mientras que el pepino crece mejor a temperaturas radiculares más altas.
- Oxigenación: En la zona radicular se debe tener muy buena oxigenación, ya que los pelos radiculares requieren oxígeno (O_2) para realizar sus procesos fisiológicos. En los cultivos en solución, se menciona por algunos autores como Ellis y Swaney que el nivel adecuado en la solución nutritiva debe ser entre las 5 a 8 ppm a una temperatura de 15.5 °C de la solución.
- pH: El rango que debe manejarse es de 5.5 a 6, aunque algunos autores lo manejan hasta 6.5. Si el pH se encuentra por debajo o por arriba de este rango algunos elementos

reaccionan y forman compuestos insolubles que posteriormente son precipitados y depositados en el fondo. Por lo que, en la preparación de las soluciones nutritivas, inicialmente se debe acondicionar el pH en el rango adecuado para favorecer la mejor disolución de los fertilizantes usados como fuentes. De igual manera se sugiere determinar el pH cada 4 u 8 días y corregirlo en consecuencia.

- Conductividad eléctrica (CE): es una medida indirecta de cuantificar la concentración de aniones (nitratos, fosfatos sulfatos, etc.) o cationes (potasio, calcio, magnesio, etc.); en otras palabras, es una medida aproximada para saber si se está aplicando la cantidad suficiente de nutrientes en la solución y si nuestro cultivo los está asimilando. Para esto, se debe medir la CE en los difusores de la solución nutritiva (entrada) y en el drenaje (salida). Una CE adecuada estará en regla, cuando la diferencia entre ambas sea de una unidad, es decir, que la CE de la salida sea mayor que la de entrada. La CE ideal para cada cultivo puede variar significativamente dependiendo de la especie cultivada y etapa fenológica del mismo, por ejemplo, para tomate en plántula, la CE ideal debe estar entre 1 a 1.5 dS/m (decisiemens por metro), mientras que para la etapa vegetativo-reproductivo, debe estar entre 1.5 a 3.5 dS/m.
- Control del volumen de la solución: El fenómeno de evapotranspiración ocasiona que las plantas tomen proporcionalmente mucha más agua que elementos nutritivos de la solución nutritiva, haciendo que con el paso del tiempo se vaya haciendo más concentrada, lo que hace que progresivamente incremente el pH y la presión osmótica de la solución dificultando con esto la absorción de agua por las raíces. Generalmente las soluciones nutritivas se elaboran con un rango de 0.5 a 2 atmósferas. Si la concentración de sales es muy alta, el crecimiento de las plantas se detiene e incluso pueden morir por desecación al salir agua de la raíz. Para mantener la presión osmótica adecuada y los niveles correctos de nutrientes en la solución basta restituir

periódicamente el agua perdida por la evapotranspiración, esto puede hacerse semanalmente y renovarse periódicamente. La solución que se desecha puede usarse para regar y fertilizar plantas del jardín. El uso de solución nutritiva por tiempo indefinido solo se realiza en unidades de producción comercial con un control de la concentración y el monitoreo adecuado de acumulación de ciertos iones para no tener problemas de toxicidad.

Seguidamente se presenta tabla con los minerales esenciales más usados en estos sistemas.

Tabla 1 - Elementos minerales esenciales para las plantas

Elemento mineral	Símbolo químico	Peso atómico
MACRONUTRIENTES		
Nitrógeno	N	14
Fósforo	P	31
Potasio	K	39
Calcio	Ca	40
Magnesio	Mg	24
Azufre	S	32
MICRONUTRIENTES		
Hierro	Fe	56
Manganoso	Mn	55
Zinc	Zn	65,5
Boro	B	11
Cobre	Cu	64
Molibdeno	Mo	96
Cloro	Cl	35,5

Nota. Recuperado del Manual Técnico “La empresa hidropónica de mediana escala: la técnica de la solución nutritiva recirculante (NFT)”, por Carrasco, G. e Izquierdo, J. Copyright 1.996 por la FAO. Reproducido con autorización para fines no comerciales o lucrativos.

3 - Conceptos Referentes a las Tecnologías de Información y Comunicación

En este capítulo se estudian los diferentes conceptos relacionados a las WSANs, sus características principales, topología, estándares y protocolos que se aplican, plataformas disponibles y sistemas operativos compatibles, así como también sus funciones y principales aplicaciones en el campo de la agricultura, evaluando los beneficios que el uso de esta tecnología puede aportar a esta área.

3.1 Internet de las Cosas

La visión principal de la IoT, es la creación de un mundo inteligente, donde lo real y lo digital se unen mediante el uso de las tecnologías de la comunicación, dispositivos embebidos, redes de sensores y diversos protocolos de internet, para crear un entorno inteligente. Hoy en día juega un papel fundamental en los campos de la medicina, ciudades, agricultura, seguridad, asistencia sanitaria, logística, educación, entre otros. Tiene como objetivo interconectar las redes inteligentes en cualquier lugar, con cualquier cosa y por cualquier persona, a través de una ruta, red o cualquier servicio. Para poder lograr esto, es necesario contar con las tecnologías citadas anteriormente para la identificación, posicionamiento y respuesta ante situaciones básicas o en ciertas áreas que serían inaccesibles sin la tecnología de los sensores (Liñán, Vives, Bagula, Zennaro y Pietrosemoli, 2.015, p.2).

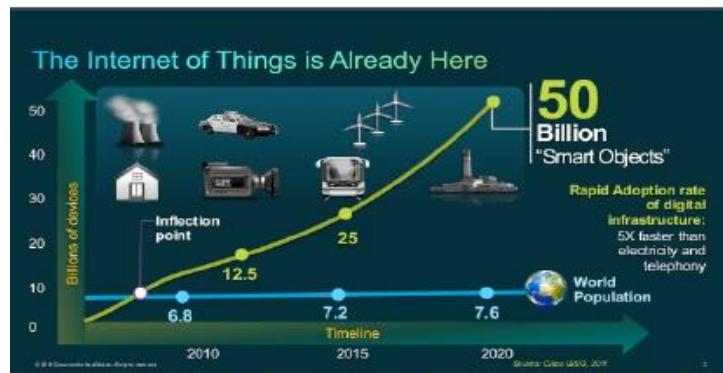


Figura 7 - Previsión del aumento de los dispositivos conectados a la Internet.

Fuente: Cisco, s.f.

Estos objetos inteligentes pueden ser globalmente identificados, interpellados, y al mismo tiempo pueden descubrir e interactuar con entidades externas a través de seres humanos, computadores u otros objetos inteligentes. Los objetos inteligentes, a su vez, pueden adquirir inteligencia por medio de la toma o habilitación de decisiones relacionadas con el entorno, y aprovechar los canales de comunicación disponibles para dar información sobre sí mismos, a la vez que acceden a la información acumulada por otros objetos inteligentes.

En el año 2.020, 50 miles de millones de dispositivos inteligentes estarán interconectados, cuando la población sea de 7,6 miles de millones de habitantes (Fig. 7). Como sugiere la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, del inglés *International Telecommunication Union*), esta estructura fundamental se construirá alrededor de una arquitectura multicapas en la cual los objetos inteligentes se usarán para prestar diferentes servicios a través de las cuatro capas principales representadas en la Fig. 8: una capa del dispositivo, una capa de red, una capa de soporte y una de aplicación (Liñán et al., 2.015, p.2).

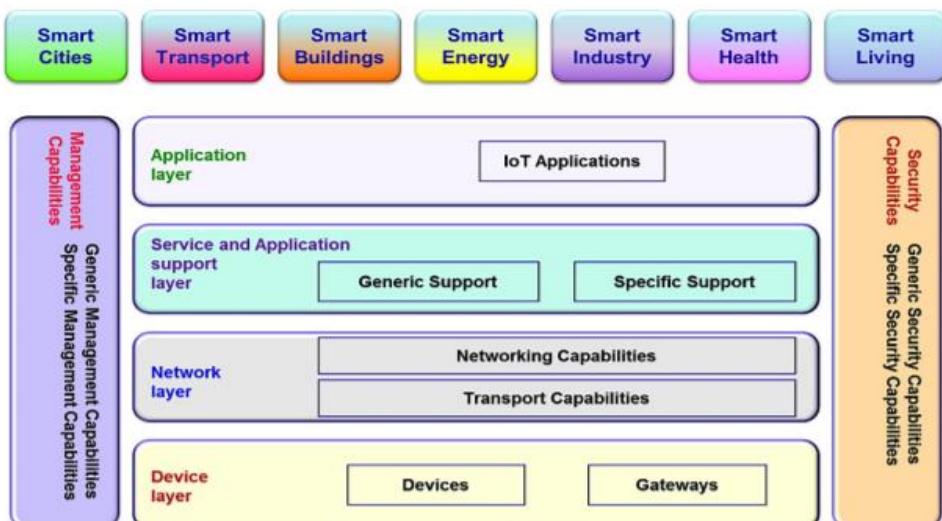


Figura 8 - Arquitectura de capas de la IoT.

Fuente: ITU, s.f.

3.2 Red Inalámbrica de Sensores y Actuadores

3.2.1 Concepto.

En cuanto al concepto, Melodia, Pompili, Gungor, y Akyildiz (2.007) afirma lo siguiente:

La WSAN es un sistema distribuido de nodos sensores y nodos de accionamiento que están interconectados a través de enlaces inalámbricos. Los sensores recogen información sobre el mundo físico, por ejemplo, el medio ambiente o los sistemas físicos, y transmiten los datos recogidos a controladores/actuadores a través de las comunicaciones de *single-hop* (salto único) o *multi-hop* (saltos múltiples). A partir de la información recibida, los controladores/actuadores realizan acciones para cambiar el comportamiento del medio ambiente o sistemas físicos. De esta manera, las interacciones con el mundo físico se facilitan. Dependiendo del tipo de la aplicación de destino, los nodos de una WSAN pueden ser fijos o móviles. En muchas situaciones, sin embargo, los nodos sensores son estacionarios, mientras que los nodos del actuador, por ejemplo, robots móviles y vehículos aéreos no tripulados, son móviles. Los nodos sensores son generalmente de bajo costo y bajo consumo de energía; son pequeños dispositivos compuestos por sensores, que se dedican al procesamiento de datos, mientras que los nodos de actuadores suelen tener más poder de cómputo y de comunicación, y más presupuesto energético, que permite mayor duración de batería. (p.1116)



Figura 9 - Representación esquemática de una red inalámbrica en invernaderos.

Extraído de:

https://www.researchgate.net/publication/288040808_A_climate_control_methodology_based_on_wireless_sensor_networks_in_greenhouses

Es uno de los temas más nuevos de investigación en la actualidad. Los últimos avances en ciencia e ingeniería encontraron la manera de emplear redes inalámbricas de sensores de

bajo consumo y bajo costo, que proveen una solución efectiva para un creciente número de aplicaciones, como la protección de infraestructura y seguridad, la vigilancia, cuidado de la salud, seguridad alimentaria y energía inteligente (Hu y Cao, 2.010).

La red inalámbrica está constituida por dispositivos autónomos, que incorporan la capacidad de comunicación utilizando ondas de radiofrecuencia. Están igualmente distribuidos utilizando sensores capaces de leer las condiciones físicas o ambientales, tales como temperatura, sonido, vibración, presión, movimientos o contaminantes, en varios lugares diferentes, para luego enviar estos valores a una central, para procesarla y convertirla en información útil (Maya, 2.014, p.9; Römer y Mattern, 2.004).

3.2.2 Características.

Una WSAN se considera como una herramienta potencial para la automatización en la agricultura, ya que la misma puede recolectar la información solicitada, y junto con actuadores, reaccionar ante las distintas situaciones. Para ello, debe contar básicamente con las características que se especifican a continuación.

- Capacidad para la toma de decisiones: el sistema debe poder ejecutarse sin alguna intervención humana durante un largo periodo, debido a que los nodos podrían ser desplegados en zonas de difícil acceso (Keshtgari y Deljoo, 2.012). Así, múltiples nodos sensores colaboran entre ellos para tomar decisiones (Ojha, Misra y Raghuwanshi, 2.015).
- Tamaño compacto: un nodo sensor debe ser de pequeño tamaño y poco peso, y debe prescindir del uso de cables, asegurando la portabilidad para el despliegue a larga escala de forma sencilla.

- Configuración dinámica: la topología de la red no debe ser fija. Los nodos pueden ser desplegados arbitrariamente y adaptados según las necesidades; cada uno de ellos debe mantenerse inactivo la mayor parte del tiempo, a fin de ahorrar energía y extender lo máximo posible el tiempo de operación de la red. Los nodos deben colaborar entre sí para determinar el mínimo número que debe permanecer activo (Ojha et al., 2.015).
- Tolerancia de fallas: un desafío que se presenta en el despliegue de una WSAN es el hecho de que los nodos son propensos a fallas (Younis, Senturk, Akkaya, Lee y Senel, 2.014), que afectan el rendimiento de la red. Sin embargo, los nodos pueden autoorganizarse configurando dinámicamente la topología de red (Misra, Kumar y Obaidat, 2.011).
- Escalabilidad y adaptabilidad: toda red escalable debe poder aumentar el número de nodos, sin que ésto implique una disminución considerable de la funcionalidad o el rendimiento.
- Acceso remoto: se debe poder acceder a la información en tiempo real a distancia, de modo a que el usuario final la analice y tome decisiones en caso de necesidad, sin importar su ubicación.

3.2.3 Componentes de una WSAN.

Un sistema de monitoreo basado en tecnología WSAN debe estar compuesto de los siguientes elementos: nodos sensores, nodos sumideros, estación base y actuadores. La Fig. 10 representa un despliegue típico de una red inalámbrica de sensores y actuadores.

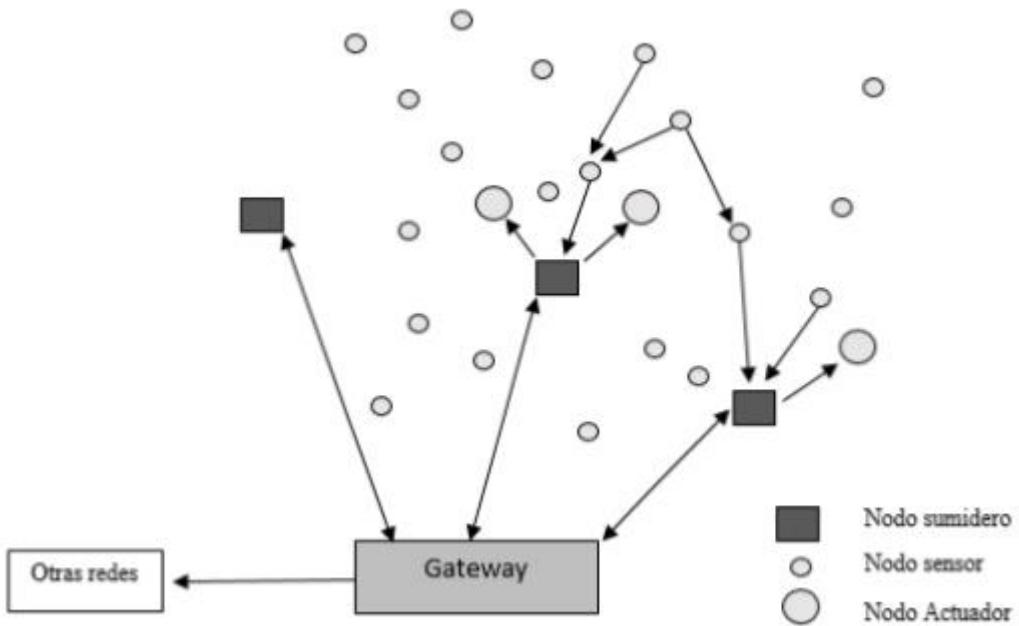


Figura 10 - Arquitectura de referencia de una WSAN.
Fuente propia.

Nodos Sensores.

Representan la unidad básica de una WSAN; se encargan de leer la información del medio físico: los valores de las variables ambientales y del suelo; y transportarla hasta el nodo sumidero. Cada nodo, aparte de enviar su propia información, reenvía los paquetes de datos enviados por otros nodos. La Fig. 11 representa un esquema de los componentes más importantes de un nodo sensor.

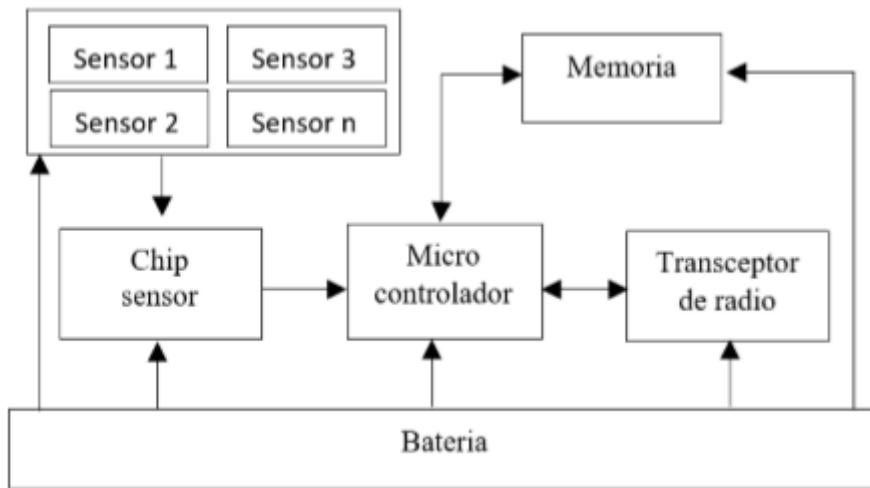


Figura 11 - Diagrama de bloques de un nodo sensor.
Fuente propia.

Todo nodo sensor está compuesto por cinco elementos que se describen a continuación:

- Microprocesador: su tarea es procesar la información local y la registrada por otros dispositivos. puede operar en tres modos: el primero, de modo *sleep* (dormido), para poder ahorrar energía cuando no ocurre una operación; el segundo, de modo inactivo, cuando sólo se esperan datos de otros nodos; y el tercero, de modo activo, cuando se envían y reciben datos.
- Batería: las motas se despliegan en ambientes variados y poseen poca capacidad de almacenamiento de energía, por tanto, éstas deben contar con mecanismos que aumenten la vida útil de la batería, o bien, fuentes alternativas de alimentación, como los paneles solares.
- Memoria: se utiliza para almacenar instrucciones ejecutadas por el microprocesador y datos del nodo sensor.
- Transceptor de radiofrecuencia: es el radio inalámbrico de baja velocidad y poca cobertura. La actividad de la radiocomunicación es la que más consume energía (Liñán et al., 2.015).

- Sensores: son objetos encargados de detectar magnitudes físicas y químicas, para luego convertirlas en variables eléctricas.

Nodo Sumidero.

También llamado de concentrador o servidor. Es el responsable de la recolección de los datos transmitidos por los nodos sensores, para luego enviarlos a la estación base.

Estación Base.

Es la que recibe la información desde el nodo sumidero, y envía a través del mismo, comandos a los actuadores.

Nodos Actuadores.

Son nodos que tienen la capacidad de recibir comandos desde la estación base, interpretarlos y generar una acción correspondiente. Por ejemplo, controlar un sistema de dosificación en base a la calidad de la sustancia nutritiva.

Para la aplicación de un nodo actuador sobre un proceso de control, es fundamental que el intervalo de tiempo que transcurre entre, el momento en que el nodo sensor detecta un evento, hasta el momento en que el nodo actuador recibe una alerta del servidor para ejecutar una tarea, sea menor que el intervalo de tiempo que demora el proceso en ejecutarse, a fin de lograr un efectivo control sobre dicho proceso.

En el área de redes de comunicación, el intervalo mencionado es conocido como latencia, y su importancia radica en el hecho de que, para ejecutar controles en lazo cerrado, este intervalo correspondería al intervalo requerido para la realimentación del sistema de control.

Los nodos actuadores tienen los mismos componentes que los nodos sensores, con la diferencia de que son asociados a módulos de relés, a los cuales, actuadores son acoplados de forma externa, sean éstos bombas, ventiladores, etc., para poder realizar las tareas necesarias en base a la información recibida. La Fig. 12 representa un esquema de los componentes más importantes de un nodo actuador.

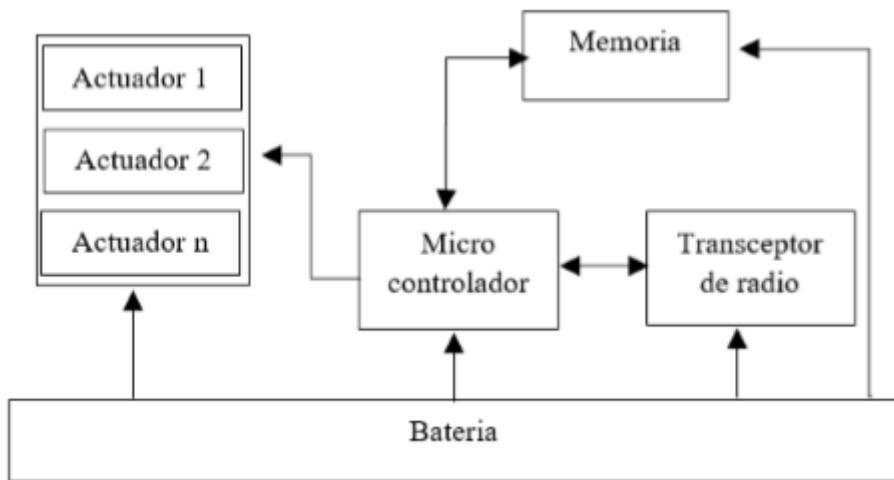


Figura 12 - Diagrama de bloques de un nodo actuador.
Fuente propia.

3.2.4 Tipos de Sensores Aplicados en Invernaderos Hidropónicos.

- Sensor de temperatura: tanto del aire como del agua; se aplican a la hora de determinar la necesidad de climatizar el invernadero, o regular la temperatura del tanque de nutrientes.

- Sensor de luminosidad: permite determinar la necesidad de usar una fuente de iluminación artificial en el interior del invernadero, cuando la radiación solar incidente resulta no suficiente.
- Sensor de humedad relativa: determina la concentración de agua presente en el aire, para determinar la necesidad del uso de procesos de humidificación o deshumidificación.
- Sensor de conductividad eléctrica: determina la capacidad que presenta la sustancia nutritiva para conducir electricidad, lo que, a su vez, dependiendo del resultado de la lectura, puede indicar un desbalance de nutrientes o la presencia de agentes contaminantes.
- Sensor de pH: permite determinar la acidez de la sustancia, que influye en la capacidad de absorción de los nutrientes, para determinar la necesidad de renovar la solución nutritiva.
- Sensor de nivel de dióxido de carbono (CO_2): usado en vista de que este compuesto actúa también como nutriente de la planta, por lo que puede ayudar a mantener una concentración del mismo dentro del invernadero asociado, a procesos de enriquecimiento de CO_2 en el aire.
- Sensor de nivel de agua: usado para determinar la necesidad de recargar el reservorio; comúnmente está asociado a un sistema de bombeo para ello.

3.2.5 Topologías de Red WSAN.

La topología de red se refiere a la configuración de los componentes *hardware*, y cómo los datos son transmitidos a través de esa configuración. Permite que los datos recolectados de

los sensores elijan caminos lógicos para que éstos sean transportados, mediante la comunicación inalámbrica, hacia una estación base o hacia otro nodo.

Las topologías que pueden implementarse según Fernández, Ordieres, Martínez, González, Alba, Lostado y Pernía (2.009) y Maya (2.014) son:

- *Pair* (punto a punto): la comunicación es más sencilla por ser nodo a nodo; pero uno debe ser coordinador para establecer la comunicación.
- *Star* (estrella): el coordinador se sitúa en el centro y conecta con un círculo los nodos para establecer una comunicación, tomando en cuenta que los nodos finales no se comunican directamente, sino a través del nodo central; éste encaminará los datos según las necesidades entre los dispositivos, permitiendo menor consumo de energía, pero limita la distancia de comunicación.
- *Mesh* (malla): los nodos enrutadores mantienen múltiples trayectorias de comunicación al coordinador; si algún nodo ruteador falla, la red automáticamente enruta los datos a través de una trayectoria diferente. Los dispositivos finales pueden adjuntarse a cualquier enrutador o al coordinador. La topología de malla, aunque es muy confiable, sufre de incremento de latencia de red, ya que los datos deben dar múltiples saltos antes de llegar al coordinador.
- *Cluster tree* (árbol): cada nodo mantiene una sola trayectoria de comunicación directa al coordinador, pero puede usar otros nodos para enrutar sus datos a esa trayectoria. Esta topología presenta el problema de que, si el nodo ruteador falla, todos los nodos que dependen de éste también pierden sus trayectorias de comunicación con el coordinador.

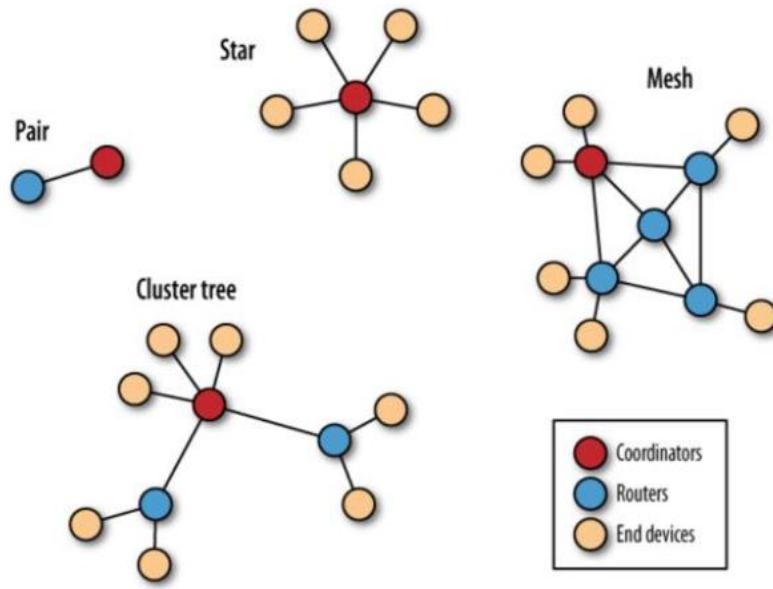


Figura 13 - Tipos de topologías para redes inalámbricas.
Extraído de <https://www.internetdecosas.es/arduino/arduino-xbee/attachment/red-xbee>

3.2.6 Aplicaciones.

Las potenciales aplicaciones han hecho de las WSAN un área con capacidad de crecimiento elevada, considerando que lo que empezó en el 2.002 como una investigación, poco a poco fue creando un espacio en el mercado a tal punto de que, hoy en día, esta tecnología está presente en una diversidad de aplicaciones (Fernández et al., 2.009), exemplificando a continuación algunas de ellas:

- Industria automovilística: donde pueden implementarse como herramienta de asistencia para el conductor con relación a las características del lugar en el que está transitando, en forma de reportes de posibles congestionamientos o factores de riesgo de la pista.
- Domótica: donde pueden encargarse de la monitorización de factores como la temperatura y la iluminación, para regular los procesos que intervienen en el acondicionamiento de éstos.

- Vigilancia ambiental: donde pueden ser de ayuda, por ejemplo, para la detección temprana de incendios forestales.
- Control de procesos industriales: siendo común el uso de sensores en el ámbito industrial, éstos, en conjunto con redes de comunicación, pueden facilitar en el monitoreo de plantas de tratamiento de agua potable, por ejemplo, ayudando a controlar los procesos para la calidad de la misma.
- Seguridad y vigilancia: pudiendo ser usadas como herramientas para detección de movimiento en zonas de acceso restringido.
- Agricultura: donde pueden permitir un diagnóstico casi completo de las condiciones de los cultivos a fin de intervenir en procesos de riego, por ejemplo.

3.3 Protocolo IPV6

3.3.1 Concepto.

El IPv6 es la sexta versión del protocolo de Internet (IPV6, del inglés *Internet Protocol version 6*), de la nueva generación. Aquí la cabecera posee 128 bits por cada dirección, a diferencia de la IPv4 que posee 32 bits, lo cual significa que permite el uso de 2^{128} direcciones (aproximadamente 3.4×10^{38} direcciones), en contraste con el IPv4 que solo permite 2^{32} direcciones.

A fin de interpretar mejor la forma de trabajo de este protocolo, es conveniente comprender la distribución por capas de la pila de protocolos de control de la transmisión y de Internet (TCP/IP, del inglés *Transmission Control Protocol / Internet Protocol*). Se definen las siguientes capas:

- Capa física (capa 1): transmite la información al medio, recibe mensajes y convierte los bits en señales; es la capa de más bajo nivel.
- Capa de enlace (capa 2): organiza en grupos de bytes, los datos enviados desde la capa de red de una LAN (*Local Area Network*, Red de Área Local) (Liñán et al., 2.015).
- Capa de red (capa 3): se encarga de entregar los datos recibidos de la capa de transporte a la capa de destino, así como la recepción de datos de la capa de enlace (capa 2) (Liñán et al., 2.015).
- Capa de transporte (capa 4): crean conexión entre el emisor y receptor, para luego unirse al llegar al receptor. Los protocolos más usados son los UDP (*User Datagram Protocol*) y TCP (*Transmission Control Protocol*) (Cazar y Abad, 2.014).
- Capa de aplicación (capa 5): es la capa superior, posee protocolos de red para la comunicación a través de capas de bajo nivel; ofrece servicios y correo (Cazar y Abad, 2.014).

En la Fig. 14 se observa una comparación entre las distintas capas de las pilas de protocolos de los modelos de interconexión de sistemas abiertos (OSI, del inglés *Open Interconnection System*) y TCP/IP. El protocolo IPv6 se encuentra en la capa 3 del modelo TCP/IP, llamada capa de red. Los datos en esta capa son llamados de paquetes (Liñán et al., 2.015).

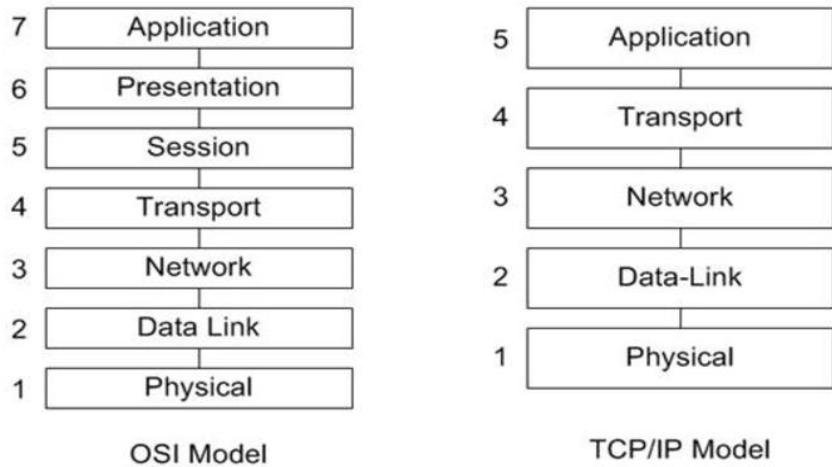


Figura 14 - Modelo OSI versus Modelo TCP/IP.

Extraído de: <https://www.tamos.net/~rhay/overhead/ip-packet-overhead.htm>

3.3.2 Direcccionamiento IPv6.

Según Dos Santos, Moreiras, Reis y Da Rocha (2.010), en el protocolo IPv6, la dirección se divide en ocho grupos de 16 bits, y están separados mediante “:” (dos puntos), escritos con dígitos hexadecimales (0-F). Como ejemplo:

2001:0DB8:AD1F:25E2:CADE:CAFE:F0CA:84C1

Se permite utilizar tanto caracteres en mayúscula como en minúscula. Las direcciones IPv6 se representan con los prefijos de red, es decir, con el tamaño del prefijo, que es un valor decimal que especifica la cantidad de bits de la dirección. Como ejemplo:

Prefijo 2001:db8:3003:2::/64

En IPv6 se han definido tres tipos de direcciones: unicast, anycast y multicast; aquí ya no existe la dirección broadcast.

- Unicast: El paquete enviado se entrega a una única interfaz identificada por esa dirección.
- Anycast: el paquete enviado se entrega a una interfaz, de múltiples interfaces, la que se encuentra más próxima al origen.
- Multicast: el paquete enviado se entrega a todas las interfaces asociadas a esa dirección.

3.4 Estándares Utilizados y Tecnología Disponible

Se presentan los estándares y tecnologías más utilizados en diferentes aplicaciones de redes inalámbricas de sensores.

IEEE 802.15.4.

Es un estándar referido por RFC 4944; define las especificaciones de la capa física (PHY) operando en diferentes bandas de frecuencia con una simple y efectiva subcapa de control de acceso al medio (MAC, del inglés *Medium Access Control*), contiene un conjunto de especificaciones recomendadas para operar las WSANs (Bhat, 2.012).

La capa PHY de este estándar opera en frecuencias de 868MHz, 915MHz y 2.4GHz, distribuyéndose ésta última en un total de dieciséis canales (contados del 11 al 26), que cubren específicamente desde los 2405 hasta los 2480 MHz, asignando así un rango de 5MHz a cada canal (Caprile, 2.009).

ZigBee.

Esta tecnología fue desarrollada como un estándar global abierto. Es un conjunto estandarizado de soluciones que pueden ser implementadas por cualquier fabricante. Está basado en el estándar IEEE 802.15.4, teniendo como objetivo las comunicaciones de bajo flujo de datos, por tanto, bajo consumo de energía. Opera en bandas de 2.4 GHz, 900 MHz y 868 MHz [28]. Soporta cortas distancias (10-20 m) y es la preferida para aplicaciones en la agricultura. Típicamente, este estándar requiere pocas especificaciones de *hardware* (como un microcontrolador con 50-60 kb de memoria) e incluye técnicas de encriptación (Ojha et al., 2.015).

GPRS/3G/4G.

El Servicio General de Paquetes vía Radio (GPRS, del inglés *General Packet Radio Service*,) es un servicio de paquetes de datos para teléfonos celulares, en el cual los usuarios pueden acceder directamente a redes de datos públicos usando el protocolo de Internet (IP, del inglés *Internet Protocol*,); con este sistema, es posible establecer comunicaciones punto a punto, o punto a multipunto. La versión más avanzada de este servicio es EDGE (*Enhanced Data rates for Global Evolution*), que ofrece mayor velocidad de datos, sin cambios de *hardware/software* en la red central GSM (*Global System for Mobile communications*). La tercera y cuarta generación de esta tecnología de comunicación móvil se conocen como 3G y 4G (Halonen, Romero y Melero, 2.003; Ojha et al., 2.015).

WiMAX.

Está basada en los estándares de IEEE 802.16. Es el acrónimo de Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (WiMAX, del inglés *Worldwide interoperability for Microwave access*), para la comunicación inalámbrica entre equipos. Pueden ser de tipos fijo o móvil; el tipo fijo inalámbrico necesita de una antena, es una solución para acceso a internet de banda ancha (internet rural), y funciona a partir de 2.5GHz; el tipo móvil se enfoca hacia el mercado móvil, añadiendo portabilidad (Ibersystems, s.f).

WiFi.

Es un estándar de red inalámbrica de área local (WLAN, del inglés *Wireless Local Area Network*), para el intercambio de información o para conectarse a Internet de forma inalámbrica. Está basada en el estándar de la familia de IEEE 802.11. Actualmente es la tecnología más utilizada. El WiFi provee un rango de comunicación de 20 m en interiores y 100 m al aire libre, con velocidad de transmisión en los órdenes de 2-54 Mbps a 2.4GHz. En la agricultura, amplía el uso de arquitecturas heterogéneas conectando múltiples dispositivos en una red inalámbrica descentralizada (ad-hoc) (Ojha et al., 2.015).

ISA100.11.

La *International Society of Automation* (ISA) desarrolló una red mallada inalámbrica, que garantiza una latencia de comunicación determinística, al tiempo que aumenta la fiabilidad de la comunicación. Está enfocada al control y monitoreo de procesos de aplicaciones, con latencia alrededor de 100ms. Puede coexistir con otras tecnologías inalámbricas como

teléfonos celulares, IEEE 802.11x, IEEE 802.15x, IEEE 802.16x (Costa y Amaral, 2.012; Silva, Guedes, Portugal y Vasques, 2.012).

Bluetooth.

Está basada en el estándar 802.15.1; es una tecnología de bajo consumo, bajo costo usada para la comunicación entre dispositivos y computadoras portables en un rango de 8-10 m. Define la comunicación de la red de área personal (PAN, del inglés *Personal Area Network*) utilizando una frecuencia de 2.4GHz. También existe una versión de bajo costo y ultra bajo consumo de energía, llamada *Bluetooth Low Energy* (BLE); garantiza la robustez y autenticación por su técnica de encriptación (Ojha et al., 2.015).

Wireless HART.

Fue el primer estándar desarrollado para la comunicación inalámbrica para el proceso de control. Cada dispositivo puede actuar como un enrutador de paquetes de datos de otro dispositivo, esto significa que el dispositivo deba comunicarse directamente con el *gateway* (Costa y Amaral, 2.012).

6LoWPAN.

Es el acrónimo de IPv6 sobre Redes Inalámbricas Personales de Área Local de Bajo Consumo (6LoWPAN, del inglés *IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks*); es un conjunto de estándares definidos por la Internet Engineering Task Force (IETF), que permite el uso de IPv6 sobre WSANs de baja potencia; crea y mantiene todos los estándares básicos de internet y las funciones de la arquitectura (Shelby y Bormann, 2.011; Maya, 2.014).

Tabla 2 - Tabla comparativa entre estándares y tecnologías disponibles.

Parámetro	ZigBee	GPRS/3G/4G	WiMAX	WiFi	ISA100.11	Bluetooth	Wireless HART
Estándar	IEEE 802.15.4		IEEE 802.16a,e	IEEE 802.11 a,b,g,n	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.4
Velocidad de transmisión	20-250 kbps	50-100 kbps/200 kbps/0.1-1 Gbps	0.4-1 Gps (estacionario)	2-54 Mbps	250 kbps	1-24 Mbps	250 kbps
Consumo de energía	Bajo	Medio	Medio	Medio	Bajo	Medio	Bajo
Banda de frecuencia	868/915 MHz, 2.4 GHz	865 MHz, 2.4 GHz	2-66 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz

Nota. Fuente propia.

3.5 Plataformas disponibles

Así como fue visto en el apartado 3.2.3, un nodo sensor está compuesto por módulos como: microprocesador, batería, memoria, radio y sensor/actuador. Estas características son propias también de todo dispositivo diseñado para funcionar como nodo dentro de una WSAN, ya sea actuador o sumidero. Sus diseños requieren de muchas consideraciones como la conservación de energía, tamaño, escalabilidad etc. (Abbasi, Islam y Shaikh, 2.014).

A continuación, se presentan algunas plataformas para redes inalámbricas de sensores, disponibles comercialmente.

MICAZ/Mica2.

Estas motas son de la segunda y tercera generación de la tecnología CrossBow. Usan el microcontrolador ATmega128L con módulos de radiofrecuencia CC2420/CC1000. Son utilizadas dos pilas AA como alimentación. Están equipadas por sensores de humedad,

temperatura y luminosidad. Son capaces también de medir la presión barométrica, aceleración, y actividad sísmica (Narayanan, 2.016).



Figura 15 - Plataforma MICAz.
Fuente: CrossBow, s.f.

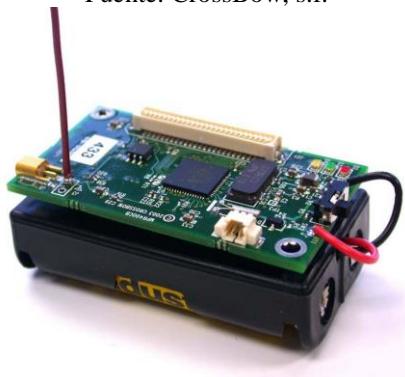


Figura 16 - Plataforma Mica2.
Fuente: CrossBow, s.f.

TelosB.

También conocido como Tmote Sky, usa el microcontrolador MSP430F1611. Al igual que el MICAz, posee un transceptor de radio CC2420. Posee sensores de humedad, temperatura y luminosidad en la propia mota, lo cual permite medir estas variables sin necesidad de utilizar una placa de expansión. Es compatible con sistemas operativos como Contiki y TinyOs (Navarro, 2.011).



Figura 17 - Plataforma TelosB.
Fuente: AdvanticSys, s.f.

IRIS.

Usa el microcontrolador ATmega1281, de bajo consumo, y transceptor de radio Atmel RF230. Posee sensores de luminosidad, temperatura, humedad relativa, presión barométrica, entre otros (Memsic, s.f.).



Figura 18 - Plataforma IRIS.
Fuente: Memsic, s.f.

Zolertia Z1.

Dispositivo de bajo consumo, dirigido a investigadores y estudiantes. Es compatible con sistemas operativos TinyOS y Contiki, y con protocolos del estándar IEEE 802.15.4 y Zigbee, visando así mayor flexibilidad *hardware*. Posee el microcontrolador MSP430 y el transceptor de radio CC2420, de Texas Instruments, lo que le hace compatible con motas

basadas en la misma arquitectura. Posee sensor de temperatura y acelerómetro (Zolertia, 2.010).



Figura 19 - Plataforma Z1.
Fuente: Zolertia, s.f.

Imote2.

Basada en la tecnología de CrossBow. Cuenta con el microprocesador PXA271 Xscale, que incluye un coprocesador MMX inalámbrico, y un transceptor de radio CC2420 de Texas Instrument (**CrossBow, s.f.**).



Figura 20 - Plataforma Imote2.
Fuente: CrossBow, s.f.

Libelium Wasp mote.

Esta mota utiliza un nodo sensor de ultra bajo consumo de energía; puede conectarse a la red a través de IEEE 802.15.4/ ZigBee. Posee el microcontrolador ATmega1281 y memoria RAM de 8KB.



Figura 21 - Plataforma WaspMote.
Fuente: Libelium, s.f.

Tabla 3 - Tabla comparativa de plataformas disponibles comercialmente.

Características	MICAz	Mica2	TelosB	IRIS	Zolertia Z1	Imote2	Wasp mote
Microcontrolador	ATmega128L	ATmega128L	MSP430F1611	ATmega128L	MSP430F2617	Intel PXA271	Atmega 128I
Memoria	EEPROM: 4 K	EEPROM: 4 K	RAM: 10 K EEPROM: 16 K	EEPROM: 4 K RAM: 8 K	EEPROM: 4 K	SRAM: 32 M	SRAM: 8 K EEPROM: 4 K
Memoria flash (bytes)	128 K	128 K	48 K	48 K	92 K	32 M	128 K
Tamaño (mm)	58 x 32 x 7	58 x 32 x 7	65 x 31 x 6	58 x 32 x 7	34.5 x 56.8	36 x 48 x 9	73.5 x 51 x 13
Sensores	Temperatura, RH Barómetro, Presión, Acelerómetro, Acústico, magnetómetro	Luminosidad, temperatura, RH, Barómetro, Acelerómetro, acústico, magnetómetro	Humedad, temperatura, luminosidad	Luminosidad, temperatura, RH, barómetro, presión, acelerómetro, acústico, magnetómetro, video	Temperatura y acelerómetro	Humedad, temperatura, acelerómetro, luminosidad	Acelerómetro
Comunicación serial	UART, digital I/O, I2C, SPI, USB	UART, DIO, I2C, SPI, USB	UART, I2C, SPI, digital I/O, USB	UART, digital I/O, I2C, SPI, USB	I2C, SPI, UART y USB	UART, SPI, USB	UART, I2C, USB, SPI
Chip Transceptor	CC2420	CC100	CC2420	Atmel RF230	CC2420	CC2420	n/a
Frecuencia (MHz)	2400-2483.5	315, 433 o 368/916	2400-2483.5	240-2480	2400-2483.5	2400-2483.5	14,7456
Bateria	2 x AA	2 x AA	2 x AA	2 x AA	2 x AA, batería AAA o 1 x CR2032	3 x AAA	3.3 - 4.2V

Nota. Fuente propia.

3.6 Sistemas Operativos

En cuanto a la elección de un sistema operativo, es necesario considerar que las herramientas de *hardware* destinadas a componer redes inalámbricas de comunicación tienen una capacidad de almacenamiento y procesamiento limitada, debido a la intencional minimización del tamaño de las motas, a fin de que pueden ser ultra portables, así como también un acceso limitado a una fuente de energía (en general, estas motas se alimentan de baterías), por lo que el sistema operativo ideal debe ser capaz de desarrollar eficientemente todos sus procesos visando el ahorro de los recursos mencionados.

El estándar, de facto, en cuanto a sistema operativo es TinyOS, por ser el que menor cantidad de memoria disponible demanda, y ha sido implementado en la mayoría de los nodos sensores disponibles comercialmente, quedando en segundo lugar el sistema operativo Contiki (Escolar, Carretero, Calderón, Marinescu y Bergua, 2.011, p.10).

TinyOS.



Figura 22 - Logo del sistema operativo Tiny.
Extraído de: https://tinyos.stanford.edu/tinyos-wiki/index.php/Main_Page

Es un sistema diseñado especialmente para aplicaciones de sistemas embebidos de tecnología inalámbrica y de baja potencia, escrito en el lenguaje de programación NesC, que

emplea una sintaxis similar al lenguaje C (TinyOS, 2.013). Considerando la extrema limitación de recursos en plataformas WSAN, TinyOS está diseñado para ser un sistema operativo ultra ligero, ocupando menos de 400 bytes de memoria. Posee una serie de características para lograr reducir el consumo de energía, como *split-phase operations* (operaciones de fase dividida () , lo que significa que la solicitud de realizar una operación y la respuesta luego de su finalización no están acopladas (Hu y Cao, 2.010).

TinyOS adopta un modelo de ejecución orientado a eventos mediante *tasks* (tareas). Estos *tasks* no se ejecutan de forma simultánea, sino que lo hacen conforme a un itinerario, donde cada *task* se ejecutará hasta su finalización, para luego pasar al siguiente *task* (Reusing, 2.012).

Contiki.

Contiki

Figura 23 - Logo del sistema operativo Contiki.
Extraído de: <https://www.contiki-os.org/index.html>

Está diseñado como un sistema operativo para conectar microcontroladores de baja potencia y bajo costo a la internet, completamente compatible con los estándares IPv4 e IPv6, así como estándares más recientes de comunicación inalámbrica de baja potencia, como 6LoWPAN. Consta de una arquitectura basada en capas. Las aplicaciones en este sistema operativo se escriben en un lenguaje similar al C, aunque no se pueden usar ciertos comandos, y entre sus principales características, se destaca por proveer de un simulador completo, Cooja, a fin de probar las redes antes de su implementación en *hardware*. Es muy eficiente en cuanto a memoria, ocupando pocos kilobytes de memoria disponible (Contiki, s.f).

Contiki tiene la capacidad de cargar aplicaciones individuales al dispositivo durante la ejecución del propio sistema operativo en él, asemejándose al mecanismo de los computadores de uso general. Por encima del kernel básico orientado a eventos de Contiki, otros modelos de ejecución pueden ser usados. En vez de un simple controlador de eventos, los procesos pueden usar *protothreads*, formas simples de *threads* (hilos) normales, en un entorno *multithread*. Los *protothread* no poseen *stacks* (pilas), por lo que deben almacenar su información de estado en la memoria asignada al proceso (Milinković, Milinković, y Lazić, 2.015).

RIOT.



Figura 24 - Logo del sistema operativo RIOT.
Extraído de: <https://riot-os.org/>

Siguiendo las mismas líneas que los anteriores, RIOT está diseñado para cuidar la eficiencia energética de los dispositivos, y ocupar la menor cantidad de memoria posible. Está basado en una arquitectura de microkernel, con soporte para *multithreads*. De forma estandar, incluye soporte para el *stack* TCP/IP; también es compatible con protocolos como 6LoWPAN e IPv6. RIOT permite que los programadores usen lenguajes de programación estandarizados (C y C++), y creen tantos *threads* como sean necesarios, siendo la única restricción la cantidad de memoria disponible y el tamaño del *stack* para cada *thread* (Milinković, Milinković, y Lazić, 2.015).

Linux.



Figura 25 - Logo del sistema operativo Linux.

Extraído de: <https://www.linux.org>

Linux es un sistema operativo robusto, que presenta un entorno amigable para el desarrollador, por lo cual ha ganado atención como aliada para dispositivos que apuntan a la IoT, alcanzando un nivel de madurez que lo ubica como uno de los principales sistemas operativos para sistemas embebidos. Sin embargo, presenta una gran desventaja al ser comparado con otros sistemas operativos, en lo que a impacto en la memoria disponible se refiere; aunque pueden eliminarse herramientas y servicios del sistema que no son requeridos para determinadas aplicaciones, continúa siendo un *software* de gran tamaño. Esta situación hace que sea imposible de correr el sistema operativo en microcontroladores de 8 o 16 bits (ni siquiera en más recientes de 32) debido a que no disponen de suficiente memoria de acceso aleatorio (RAM, del inglés *Random Access Memory*) para el kernel de Linux. Un buen ejemplo es la serie Cortex-M de la ARM, sobre el cual cientos de microcontroladores basan su arquitectura, que típicamente sólo incluyen pocos cientos de kilobytes a bordo; Linux nunca correrá en estos dispositivos (Milinković, Milinković, y Lazić, 2.015, p.504).

Tabla 4 - Características clave de TinyOS, Contiki, RIOT y Linux.

OS	min RAM	min ROM	C support	C++ support
TinyOS	< 1kB	< 4kB	x	x
Contiki	< 2kB	< 30kB	o	x
RIOT	~ 1.5kB	~ 5kB	✓	✓
Linux	~ 1MB	~ 1MB	✓	✓
OS	multi-threading	MCU w/o MMU	modularity	real-time
Tiny OS	o	✓	x	x
Contiki	o	✓	o	o
RIOT	✓	✓	✓	✓
Linux	✓	x	o	o

Se indica con ‘✓’ en caso de soporte total, ‘o’ en caso de soporte medio, y ‘x’ en caso de soporte nulo.

Nota. Recuperado de Milinković, Milinković, y Lazić, 2.015, p.506.

3.7 Simuladores

La simulación es esencial para estudiar las WSANs, ya que proporciona ajustes ambientales exactos para calcular y mejorar los factores de diseño. También proporciona una gran visión sobre los efectos de diferentes factores. Los programas disponibles son mayormente desarrollados en C++ o Java, existen simuladores de código abierto y comercial.

A continuación, se describen los simuladores de código abierto más utilizados:

OMNeT++



Figura 26 - Logo del simulador OMNeT++.

Extraído de: <https://omnetpp.org>

Según Wehrle, Günes y Gross (2.010):

“Es un entorno de simulación con librería, basado en el lenguaje C++ e incluye un entorno gráfico con tiempo de ejecución. La funcionalidad de dominio específico (apoyo para la simulación de redes de comunicación, redes de colas, evaluación del desempeño, etc.) es proveído por marcos modelo, desarrollados como proyectos independientes. Posee extensiones para simulaciones en tiempo real, emulación de redes, soporte para lenguajes de programación alternativas (Java, C#), integración de base de datos, integración de SystemC, HLA y diversas otras funciones.” (p. 35).

Fue creado para simular las comunicaciones de redes, y diseñado para ser lo más general posible. Este simulador es utilizado para diversas aplicaciones de redes inalámbricas y descentralizadas (*ad hoc*), desde simulaciones para negocios a redes entre pares (*peer to peer*), entre otros (Wehrle, 2.010, p. 35).

NS-3



Figura 27 - Logo del simulador NS-3.
Extraído de: <https://www.nsnam.org/>

Es un simulador de redes para eventos discretos, apuntando primeramente hacia los trabajos investigativos y educacionales. Está disponible para investigaciones y desarrollos. NS-3 no es la extensión de NS-2, es otro simulador (NS-3, s.f.).

Una de las metas de este simulador es mejorar el realismo de los modelos, para hacerlos lo más parecido posible a la implementación actual de *software*. El NS-3 es desarrollado y distribuido completamente en el lenguaje de programación C++ (Wehrle, 2.010, p. 15).

NetLogo



Figura 28 - Logo del simulador NetLogo.
Extraído de: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

Es un entorno de modelado programable multiagente, que simula fenómenos naturales y sociales. Posee una extensa librería de modelos, una gran colección y simulaciones que sirven como ejemplo y que pueden ser modificadas y usadas. Es usado por estudiantes, profesores e investigadores alrededor del mundo, y es adecuado para modelar sistemas complejos que se desarrollan en el tiempo (NetLogo, s.f.).

CupCarbon



Figura 29 - Logo del simulador CupCarbon.
Extraído de: <https://www.cupcarbon.com>

Es un simulador de redes inalámbricas de sensores para ciudades inteligentes e IoT, su objetivo es diseñar, visualizar, mejorar y validar algoritmos distribuidos para el monitoreo, y crear escenarios como fuego, y gas. No solo puede ayudar a visualizar la red de sensores y cómo ellos trabajan; también podría ayudar a los científicos a probar sus topologías inalámbricas, protocolos, etc (CupCarbon, s.f.).

Contiki

Figura 30 - Logo del sistema operativo Contiki, que proporciona el simulador Cooja.

Extraído de: <https://www.contiki-os.org/index.html>

Es el simulador de redes inalámbricas que se distribuye junto a Contiki, que permite simular motas que ejecuten aplicaciones en este sistema operativo. Varias librerías pueden ser compiladas y cargadas en la misma simulación de Cooja, representando diferentes tipos de nodos sensores (redes heterogéneas). Este simulador informa el sistema para poder manejar eventos o recupera toda la memoria del sistema para el análisis. Este enfoque da al simulador el control total de los sistemas simulados (An introduction to Cooja, 2.016).

4 - Integración de las Tecnologías de Información y Comunicación en la Agricultura

En este capítulo se describe la integración de las tecnologías de la información y comunicación en la agricultura, presentando los conceptos de la iniciativa OpenAg y las *food computers*.

El potencial de las TIC para poder hacer las prácticas agrícolas más ambientalmente sostenibles es prometedor. Recio, Valero y Diezma (2.009) refiere que el uso de las TIC es cada vez más necesario en la agricultura, y sin embargo su uso hasta ahora es limitado, por lo que es necesario el esfuerzo de este sector, junto con la investigación de las escuelas de ingeniería, para proporcionar una formación y desarrollo acordes con las necesidades profesionales.

Las TIC se han convertido en la base de un nuevo tipo de sociedad: la sociedad de la información y del conocimiento. Estas tecnologías, que afectan directamente a la capacidad humana de generación y aplicación económica del conocimiento, hacen de la información un recurso y mercancía de progresiva importancia en todas las actividades económicas (Recio, Valero y Diezma, 2.009, p.1).

4.1 Trabajos Relacionados

La revisión de la literatura disponible muestra varios aportes relacionados a las WSANs en agricultura de precisión en los últimos años.

Primeramente, respecto a trabajos de WSAN aplicados a cultivos en campo abierto, Escolar et. al (2.011) presenta una metodología bastante completa para la instalación de una WSAN, abarcando desde el estudio del campo donde ha de ser instalado, pasando por el diseño de la red, la simulación y la implementación de la misma. En el trabajo se consideran a los nodos MICAz y el protocolo de comunicación ZigBee. En otro trabajo presentado por Maya

(2.014), se propone una WSAN asociada a actuadores para la optimización del riego con fines productivos, debido a la escasez de agua en la Hacienda Cananvalle de la ciudad de Ibarra (Ecuador); empleando el estándar 6LoWPAN y los protocolos UDP y TCP para el desarrollo de la red inalámbrica. En este trabajo se consideran a los nodos TelosB para implementar la red.

Por otro lado, en lo que se refiere a trabajos de agricultura de precisión, se revisaron los siguientes trabajos: Saad, Kamarudin, Kamarudin, Nooriman, Mamduh, Zakaria, Shakaff y Jaafar (2.014), implementa un sistema de monitoreo en tiempo real para un invernadero con un volumen de 2600 m³, para un cultivo de mangos. El sistema cuenta con tres puntos de medición, siendo dos internos y uno externo. El protocolo de comunicación utilizado es el IEEE 802.15.4. Asolkar y Bhadade (2.015) propone un sistema de monitoreo y control para un cultivo de pepinos. Sin embargo, se trata de un solo punto de medición y actuación. Además, como medio de comunicación utilizan la red GSM de telefonía.

Finalmente, Erazo, Rivas, Pérez, Galarza, Bautista, Huerta y Rojo (2.015) desarrolla una red WSAN para un invernadero con cultivo de rosas. Los nodos fueron desarrollados con microcontroladores del fabricante Microchip. La tecnología de comunicación inalámbrica utilizada fue ZigBee. Pruebas fueron realizadas en un invernadero con una superficie de 50 m². El sistema genera alarma en caso de que las mediciones caigan fuera de un rango de operación aceptable, para que el usuario pueda tomar acciones correctivas.

Por lo que se observa en los trabajos de invernaderos, las soluciones vistas presentan una aplicación más orientada a la medición de las variables.

4.2 Iniciativa OpenAg

La iniciativa OpenAg (acrónimo de *Open Agriculture*, agricultura abierta) es impulsada desde el 2.015 por el ingeniero Caleb Harper, como una iniciativa del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) que busca desarrollar plataformas para la agricultura en ambientes controlados, las cuales recibieron el nombre de ‘*food computers*’. Todo el *hardware* y el *software*, así como la información, son abiertos, con la intención de crear una plataforma estandarizada para la investigación y la experimentación agrícola (MacFarland, 2.015).

4.2 Food Computers

Una *food computer*, traduciéndose literalmente como ‘computadora de alimentos’, es una plataforma tecnológica para el control del entorno agrícola, que usa sistemas de automatización para monitorear y controlar el clima y el crecimiento de las plantas dentro de cámaras especiales (casi como unas incubadoras para hortalizas, frutas y vegetales). Variables climáticas como el dióxido de carbono, la temperatura del aire, humedad, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica son algunas de las varias condiciones que pueden ser monitoreadas y controladas dentro de estas cámaras (OpenAg, s.f.). Conectada a la red, la *food computer* puede enviar toda la información recolectada a una base de datos, para que los productores puedan analizar qué cantidad de agua y de luz los cultivos están recibiendo, y usar esa información para manejarlos adecuadamente (Hansman, 2.015).



Figura 31 - Food computer.
Extraído de: <https://www.media.mit.edu/posts/openag-media-kit/>

El origen de esta idea se remonta a los programas espaciales de los '90, cuando la Nasa surgió con una nueva área de estudio, a la que llamó 'aeroponía'. Con esta técnica, se buscaba apoyar a los astronautas para producir alimentos en el espacio, sin disponer de suelo y con un acceso mínimo al agua, en entornos controlados (Siegel, s.f.).

La *food computer* requiere de agua y electricidad para funcionar, por lo que puede ser colocada dentro de cualquier recinto, sea éste una casa o un edificio. Este sistema está dotado, entre otros, de elementos de dosificación, refrigeración e iluminación, para poder proveer de todo lo que cualquier cultivo necesitaría para crecer en el exterior, pero aquí lo hace de manera mucho más higiénica, empleando principios de hidroponía.

Si bien el término de *food computer* hace referencia a todo sistema de la OpenAg que emplee mecanismos para controlar el ambiente, también puede referirse al primer diseño propuesto, que recibió el nombre de “*Personal Food Computer*”, debido a su tamaño compacto. Los de mayor tamaño recibieron el nombre de “*Food Server*”, empleando un tamaño similar al de un contenedor de carga convencional, con el fin de desarrollarlo dentro de las líneas de la agricultura vertical.

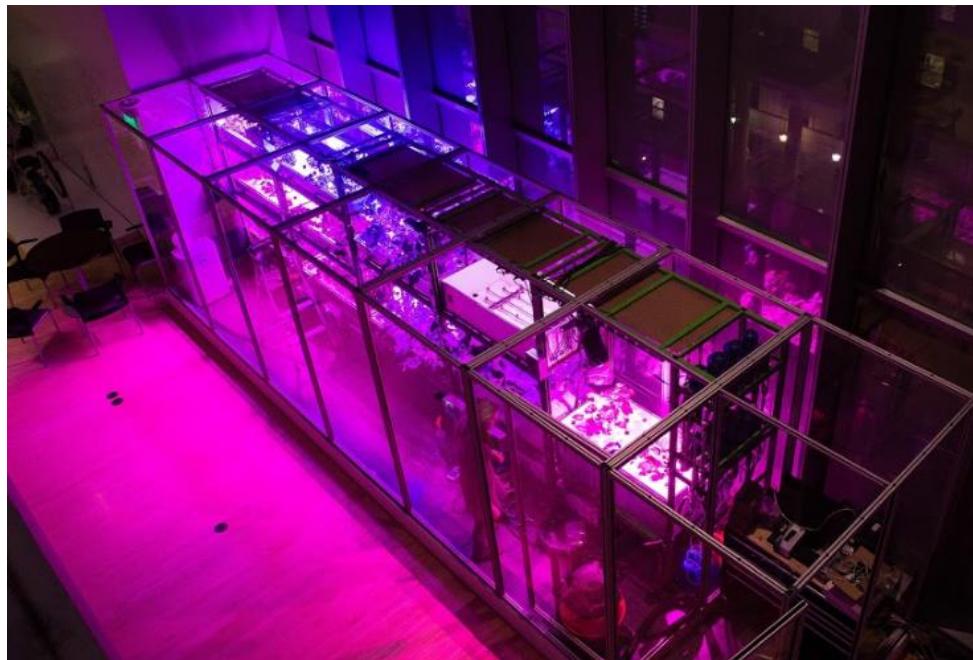


Figura 32 - Food Server.
Extraído de: <https://www.media.mit.edu/posts/openag-media-kit/>

Caleb Harper sostiene que el proyecto no persigue sólo el cultivar de forma más eficiente, sino también el llenar la carencia que existe en la industria de alimentos con respecto a la divulgación informativa, argumentando la necesidad de compartir las experiencias que se tienen a la hora de producir, para una industria más transparente. Así, propone este sistema como herramienta de experimentación para el agricultor aficionado, o como herramienta de estudio para la formación de la próxima generación de agricultores, que tendrán a disposición mucha más información, fruto de una agricultura completamente digitalizada (Hansman, 2.015).

Metodología de la Investigación

5 - Diseño Metodológico

En el presente capítulo se describe el proceso con el cual se realizó el trabajo de investigación; cómo se individualizó el problema; cómo se determinaron los pasos a seguir a fin de encontrar una solución para el problema, y cómo se delimitó el alcance del proyecto. Se presentaron la metodología del trabajo y los pasos para comprobar la hipótesis.

5.1 Selección del Problema a Investigar

El planteamiento del problema surgió de la necesidad de integrar el modelo de WSAN a la agricultura hidropónica, considerando que se presentan escenarios ideales dentro de un invernadero hidropónico para el uso de un sistema de medición de variables físicas y químicas, factible mediante el uso de sensores, donde la información recolectada puede ser aprovechada para el mejor manejo de los cultivos. Se observó una creciente demanda local de sistemas de producción que utilicen esta técnica, considerándola altamente rentable para la producción intensiva, además de obtener productos de mayor calidad.

Con el objeto de ampliar la capacidad que se tiene en cuanto a la adquisición de datos (como la temperatura del aire y la humedad, por ejemplo) dentro de estos invernaderos; actividad limitada a la intervención del agricultor, mediante la observación, medición y el registro manual, de no poder solventar los costos de un sistema de monitoreo convencional. También, se observó en el mercado paraguayo una carencia de soluciones que permitan la automatización de procesos de actuación, haciendo que éstos respondan al análisis de los datos recolectados dentro de estos invernaderos.

5.2 Elaboración del Plan para Resolver el Problema

A fin de establecer un plan para la resolución de la problemática, se tuvo como primera tarea el análisis de la situación planteada, junto con los asesores del proyecto, para luego recurrir a entrevistas con expertos en las áreas de interés.

Con respecto al uso de la técnica hidropónica, fueron consultadas la Dra. Daisy Ramírez, coordinadora del Departamento de Investigación de la Facultad de Ingeniería Agronómica de la Universidad Nacional del Este (FIA-UNE); y la empresa Hidropar, referencia local en el mercado de insumos para hidroponía. Con respecto a la integración de las TIC en la agricultura, fueron consultados el Ing. Gerardo Fogel, autor de la tesis “Diseño de Estaciones Experimentales Basado en Módulos Invernaderos Climatizados para la Práctica de Ensayos Climáticos sobre los Principales Cultivos del Paraguay”, y el Ing. Édgar Maya, catedrático de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, de la Universidad Técnica del Norte (Ecuador).

Otros datos se obtuvieron a través de diversas fuentes bibliográficas, tales como libros, artículos y demás publicaciones científicas, así como también de empresas dedicadas al rubro, contribuyendo a la información cualitativa para ser objeto de la investigación y proveer los datos necesarios para el desarrollo de objetivos específicos.

5.3 Elaboración del Diseño de la Investigación

5.3.1 Método.

Para el desarrollo de la investigación fue utilizado el método inductivo, que se inicia con el estudio individual de los hechos y se formulan conclusiones que se presentan como fundamentos de una teoría.

En cuanto al origen de los datos analizados, esta investigación se caracteriza por ser cualitativa, la cual busca descubrir y refinar las preguntas de investigación. Con frecuencia se basa en métodos de recolección de datos sin medición numérica, como las descripciones y las observaciones. Su propósito consiste en “reconstruir” un contexto, tal y como lo observan los actores de un sistema social previamente definido (Sampieri, Fernández y Baptista, 2.006).

En cuanto al fin que persigue, se caracteriza por ser aplicada, ya que busca conocer, actuar, construir y modificar la problemática identifica, y tecnológica, ya que tiene como objetivo la solución de un problema práctico con el diseño de un nuevo producto.

En cuanto a la metodología para demostrar la hipótesis, se caracteriza por ser una investigación no experimental, de tipo descriptivo, donde se investigan y determinan las propiedades y características más representativas del objeto de estudio.

5.3.2 Definición de la Información Necesaria.

Técnica e Instrumentos de Recolección de Datos.

Las técnicas utilizadas para la recolección de datos fueron: revisión de trabajos de grado relacionados al área; investigación en libros y revistas científicas (ya sean impresos o virtuales);

entrevista con profesionales especializados, por un lado, en agricultura hidropónica, y por el otro, en automatización y control; y asistencia a cursos o seminarios referentes al área. Las tareas que se realizaron fueron las siguientes:

Investigación Bibliográfica

El primer paso que se llevó a cabo fue la revisión bibliográfica, a través de libros, artículos y otras publicaciones científicas, acerca de las tecnologías WSAN aplicadas a la agricultura, dando como resultado el conocimiento de las necesidades que se presentan dentro de los| invernaderos con relación al monitoreo y control de las variables climáticas.

También se obtuvo información acerca de la FIA-UNE, sobre el uso de invernaderos en la agricultura, pudiendo conocer los conceptos de agricultura hidropónica que aplican.

Entrevistas con Profesionales Especializados en el Área de la IoT.

A fin de profundizar los conocimientos sobre el área de la automatización de procesos mediante la IoT, se pudo conversar con el Dr. Víctor Grimblatt, director de la empresa Synopsys Chile, en el marco de las actividades del Simposio Argentino de Sistemas Embebidos (SASE), del 2.016, al cual se pudo asistir. El mencionado profesional, referente en esta área, demostró las funcionalidades que presenta la plataforma *open source* “*DesignWare ARC EM*” propuesta por Synopsys, para el monitoreo y control de procesos, en el contexto de aplicación dentro de invernaderos.

También, aprovechando su breve visita al país, se pudo conversar con el Ing. Édgar Maya, de la Universidad Técnica del Norte, de Ecuador, donde se desempeña como docente investigador, en el área del uso de redes inalámbricas de sensores en la agricultura. El mismo compartió sus experiencias en cuanto a la automatización de tareas relacionadas a la producción

agrícola, como, por ejemplo, el riego automático de una parcela, aprovechando una WSN para medir las condiciones del suelo y del ambiente.

Visita de Campo para Conocer la Tecnología Aplicada en los Cultivos Hidropónicos.

A fin de conocer el nivel de tecnología aplicada en el invernadero hidropónico de la FIA-UNE, se realizó una visita de campo, guiada por la Dra. Daisy Ramírez, de la cual se pudo obtener informaciones relevantes acerca de las técnicas hidropónicas y los sistemas que utilizan, mencionando ella el poco uso, en el ámbito local, de herramientas de automatización para el monitoreo y control de procesos, debido al costo que demandan, siendo la FIA-UNE la única en la región en utilizar, por ejemplo, un sistema automático para la dosificación de nutrientes.

A fin de recabar más información sobre el uso de invernaderos hidropónicos, se visitó también la oficina comercial de Hidropar, donde se observó la completa ausencia de alguna herramienta tecnológica de automatización.

El desarrollo de estas actividades arrojó las siguientes conclusiones:

- La incapacidad del sistema implementado en la FIA-UNE en cuanto al monitoreo de parámetros referentes al acondicionamiento del invernadero, por la cual es necesaria la intervención del personal para ejecutar esta tarea.
- La carencia de un sistema automático accesible para el monitoreo de parámetros como temperatura, humedad o luminosidad de los invernaderos, así como de procesos automáticos de actuación que respondan en base al análisis de los datos recolectados.
- La ausencia del concepto de la IoT en esta área, para el manejo a distancia de los procesos que se desarrollan dentro del invernadero.

Valoración de las Etapas que Necesitan Automatizarse en un Invernadero Hidropónico.

El siguiente paso en la investigación fue identificar las etapas importantes para el crecimiento de los cultivos hidropónicos, para poder realizar el diseño de un sistema de monitoreo y control a medida.

De acuerdo a lo señalado por la Dra. Daisy Ramírez, de la FIA-UNE, y los asesores técnicos de Hidropar, para el crecimiento adecuado de los cultivos hidropónicos en invernaderos, deben cuidarse los siguientes aspectos: la solución nutritiva, la temperatura, la humedad y la luminosidad.

Por lo tanto, para un invernadero hidropónico pueden plantearse los siguientes sistemas:

- Sistema de monitoreo de la solución nutritiva, que se encargue de vigilar los parámetros de conductividad eléctrica, pH y temperatura de la sustancia.
- Sistema de dosificación automática de nutrientes, que aproveche el sistema anterior para agregar la dosis de nutrientes necesaria.
- Sistema de monitoreo de las variables ambientales dentro del invernadero, como la temperatura, humedad y luminosidad.
- Sistema de control para la climatización del invernadero, que aproveche el sistema anterior para ejecutar controles sobre los elementos de climatización.

5.4 Definición del Alcance

El proyecto propuesto tiene como alcance presentar información fehaciente acerca de la implementación de redes inalámbricas de sensores en la agricultura, por lo que contempla una síntesis del estado del arte de esta tecnología. Al mismo tiempo, explorar las características de la agricultura hidropónica, sin profundizar en los detalles biológicos y bioquímicos, dando énfasis a un área específica: monitoreo y control de invernaderos hidropónicos.

Es por ello que este proyecto pretende diseñar y validar la arquitectura de un sistema de monitoreo y control de parámetros seleccionados, considerados como imprescindibles para el desarrollo de las plantas, a través de una red inalámbrica de topología dinámica y autoconfigurable. Los parámetros monitoreados son: temperatura y humedad del aire, conductividad eléctrica y temperatura de la sustancia nutritiva, y luminosidad.

El diseño de la arquitectura del sistema comprende la elección de una plataforma para el despliegue de WSANs, disponible comercialmente, siendo elegidas plataformas MTM-CM5000MSP (popularmente CM5000) para desempeñar los roles de nodo sensor, nodo actuador y nodo sumidero de la red. Sensores no incorporados por el fabricante son añadidos a la arquitectura del sistema, usando la plataforma Arduino UNO como interfaz para la adquisición de datos.

Se define el uso del sistema operativo Contiki, para el diseño de la aplicación a ejecutarse en las CM5000, lo que permite también correr simulaciones sobre la red propuesta bajo diferentes escenarios, mediante el simulador Cooja, propio de este sistema operativo, a fin de evaluar la pérdida de paquetes en la comunicación entre los nodos y la latencia experimentada, para validar los requisitos temporales de esta WSAN. El diseño e implementación de una estación base, dotada de una interfaz gráfica y una base de datos, el dimensionamiento de la cantidad de nodos requeridos en un determinado invernadero, y la

selección de actuadores a controlarse mediante el uso de esta WSAN, quedan fuera del alcance de este proyecto.

Se espera que la propuesta pueda constituirse como una herramienta eficaz y accesible, que permita auxiliar en las tareas demandadas para el manejo de invernaderos hidropónicos, pudiendo luego ser utilizada como referencia a la hora de diseñar y ejecutar proyectos a escala comercial.

5.5 Comprobación de la Hipótesis

Para determinar si la WSAN puede ejecutar efectivamente controles en lazo cerrado, sobre procesos dentro de invernaderos hidropónicos, es fundamental determinar si la latencia experimentada en la transmisión de paquetes de datos es inferior al tiempo de asentamiento de la señal de control. Para el correcto funcionamiento de un controlador realimentado, que regule un proceso o sistema, es necesario, por lo menos, un sensor, que determine el estado del sistema; un controlador, que genere la señal que gobierna al actuador; y un actuador, que modifique al sistema de manera controlada.

La latencia mencionada corresponde al intervalo de tiempo que se registra entre el momento en que el nodo sensor detecta un evento, hasta el momento en que el nodo actuador recibe una alerta para ejecutar una tarea, constituyéndose así en el tiempo en que se demora en darse la realimentación del sistema controlado.

A fin de determinar si los valores obtenidos para la latencia son acordes para un proceso de control, se consideró el modelado matemático propuesto por Fogel (2.013), con el cual buscó diseñar entornos aislados y de ambiente controlado para la práctica de ensayos experimentales sobre cultivos. A fin de determinar la respuesta temporal de las variables a ser controladas, se procedió a evaluar la respuesta al pulso unitario de las funciones de transferencia para los

procesos de refrigeración y deshumidificación, que de entre los procesos propuestos por Fogel, encajan con las variables definidas para el monitoreo, en el alcance de este proyecto.

La simulación de los procesos mencionados con el *software* Scilab, arrojaron como resultado un tiempo de asentamiento de la señal de control en el orden de las centenas de segundos, por lo que, para validar los requisitos temporales de este proyecto, los resultados obtenidos con el análisis de la latencia deberían ser inferiores al tiempo mencionado. Como ejemplo, en la Fig. 33 se muestra la curva obtenida para el proceso de deshumidificación.

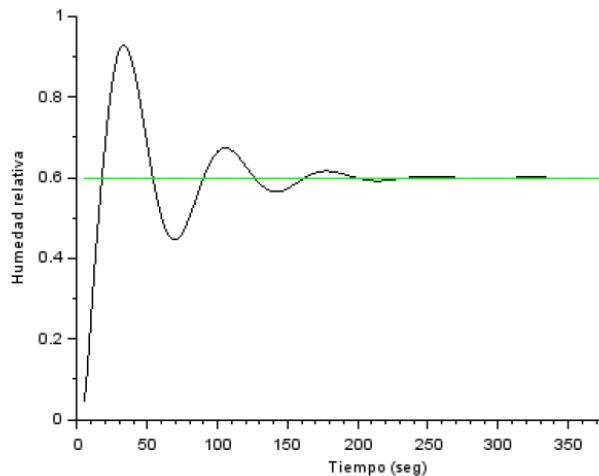


Figura 33 - Curva obtenida para la simulación del modelado matemático del proceso de deshumidificación, propuesto por Fogel.

Ingeniería del Diseño

6 - Diseño y Simulación de una Red Inalámbrica de Sensores y Actuadores

En este capítulo se presentan todos los aspectos referentes al *hardware* y al *software* seleccionados para el diseño de la red, como las plataformas a utilizarse, los sensores que incluyen y los que deben agregarse de forma externa, y el sistema operativo. Se presentan la topología y la arquitectura del sistema propuesto, así como también la estructura funcional de la aplicación a diseñarse.

6.1 Aspectos Referentes al *Hardware*

En este apartado se presentan las herramientas de *hardware* seleccionadas, y el porqué de su elección.

6.1.1 Sistemas Embebidos.

En el apartado 3.5 fueron descriptas varias plataformas para redes inalámbricas de sensores. Del análisis de éstas, se ha seleccionado la plataforma CM5000, del fabricante Advanticsys. Basada en la plataforma TelosB, es totalmente compatible con los sistemas operativos más utilizados en WSAN, TinyOS y Contiki.

Si bien todas las plataformas analizadas tienen capacidad suficiente para el despliegue de esta red, resultó conveniente para el proyecto el uso de la plataforma seleccionada,

considerando que la misma integra de fábrica sensores de temperatura del aire, humedad y luminosidad, que resultan útiles para la aplicación planteada.

Considerando el propósito de monitorear parámetros relevantes para cultivos hidropónicos, se adicionaron los sensores de conductividad eléctrica y temperatura del agua, en forma de sensores externos a la CM5000, usando como interfaz de comunicación entre ésta y los sensores, una plataforma Arduino UNO.

Arduino UNO es una plataforma basada en el ATmega328P. Cuenta con 14 pines digitales de entrada y salida (I/O) y 6 pines analógicos de entrada, y compatibilidad con la comunicación serial UART, lo que permite enviar los datos de los sensores externos a la MTM-CM5000MSP a través del USB Host Shield.



Figura 34 - Plataforma CM5000.
Extraido de: <https://user.informatik.uni-goettingen.de/~sensorlab/Hardware.php>



Figura 35 - Plataforma Arduino UNO.
Extraido de: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>

6.1.2 Sensores.

En los apartados 2.3.1 y 2.4.6 se describieron todos los factores que pueden monitorearse, con relación a la climatización del invernadero y el estado de la solución nutritiva. Referentes del área entrevistados sostuvieron la necesidad de monitorear,

imprescindiblemente, los parámetros de temperatura y humedad del aire, conductividad eléctrica y temperatura de la sustancia nutritiva, y luminosidad del interior del invernadero, para el desarrollo de las plantas.

Estos sensores se usan con el propósito de realizar mediciones de los parámetros ya mencionados. Los datos recolectados pueden enviarse al nodo servidor para su visualización, o bien, visualizar los datos del propio nodo sensor a través de su dirección IPv6.

A continuación, se describen los sensores utilizados en este proyecto.

Sensor de Temperatura del Aire y Humedad Relativa.

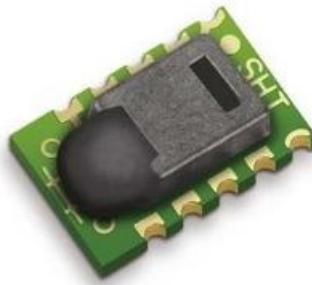


Figura 36 - Sensor de temperatura del aire y humedad relativa SHT11.

Extraído de:

https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Pressure/Sensirion_Humidity_SHT1x_Datasheet_V5.pdf

La CM5000 integra el sensor SHT11 que, mediante elementos de sensado y procesamiento de la señal, provee una salida digital completamente calibrada. Utiliza un único elemento capacitivo para la medición de la humedad relativa, mientras que la temperatura se obtiene mediante la medición de la banda prohibida del sensor.

Cada SHT11 viene calibrado de fábrica; este proceso se realiza dentro de una cámara donde los niveles de humedad pueden ajustarse con precisión. El rango de medición es de -40 ~ 123.8°C para temperatura y 0 ~ 100% para humedad, satisfaciendo el rango de temperatura y humedad que se registra dentro de un invernadero, por lo que podría aplicarse apropiadamente al monitoreo de estas variables en el mismo.

Sensor de Luminosidad.

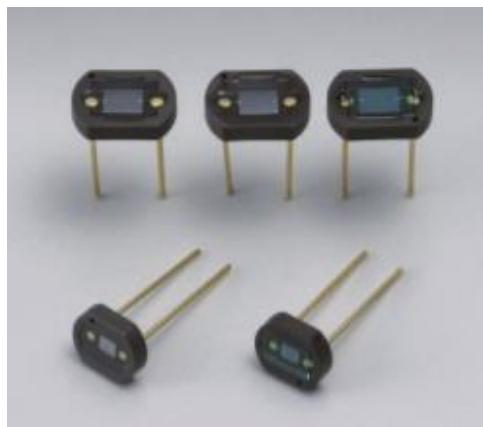


Figura 37 - Sensor de luminosidad S1087.

Extraído de: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s1087/etc_kspd1039e.pdf

El CM5000 provee dos sensores de luminosidad, el S1087 para el rango visible de medición, y el S1087-01 para el rango infrarrojo. La unidad de medida de estos sensores es el lux (lx). Poseen un rango de respuesta espectral de 320-730 nm y 320-1100 nm respectivamente, para la longitud de onda.

La utilización de estos sensores ayudaría a monitorear la radiación solar total y la radiación fotosintéticamente activa, para poder prever la aparición de organismos fotosintéticos, como algas y bacterias en los cultivos hidropónicos o bien evitar estrés por exceso de radiación solar.

Sensor de Temperatura del Agua.



Figura 38 - Sensor de temperatura del agua DS18B20.

Extraído de: <https://www.aliexpress.com/w/wholesale-ds18b20-waterproof.html>

El sensor de temperatura del agua, que se agrega como sensor externo a la CM5000, es el DS18B20, comercializado dentro de un encapsulado a prueba de agua que lo hace ideal para este uso. Su rango de medición es de -55°C ~ 125°C, y está calibrado de fábrica con una precisión de 0,5°C, por lo que podría emplearse para el monitoreo del tanque de solución nutritiva, habiendo visto en el apartado 2.4.6 la importancia de mantener la temperatura a un nivel adecuado.

Sensor de Conductividad Eléctrica.



Figura 39 - Sensor de conductividad eléctrica K1.
Extraído de: https://www.atlas-scientific.com/product_pages/circuits/ezo_ec.html

El sensor de conductividad eléctrica, de Atlas Scientific, que se agrega como sensor externo a la CM5000, se compone de dos elementos, que se comercializan en conjunto bajo el nombre de Conductivity K 1.0. Cuenta con una sonda de medición, con rango de 5uS/cm a 200.000 uS/cm y una placa, EZO, a la cual se conecta la sonda, y realiza las lecturas de la conductividad del líquido con el cual la sonda está en contacto.

6.1.3 Costo Estimativo de los Elementos de Hardware Seleccionados.

Tabla 5 - Costo estimativo de los elementos de hardware seleccionados.

Cantidad	Componente	Costo por unidad (PYG)	Costo total (PYG)
4	MTM-CM5000-MSP	587.700	2.350.800
2	Arduino UNO	103.500	207.000
2	USB host shield	89.000	178.000
1	Modulo de 4 relés	36.150	36.150
1	Kit K 1.0 Conductivímetro	1.072.490	1.072.490
1	DS18B20	32.700	32.700
Total			3.877.140

Nota. Fuente propia.

6.2 Aspectos Referentes al Software

En este apartado se presentan las herramientas de *software* seleccionadas, y el porqué de su elección.

Sistema Operativo Contiki.

De los sistemas operativos descriptos en el apartado 3.6, los más utilizados en redes inalámbricas de sensores son TinyOS y Contiki, de entre los cuales fue seleccionado Contiki, debido las siguientes ventajas:

- En cuanto a la asignación de memoria, provee asignación de memoria dinámica.
- Ofrece una pila de red IP completa, con estándares de protocolos IP como UDP, TCP y HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*).
- Se distribuye con un simulador propio: Cooja.
- Soporta cargas dinámicas en tiempo de ejecución.
- Opera con un consumo extremadamente bajo, lo que permite que las motas tengan autonomía de años con un par de baterías AA.

- Permite el uso de *protothreads*, que son una mezcla de mecanismos de programación dirigidos a eventos, y de *multithreaded*. Con los *protothreads*, los controladores de eventos pueden ser hechos para bloquear, esperando que los eventos ocurran.

Simulador Cooja

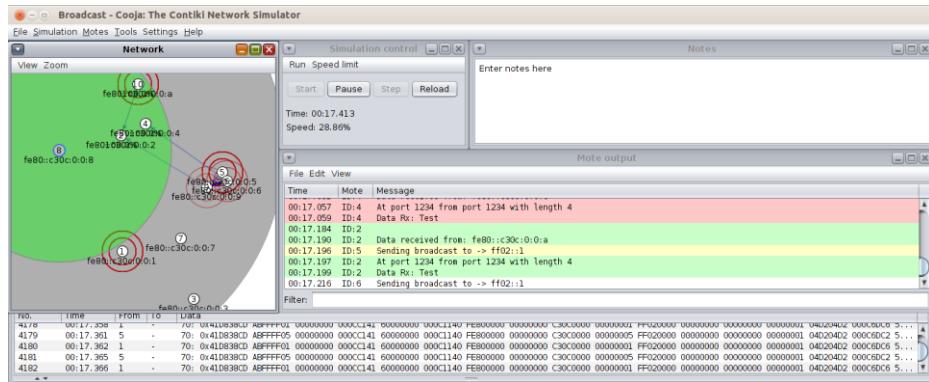


Figura 40 - Entorno de trabajo del Cooja.
Extraído de: http://wireless.ictp.it/school_2015/book/

Siendo que es distribuido junto con Contiki, Cooja es la herramienta más apropiada para la simulación de motas que ejecutan aplicaciones con este sistema operativo, con una interfaz de fácil manejo. Brinda la posibilidad de emular cada mota a nivel de *hardware* para poder observar de manera más precisa su comportamiento, pudiendo fácilmente cambiar los procesos de Contiki que se ejecutan en motas ya agregadas en la simulación, ideal a la hora de probar distintas versiones de una aplicación de forma rápida y sencilla.

6.3 Diseño de la Red y Protocolos Implementados

6.3.1 Topología.

El diseño de la red se basa en una topología mallada, haciendo uso del protocolo RPL (*IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*) proporcionado por 6lowPAN, donde cada nodo sensor envía los datos recolectados directamente al nodo servidor, de estar éste dentro del radio de cobertura del transceptor; y de no estarlo, los mensajes pueden ser retransmitidos a otros nodos sensores, para así llegar a destino. Esta topología, por dinámica, también permite la reparación automática de los enlaces en caso de falla de alguno de los nodos, o en caso de que se agreguen nuevos nodos a la red, permitiendo que ésta sea escalable.

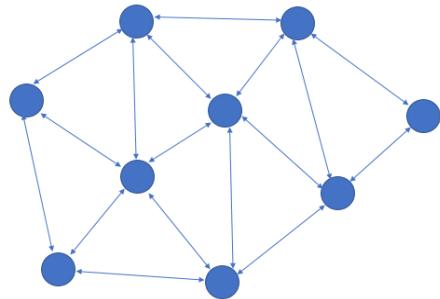


Figura 41 - Topología de red mallada.
Fuente propia.

6.3.2 Arquitectura del Sistema.

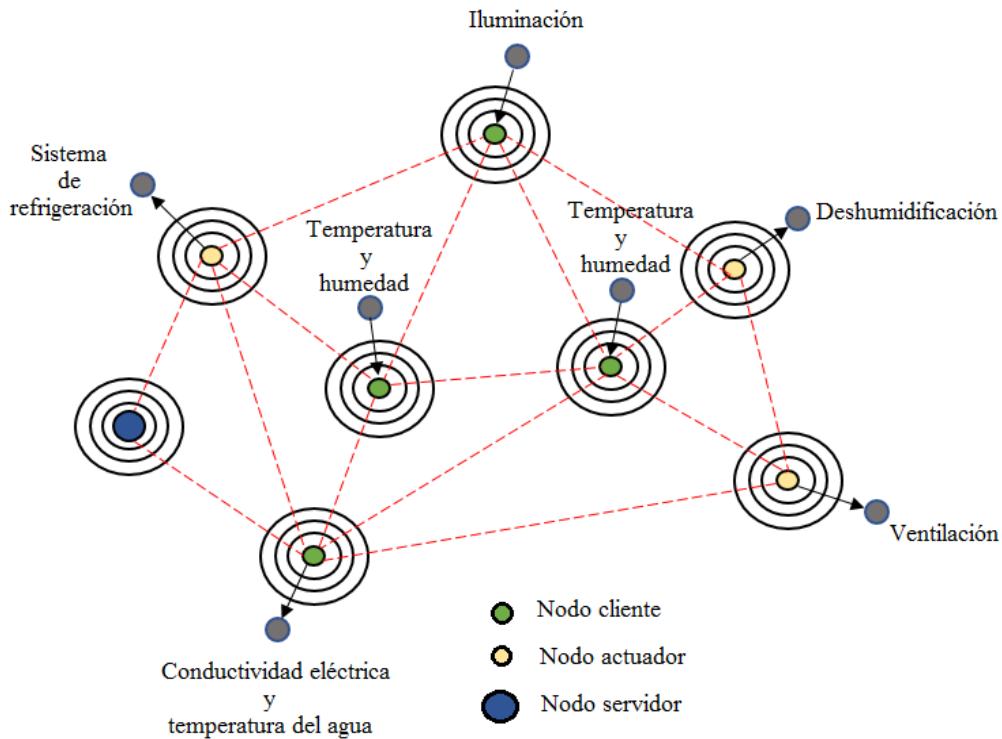


Figura 42 - Arquitectura del sistema propuesto.

Fuente propia.

La arquitectura diseñada, como propuesta de este proyecto, permite la recolección de datos de nodos sensores, para el envío de éstos mediante el protocolo UDP y los dispositivos de radio 802.15.4 al nodo servidor; los nodos actuadores recolectan datos y envían una señal al relé para activar los actuadores; tanto los nodos sensores, nodos actuadores como el nodo servidor disponen de dirección IPv6, obedeciendo al concepto de la IoT.

Los datos que recibe el nodo servidor pueden ser visualizados iniciando sesión en el mismo, mediante la terminal de Contiki. La comunicación entre el servidor y la computadora en la cual se hace correr la terminal de Contiki se establece mediante el puerto USB.

6.3.3 Protocolos Implementados.

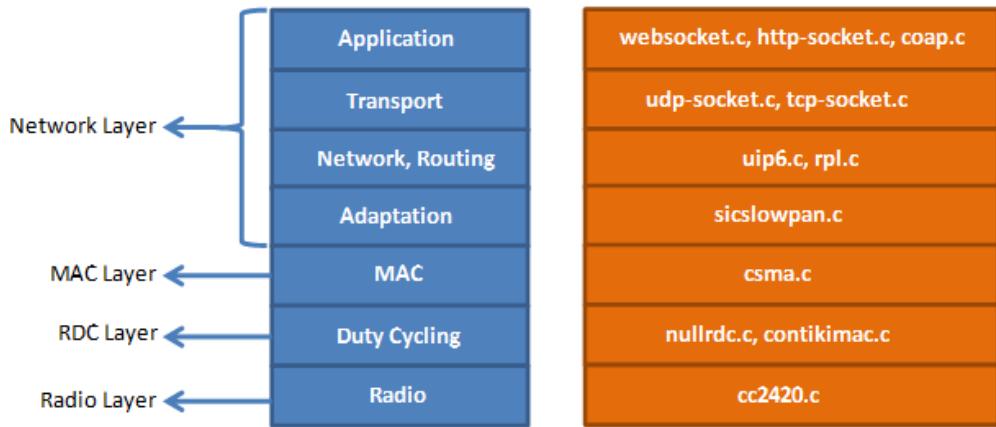


Figura 43 - Pila de protocolos de Contiki.
Extraído de: http://anrg.usc.edu/contiki/index.php/Protocols_stack

Capa de Radio.

La pila de protocolos del *stack* IPv6 empieza con el controlador del módulo de radiofrecuencia, con el que se logra la comunicación inalámbrica. La CM5000 utiliza el CC2420, que opera bajo IEEE 802.15.4 a 2.4 GHz.

Capa RDC (Radio Duty Cycle).

Esta capa, que se encarga de mantener apagado el módulo de radiofrecuencia tanto como sea posible, para ahorrar energía, utiliza el protocolo ContikiMAC, mecanismo por defecto de este sistema operativo, que implementa *wake-ups* periódicos para recibir los paquetes transmitidos. Este protocolo provee muy buena eficiencia energética, debido a que está adaptado para el módulo CC2420.

Capa MAC (Medium Access Control).

Esta capa, que es la responsable de evitar colisiones dentro del medio, utiliza el protocolo CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*), que cuenta con direccionamiento, secuencia numérica y retransmisiones. Este protocolo detecta colisiones en el medio, y luego realiza las retransmisiones, para que la cantidad de paquetes perdidos sea mínima.

Capa de Adaptación.

Esta capa es el componente principal de 6LoWPAN, el cual permite el uso de IPv6 sobre redes basadas en el estándar IEEE 802.15.4. Se encarga de manejar la fragmentación y desfragmentación de los paquetes, así como del enrutamiento de los paquetes IPv6 entre los nodos de la WSAN.

Capa de Red y Enrutamiento.

Esta capa se encarga del enrutamiento de los paquetes. Contiki forma automáticamente una red inalámbrica IPv6 aplicando el protocolo RPL, que proporciona una configuración rápida de la red y adaptación efectiva incluso si la topología de red cambia.

Capa de Transporte.

Esta capa, que es la responsable de entregar cada dato al proceso apropiado de la aplicación, utiliza el protocolo UDP debido a que es el más apropiado para la transmisión de paquetes cortos, o donde toda la información puede caber en un único paquete.

Capa de Aplicación.

En esta capa se encuentra la aplicación diseñada. Los *softwares* desarrollados por los programadores hacen uso de esta capa para tener acceso a los servicios de red. Para poder extender la red inalámbrica de sensores y actuadores a una plataforma en la nube, se podría utilizar Ubidots, que es un servicio en línea para capturar y analizar la información de los sensores en tiempo real, haciendo posible la creación de aplicaciones para la IoT; permite visualizar los datos recopilados en una interfaz gráfica, de manera que el usuario los pueda entender, y pueda acceder a ellos de forma remota. Pensando en un posible uso de este servicio, se considera el protocolo HTTP para esta capa.

6.3.4 Estructura Funcional de la Aplicación Diseñada.

Nodo Sensor

El nodo sensor cuenta con un proceso que se encarga de verificar si está disponible la conexión UDP. Una vez disponible la conexión, se espera que se registre un evento, para dar inicio a la lectura de los sensores internos (temperatura, humedad y luminosidad ambiental), y

recuperar los datos de sensores externos (conductividad eléctrica y temperatura del agua), que son medidos con la plataforma Arduino; ésta se encarga de enviar los datos vía UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) a la CM5000, la cual los agrega a un *buffer* de recepción de datos, dejándolos disponibles para cuando se requiera. Todos los datos se cargan a un *buffer*, para luego enviarlos por paquetes vía UDP.

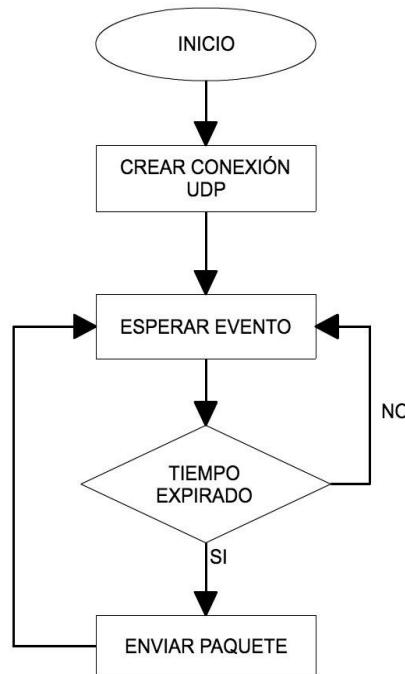


Figura 44 - Diagrama de flujo de las funciones del nodo servidor.
Fuente propia.

Nodo servidor

El nodo servidor, que ve al nodo sensor como un cliente, primero se encarga de verificar si existe conexión UDP; verificada la conexión, espera la llegada de un nuevo paquete. De recibirse un paquete, el nodo servidor imprime el mensaje “*Data recv from*”, seguido del número de mota que envía el paquete, para después almacenar los datos en un *buffer* e imprimir en la terminal de la computadora. Para completarse el proceso, envía al cliente el mensaje “*Hello_from_the_server!*”, indicando que ha recibido el paquete.

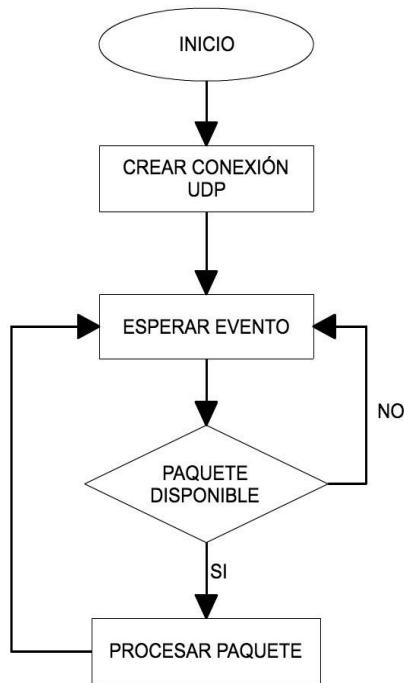


Figura 45 - Diagrama de flujo de las funciones del nodo servidor.
Fuente propia.

Nodo actuador

El nodo actuador realiza procesos similares a los del nodo sensor, ya que recoge los datos de los sensores que incorpora; y también, procesos similares a los del nodo servidor, pudiendo recibir los datos de otros nodos sensores. De acuerdo a los valores leídos, envía señales de control a los relés, que se encargan de accionar los actuadores correspondientes.

6.4 Diseño de la Aplicación en Contiki

En este apartado se describe la estructura básica de toda aplicación en Contiki, así como también las líneas de código específicas, para cada tarea de medición de los sensores utilizados en este proyecto.

6.4.1 Archivo de una Aplicación en Contiki.

En la Fig. 46 se muestra la estructura genérica de todo archivo de aplicación en Contiki, usada como punto de partida para programar aplicaciones.

```
1 #include "contiki.h"
2 #include <stdio.h>
3
4 PROCESS(example_process, "Example process");
5 AUTOSTART_PROCESSES(&example_process);
6
7 PROCESS_THREAD(example_process, ev, data)
8 {
9   PROCESS_BEGIN();
10
11   while(1) {
12     PROCESS_WAIT_EVENT();
13     printf("Got event number %d\n", ev);
14   }
15
16   PROCESS_END();
17 }
```

Figura 46 - Estructura genérica de un a aplicación en Contiki.
Fuente propia.

El uso de la función #include en las líneas 1 y 2 hace referencia a la inclusión de archivos a la aplicación, para que el compilador pueda ejecutarla. “Contiki.h” refiere al uso del archivo de sistema, que siempre ha de incluirse, mientras que <stdio.h> refiere al uso del archivo de cabecera que contiene las definiciones de las macros, las constantes, las declaraciones de funciones de la biblioteca para hacer operaciones estándares de entrada y salida, así como las definiciones de tipos necesarias para dichas operaciones.

La estructuración del proceso requerido inicia en la línea 4. Un proceso en Contiki consta de dos partes: un bloque de control del proceso, que contiene información sobre el mismo, como su nombre textual; y el *thread* del proceso, que contienen el código del mismo. El bloque de control se encarga de llamar al *thread* e iniciar su ejecución.

Como se ve en la línea 4, en el macro usado para definir el proceso se especifica el nombre (representado por ‘example_process’), y cómo se lo representará al imprimirla en la terminal (“Example process”). En la línea 5, se especifica que el proceso se inicie una vez que finalice el arranque de la aplicación (cuando ya están incluidos los archivos de cabecera).

En la línea 7 se declara el contenido del proceso: el nombre del mismo y las funciones de callback (example_process, ev, data). Luego, se agrega el objetivo del proceso, entre los macros PROCESS_BEGIN (), que define el inicio del proceso, y PROCESS_END (), que define la finalización del mismo. Es aquí donde el programador incluye las líneas de código que se encargan de ejecutar las tareas deseadas.

Funciones Utilizadas en la Aplicación Diseñada.

Para la obtención de las lecturas de los sensores mencionados en el apartado 6.1.2 se utilizaron las siguientes funciones:

```

static int get_temperatura(void)
{
    return ((sht11_sensor.value(SHT11_SENSOR_TEMP) / 10) - 396) / 10;
}

static int get_humedad(void)
{
    return sht11_sensor.value(SHT11_SENSOR_HUMIDITY) ;
}

static int get_light1(void)
{
    return 10 * light_sensor.value(LIGHT_SENSOR_PHOTOSYNTHETIC) / 7;
}

static int get_light2(void)
{
    return 46 * light_sensor.value(LIGHT_SENSOR_TOTAL_SOLAR) / 10;
}

```

Figura 47 - Líneas de código usadas para la obtención de las lecturas de los sensores internos.
Fuente propia.

Las funciones que se observan en la Fig. 47 corresponden a la obtención de las lecturas de los sensores internos de la CM5000. Para obtener los valores de las lecturas de los sensores externos, se utilizaron las siguientes funciones:

```

static int get_ce(void)
{
    return rx_buf[0];
}

static int get_wtemp(void)
{
    return rx_buf[1];
}

```

Figura 48 - Líneas de código usadas para la obtención de las lecturas de los sensores externos.
Fuente propia.

Donde los valores de estos sensores son almacenados en un *buffer* al ser recibidos por el puerto UART de la CM5000. Para acceder a estos datos, se incluye la función ‘return rx_buf[i]’, donde el valor almacenado en la posición ‘i’ es llamado por dicha función.

El proceso de almacenar en un *buffer* la información recibida mediante la comunicación que se establece entre la CM5000 y la plataforma Arduino UNO, por sus respectivos puertos UART, se consigue mediante la siguiente función:

```

uint8_t u=0;
int uart_rx_callback(unsigned char c)
{
    u = (uint8_t)c;
    if (i<128) {
        rx_buf[i] = c;
        i++;
        if (i==128){
            i=0;
        }
        leds_toggle(LEDS_RED);
    }
    return 0;
}

```

Figura 49 - Proceso de almacenar la información de los sensores externos en un buffer.
Fuente propia.

6.4.2 Compilar una Aplicación en Contiki.

Para compilar una aplicación en Contiki se necesita adicionalmente el Makefile, y opcionalmente, el archivo de configuración (project-conf). El Makefile sirve de guía para que el compilador pueda elegir qué archivos de programa se van a compilar y enlazar juntos, mientras que el project-conf permite activar una serie de opciones de configuración de Contiki. Todos estos archivos necesariamente deben estar contenidos en una misma carpeta. En la Fig. 50 se muestra la estructura genérica de Makefile usada por Contiki.

```

CONTIKI = ../..
all: app-name
include $(CONTIKI)/Makefile.include

```

Figura 50 - Estructura genérica del Makefile de Contiki.
Fuente propia.

Donde se indica, en la primera línea, la raíz de las fuentes Contiki; en la segunda línea, el nombre dado a la aplicación; y en la tercera, se incluye todo el sistema Contiki, así como el makefile específico de la plataforma a utilizada.

Mediante el uso del project-conf, elementos como el canal RDC, su controlador, y el controlador MAC pueden ser configurados; de no utilizar un project-conf, los elementos

mencionados trabajan bajo las condiciones por defecto. Teniendo estos elementos, se procede a compilar la aplicación y subirla a la mota, siguiendo los pasos que se describen en los siguientes párrafos.

Para compilar, una vez abierta la terminal de Contiki, se procede a ubicar el directorio en el cual están almacenados la aplicación, el Makefile y el project-conf. La línea resaltada en la Fig. 51 muestra el comando ‘cd’ introducido para ello, junto con la dirección de la aplicación de ejemplo, introducido a continuación.

```
user@instant-contiki:~$ cd contiki/examples/ipv6/rev7
```

Figura 51 – Comando para ubicar un directorio en Contiki.
Fuente propia.

A continuación, a fin de determinar que la mota está siendo reconocida por el sistema, se introduce el comando ‘make sky-motelist’, como se en la Fig. 52, donde sky representa la plataforma utilizada, sobre la cual se basa la CM5000. El texto resaltado en la Fig. 53 indica cuál es la mota que está siendo reconocida; de haber más de una mota, todas serán descriptas allí.

```
user@instant-contiki:~$ cd contiki/examples/ipv6/rev7
user@instant-contiki:~/contiki/examples/ipv6/rev7$ make sky-motelist
```

Figura 52 - Comando para identificar las motas conectadas.
Fuente propia.

```
user@instant-contiki:~$ cd contiki/examples/ipv6/rev7
user@instant-contiki:~/contiki/examples/ipv6/rev7$ make sky-motelist
using saved target 'sky'
../../../../tools/sky/motelist-linux
Reference   Device      Description
-----
MFVKDVMN   /dev/ttyUSB0    FTDI MTM-CM5000MSP
user@instant-contiki:~/contiki/examples/ipv6/rev7$
```

Figura 53 - Informe de la identificación de motas.
Fuente propia.

El siguiente paso a realizarse es la selección de la mota, para lo cual se introduce el comando resaltado en la Fig. 54. La línea resaltada en la Fig. 55 indica el suceso en la operación.

```
user@instant-contiki:~$ cd contiki/examples/ipv6/rev7
user@instant-contiki:~/contiki/examples/ipv6/rev7$ make sky-motelist
using saved target 'sky'
../../../../tools/sky/motelist-linux
Reference Device Description
-----
MFVKDVMN /dev/ttyUSB0 FTDI MTM-CM5000MSP
user@instant-contiki:~/contiki/examples/ipv6/rev7$ make TARGET=sky savetarget
```

Figura 54 - Comando para la selección de la mota.
Fuente propia.

```
user@instant-contiki:~$ cd contiki/examples/ipv6/rev7
user@instant-contiki:~/contiki/examples/ipv6/rev7$ make sky-motelist
using saved target 'sky'
../../../../tools/sky/motelist-linux
Reference Device Description
-----
MFVKDVMN /dev/ttyUSB0 FTDI MTM-CM5000MSP
user@instant-contiki:~/contiki/examples/ipv6/rev7$ make TARGET=sky savetarget
saving Makefile.target
user@instant-contiki:~/contiki/examples/ipv6/rev7$ █
```

Figura 55 - Informe de selección de la mota.
Fuente propia.

Luego, se introduce el comando resaltado en la Fig. 56 para compilar y subir la aplicación a la mota. Una vez terminado el proceso, la línea resaltada en la Fig. 57 indica el suceso de la operación.

```
user@instant-contiki:~$ cd contiki/examples/ipv6/rev7
user@instant-contiki:~/contiki/examples/ipv6/rev7$ make sky-motelist
using saved target 'sky'
../../../../tools/sky/motelist-linux
Reference Device Description
-----
MFVKDVMN /dev/ttyUSB0 FTDI MTM-CM5000MSP
user@instant-contiki:~/contiki/examples/ipv6/rev7$ make TARGET=sky savetarget
saving Makefile.target
user@instant-contiki:~/contiki/examples/ipv6/rev7$ make udpclient.upload
```

Figura 56 - Comando para compilar y subir la aplicación.
Fuente propia.

```

Done
make[2]: Leaving directory `/home/user/contiki/examples/ipv6/rev7'
make -j 20 sky-upload-sequence
using saved target 'sky'
make[2]: Entering directory `/home/user/contiki/examples/ipv6/rev7'
+++++ Erasing /dev/ttyUSB0
MSP430 Bootstrap Loader Version: 1.39-telos-7
Use -h for help
Mass Erase...
Transmit default password ...
+++++ Programming /dev/ttyUSB0
MSP430 Bootstrap Loader Version: 1.39-telos-7
Invoking BSL...
Transmit default password ...
Current bootstrap loader version: 1.61 (Device ID: f16c)
Changing baudrate to 38400 ...
Program ...
44636 bytes programmed.
+++++ Resetting /dev/ttyUSB0
MSP430 Bootstrap Loader Version: 1.39-telos-7
Use -h for help
Reset device ...
Done
make[2]: Leaving directory `/home/user/contiki/examples/ipv6/rev7'
make[1]: Leaving directory `/home/user/contiki/examples/ipv6/rev7'
rm udpclient.ihex
user@instant-contiki:~/contiki/examples/ipv6/rev7$ █

```

Figura 57 - Confirmación de que la aplicación fue compilada.

Fuente propia.

A fin de visualizar en la terminal la aplicación siendo ejecutada en la mota, se introduce el comando ‘make login’, como se observa en la Fig. 58.

```

+++++ Erasing /dev/ttyUSB0
MSP430 Bootstrap Loader Version: 1.39-telos-7
Use -h for help
Mass Erase...
Transmit default password ...
+++++ Programming /dev/ttyUSB0
MSP430 Bootstrap Loader Version: 1.39-telos-7
Invoking BSL...
Transmit default password ...
Current bootstrap loader version: 1.61 (Device ID: f16c)
Changing baudrate to 38400 ...
Program ...
44636 bytes programmed.
+++++ Resetting /dev/ttyUSB0
MSP430 Bootstrap Loader Version: 1.39-telos-7
Use -h for help
Reset device ...
Done
make[2]: Leaving directory `/home/user/contiki/examples/ipv6/rev7'
make[1]: Leaving directory `/home/user/contiki/examples/ipv6/rev7'
rm udpclient.ihex
user@instant-contiki:~/contiki/examples/ipv6/rev7$ make login

```

Figura 58 - Comando para hacer 'login' en la mota.

Fuente propia.

6.4.3 Simular una Aplicación en Cooja

A fin de correr simulaciones sobre la aplicación diseñada, se dispone del simulador Cooja en la carpeta de herramientas de Contiki. Para hacer uso del mismo, se siguen los pasos descriptos en este apartado.

Una vez abierta la terminal de Contiki, se procede a ubicar el directorio en el cual se almacena Cooja. La línea resaltada en la Fig. 59 muestra el comando ‘cd’ introducido para ello, junto con la dirección del Cooja, introducida a continuación.

```
user@instant-contiki:~$ cd contiki/tools/cooja
```

Figura 59 – Comando para ubicar el directorio del Cooja.
Fuente propia.

Luego, se introduce el comando ‘ant run’, para iniciar la carga del simulador, como se observa en la Fig. 60. La Fig. 61 muestra el proceso de carga del Cooja. Finalizado éste, se observa la ventana principal del Cooja, así como lo ilustra la Fig. 62.

```
user@instant-contiki:~$ cd contiki/tools/cooja
user@instant-contiki:~/contiki/tools/cooja$ ant run
```

Figura 60 - Comando para iniciar el Cooja.
Fuente propia.

```
user@instant-contiki:~$ cd contiki/tools/cooja
user@instant-contiki:~/contiki/tools/cooja$ ant run
Buildfile: /home/user/contiki/tools/cooja/build.xml

init:
compile:
copy configs:

jar_cooja:
[jar] Building jar: /home/user/contiki/tools/cooja/dist/cooja.jar

jar:
init:
compile:
jar:
init:
```

Figura 61 - Proceso de carga del Cooja.
Fuente propia.



Figura 62 - Ventana principal del Cooja.
Fuente propia.

Para iniciar la simulación, se recurre a la pestaña ‘File’, y se selecciona la opción ‘New Simulation’. La ventana emergente que se observa en la Fig. 63 corresponde a esta opción, donde se tiene la posibilidad de introducir un nombre a la simulación; ésta se crea al pulsar el botón ‘Create’. Seguidamente, se observa la ventana del Cooja tal y como lo ilustra la Fig. 64.

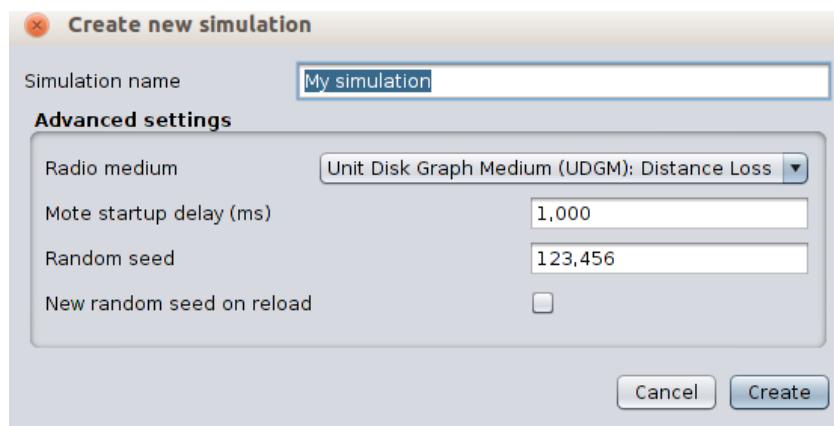


Figura 63 - Ventana correspondiente a la opción "New Simulation".
Fuente propia.

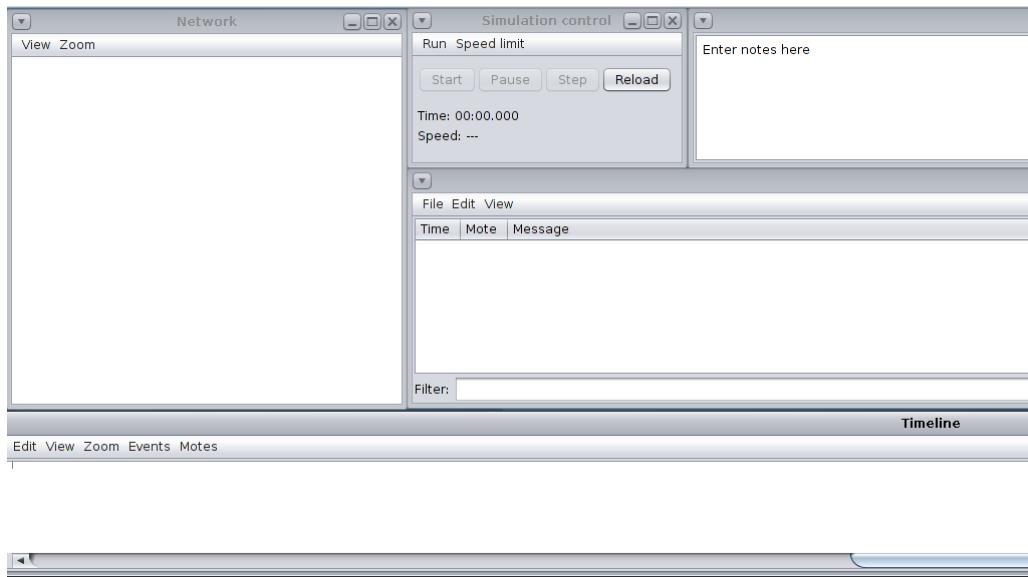


Figura 64 - Ventana del Cooja una vez creado el archivo de simulación.
Fuente propia.

Antes de cargar la aplicación al Cooja, se debe seleccionar el tipo de mota a utilizar.

Para ello, en la pestaña ‘Motes’ se selecciona la opción ‘Add motes’. Luego de seleccionar la opción ‘Create new mote type’, se despliega una lista con los tipos de motas incluidos en el simulador, así como se muestra en la Fig. 65.

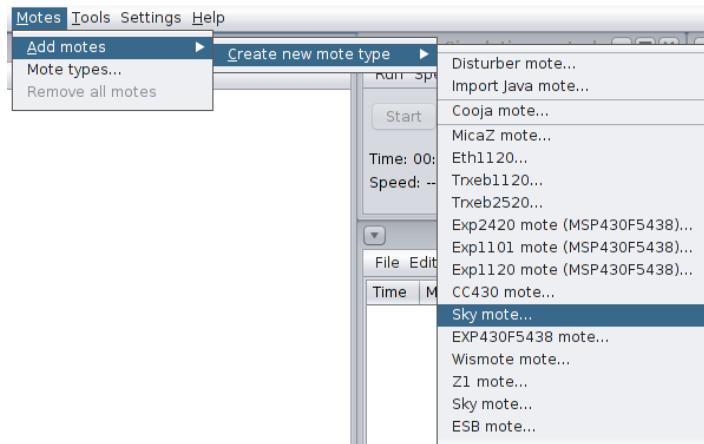


Figura 65 - Selección del tipo de mota en el Cooja.
Fuente propia.

Una vez seleccionada la mota a utilizar, se observa la ventana emergente que se ilustra en la Fig. 66, con la cual se selecciona el archivo de aplicación a simularse pulsando el botón ‘Browse’, que nos dirige al directorio, a fin de ubicar este archivo.

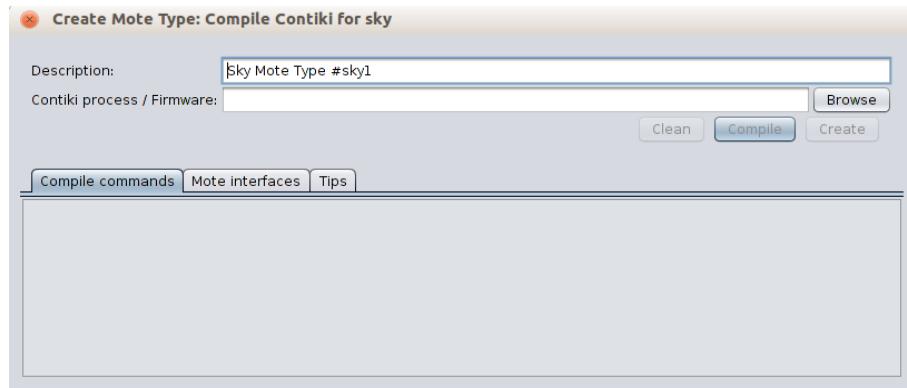


Figura 66 - Ventana de selección del archivo a simular.
Fuente propia.

Una vez ubicado el archivo, se lo selecciona, y se pulsa el botón ‘Open’, así como se observa en la Fig. 67 que redirige a la ventana anterior, en la cual, con el archivo ya incluido, el simulador empieza a compilar la aplicación luego de pulsar el botón ‘Create’, como se observa en la Fig. 68.

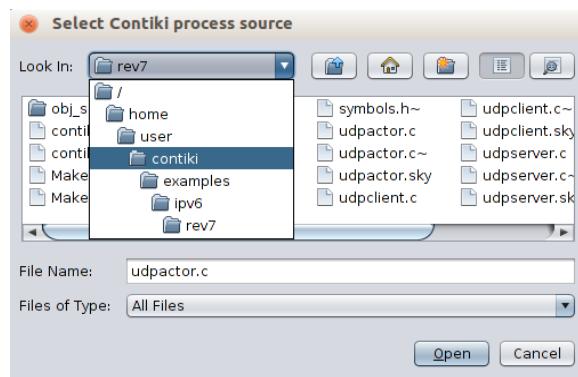


Figura 67 - Ubicación del archivo a simular.
Fuente propia.

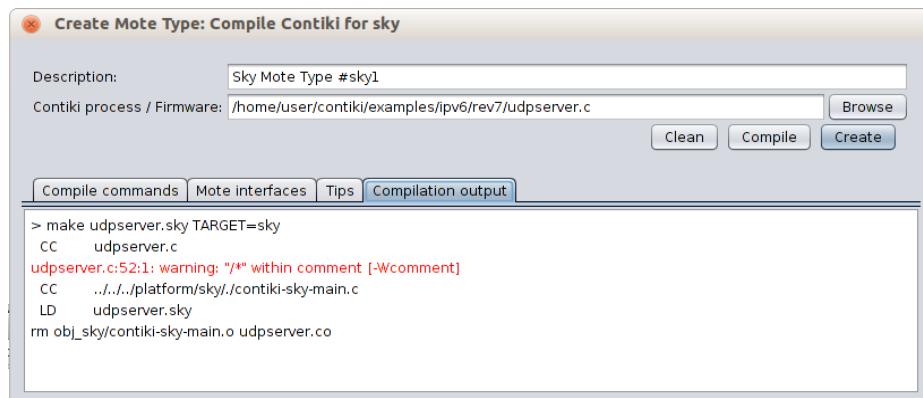


Figura 68 - Resultado de la aplicación ya compilada.
Fuente propia.

Finalizado el proceso, se observa la ventana emergente de la Fig. 69, en la cual se selecciona la cantidad de motas a utilizar con el código compilado, que se agrega pulsando el botón ‘Add motes’.

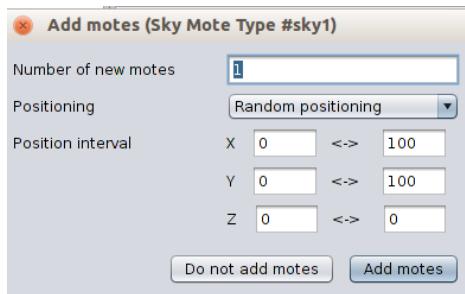


Figura 69 - Ventana para agregar la cantidad de motas deseadas.
Fuente propia.

En la Fig. 70 se observa la ventana del Cooja, con la mota ya agregada, representada por el círculo ‘1’ en el cuadro de visualización; la ubicación de la misma puede ser cambiada, arrastrándose el círculo hasta la posición deseada. La mota agregada corresponde al nodo servidor de la aplicación diseñada por este proyecto. De forma análoga, se introducen al simulador los nodos sensores de la red.

En la pestaña ‘View’, del cuadro de visualización, pueden elegirse qué parámetros se muestran, de las motas simuladas, así como se observa en la Fig. 71.

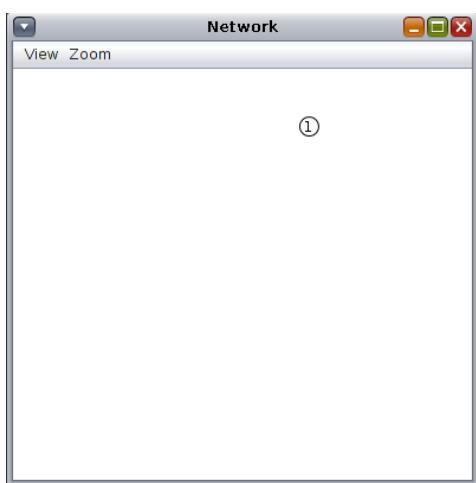


Figura 70 - Ventana del Cooja con la mota ya agregada.
Fuente propia.

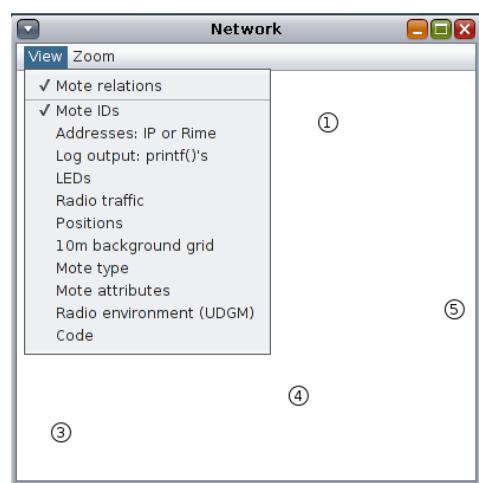


Figura 71 - Opciones de visualización.
Fuente propia.

Finalmente, pulsando el botón ‘Start’ se inicia la simulación, pudiendo observar en el cuadro de visualización el tráfico existente entre los nodos, y en el cuadro de texto los mensajes intercambiados entre ellos (Fig. 72).

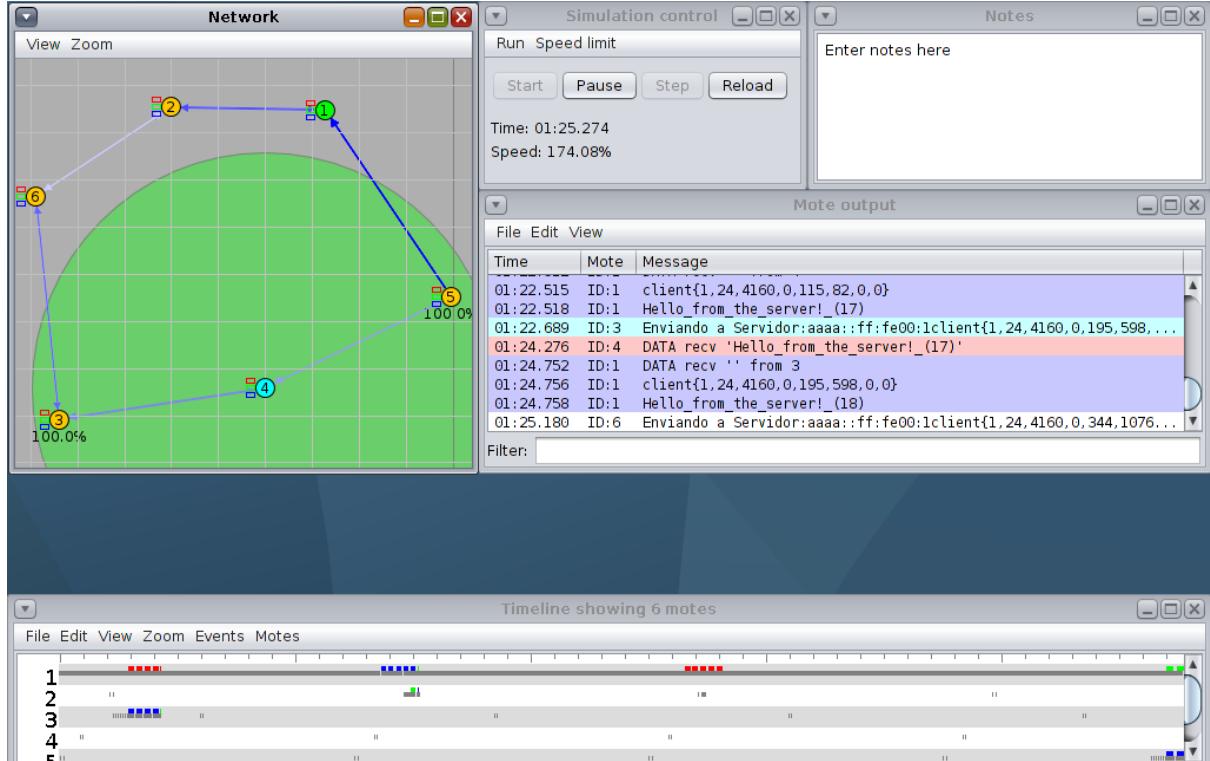


Figura 72 - Ventana del Cooja corriendo la simulación.
Fuente propia.

Estructura de los Mensajes

Para cada paquete de datos enviado por el nodo sensor, se tiene el siguiente mensaje:

```
00:16.828 ID:7 Enviando a Servidor:aaaa::ff:fe00:1client{1,24,4160,0,24,46,0,0}
```

Figura 73 - Estructura de mensaje enviado.
Fuente propia.

Donde, la primera columna representa el instante de tiempo en el que se produjo el envío del mensaje; la segunda columna representa el identificador del nodo de origen del mensaje; y la tercera columna representa el contenido del mensaje (en este caso, texto de confirmación de envío y medición de los sensores).

De igual manera, para cada paquete de datos recibido por el nodo servidor (o inclusive, el nodo actuador), se tiene el siguiente mensaje:

```
00:16.848 ID:1 DATA recv '' from 7
```

Figura 74 - Estructura de confirmación de la recepción del mensaje.
Fuente propia.

Donde, la primera columna representa el instante de tiempo en el que se produjo la recepción del mensaje; la segunda columna representa el identificador del nodo servidor que recibe el mensaje; y la tercera columna representa el contenido del mensaje (en este caso, texto de confirmación de recepción y origen del mensaje).

7 - Simulaciones y Resultados

En este capítulo se describen los escenarios elegidos como casos de estudio, en los cuales se buscó analizar la eficiencia de la transmisión de datos entre los nodos de la WSAN propuesta, y los resultados obtenidos.

De forma previa al análisis de los escenarios simulados, se buscó observar el correcto comportamiento de la red en cuanto a la comunicación entre los nodos, a fin de identificar la topología dinámica definida. Para ello, fueron desplegados nodos en el simulador Cooja, ubicados a distancias aleatorias con respectos al servidor, y se observó la forma en que se comunicaban con éste.

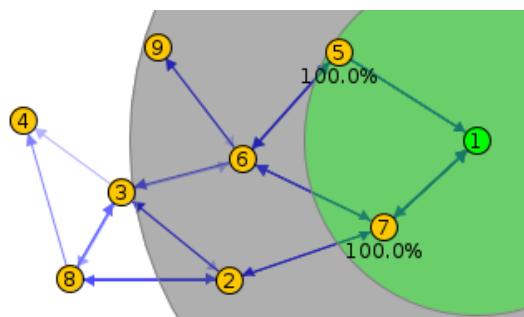


Figura 75 - Transmisión de mensajes de los nodos fuera del radio de cobertura del servidor.

Fuente propia.



Figura 76 - Transmisión de mensajes de los nodos dentro del radio de cobertura del servidor.

Fuente propia.

En la fig.75 se identifica al nodo servidor con el número 1, donde el área en color verde representa su radio de cobertura, y se puede observar cómo los nodos 5 y 7, por estar dentro de este radio, pueden transmitir directamente sus mensajes al servidor, mientras que los demás nodos deben transmitir sus mensajes a los nodos vecinos, para que éstos los retransmitan, hasta alcanzar al nodo servidor, como lo hacen los nodos 2, 3, 4, 6 y 8 en el instante de captura de la imagen.

Mientras tanto, en la fig. 76 se puede observar que, al aumentar el radio de cobertura del servidor, todos los nodos pasan a estar dentro de este radio, y los mismos pueden transmitir

sus mensajes directamente al servidor, como lo hacen los nodos 5, 8 y 9 en el instante de captura de la imagen, sin necesidad de transmitirlos a los nodos vecinos.

Por tanto, en base a las observaciones realizadas, se verificó el comportamiento dinámico de la topología mallada.

7.1 Parámetros Analizados

Como método para evaluar la calidad de la comunicación, fueron determinadas la cantidad de paquetes perdidos y la latencia promedio experimentada. Estos parámetros fueron medidos a fin de validar los requisitos temporales de la red, considerando que los intervalos de tiempo requeridos para la comunicación entre los nodos deben ser menores que los intervalos de tiempo requeridos para los procesos de actuación, a fin de ejecutar un control efectivo sobre los mismos.

7.1.1 Paquetes Perdidos.

La pérdida de paquetes ocurre cuando paquetes que viajan a través de una red, no consiguen alcanzar su destino, derivando en la pérdida de la información que contienen. Normalmente se ocasiona por la congestión de la red, aunque también puede suceder debido a señales de radio debilitadas por la distancia.

La pérdida de paquetes se mide como un porcentaje de la cantidad de paquetes que no llegan a destino, con respecto a la cantidad de paquetes que fueron enviados.

7.1.2 Latencia.

La latencia, en general, se considera como el tiempo que lleva para que una acción se consume, desde el momento en que se haya emitido el comando de inicio. En el ámbito de las redes, se considera como la suma de los retardos temporales que se dan entre el envío y la

recepción de paquetes de datos. Este retardo se produce por la demora en la propagación de los paquetes a través de la red.

Con relación a las pérdidas de paquetes, se considera que, para un intervalo de tiempo, no todos los paquetes que no hayan llegado a destino fueron perdidos, sino que, por causa de la retransmisión de éstos, la latencia que experimentan es mucho mayor que la que experimentan aquellos que sí llegaron a destino en el intervalo analizado.

7.2 Metodología del Análisis

Para el análisis, se obtuvo el detalle de los mensajes enviados por cada mota de la red, que se muestran en el cuadro de texto del Cooja; esto fue posible gracias a que el mismo permite guardar esta información en un archivo de texto (Fig. 77), en el cual posteriormente se realizó un filtrado de los mensajes de interés, a fin de comparar el número de paquetes enviados, con el número de paquetes recibidos, y los instantes de tiempo en que se produjeron.

Se compararon los resultados obtenidos en el simulador con respecto a la recepción de 800 paquetes por el servidor, en cada uno de los escenarios que se describen en el siguiente apartado, determinando el origen de estos paquetes, para luego distribuirlos según la cantidad de motas utilizadas, y así poder contrastar la cantidad de mensajes enviados al servidor, con la cantidad que efectivamente éste recibió, individualizando las motas de origen, e identificando el instante de tiempo en que se produjeron estos eventos. Para cada escenario, las simulaciones fueron realizadas tres veces, a fin de obtener un promedio de ellas.

Figura 77 – Aspecto de un archivo de texto extraído del Cooja.

Fuente propia.

El Cooja procede a la simulación de la red bajo condiciones ideales, es decir, libres de obstáculos e interferencias, tal y como se tendría en el despliegue real de una red inalámbrica en condición de línea de vista, donde, por ejemplo, el fabricante de la CM5000 estima un radio de alcance de 120 metros.

Sin embargo, para el despliegue real de una red, se espera que la presencia de diversos elementos en el entorno, sean éstos edificaciones o artefactos, reduzcan la capacidad de transmisión y recepción de los paquetes, y limiten el alcance de la red.

Por tal motivo, se implementaron variaciones en las tasas de suceso para la transmisión y recepción de datos (TX / RX), ajustables en el Cooja. Se inició con una tasa del 100%, que luego fue disminuida hasta el 50%, en intervalos de 25%, para realizar los análisis.

7.3 Descripción de los Escenarios Simulados

En este apartado se describe los escenarios de prueba considerados en este proyecto; se definieron dos escenarios, los cuales fueron denominados como “OpenAg” (Fig. 78) y “FIA-UNE” (Fig. 79). En ellos, así como se propuso en el diseño de la red WSAN, se utilizaron plataformas CM5000 para la simulación, donde una necesariamente asumía el rol de nodo servidor, y las demás de nodos sensores o actuadores. La cantidad de nodos de la red fue diferente en cada caso, atendiendo las necesidades del propio escenario.

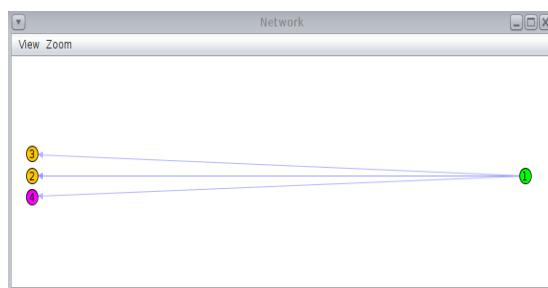


Figura 78 - Escenario de despliegue de motas para OpenAg.
Fuente propia.

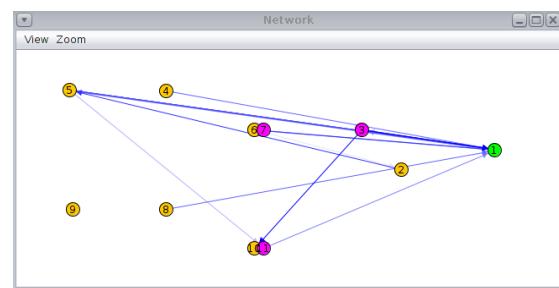


Figura 79 - Escenario de despliegue de motas para FIA-UNE.
Fuente propia.

Para cada uno de los escenarios, se consideraron las siguientes situaciones:

1. La primera, con la cual se buscó evaluar el comportamiento de la red ante la interacción de una cantidad mínima suficiente de nodos para la medición de todas las variables en cuestión.
2. La segunda, con la cual se buscó evaluar el comportamiento de la red ante un sobredimensionamiento en la cantidad de nodos.

7.3.1 OpenAg.

La *personal food computer* presentada en el apartado 4.2 fue considerada un caso ideal de aplicación de la WSAN propuesta, viendo que la misma necesita de un monitoreo constante de las variables de su interior para la ejecución de sus procesos de actuación, por lo que fue tomada como el primer escenario de estudio.

La estructura física de una *personal food computer* se compone de tubos cuadrangulares de aluminio, que actúan de soporte, y de láminas de acrílico transparente, que actúan de cubierta. Como base se emplea una plancha de madera, de espesor igual o mayor que 1.5 cm; es de tamaño reducido, cubriendo generalmente un volumen no mayor que 1 m³. En la Fig. 80 se observa un diseño hecho con Solidworks, *software* para CAD (*Computer-Aided Design*, diseño asistido por computadora) en 3D, en el cual se puede apreciar la estructura de una *personal food computer*, libre de elementos en su interior, que sigue las líneas de construcción propuestas por la OpenAg.

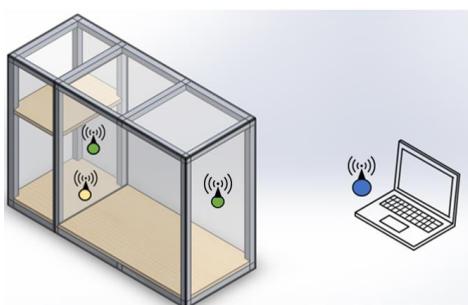


Figura 80 - Estructura de la personal food computer.
Fuente propia.

Para la implementación, tanto los nodos sensores como los nodos actuadores (representados por los nodos de colores verde y amarillo, respectivamente, en la Fig. 80) deberían ser dispuestos en el interior de la cámara, de forma fija, y se tendría al nodo servidor (representado por el nodo de color azul, en la Fig. 80) adherido a una computadora, con

distancia variable con respecto a la ubicación de la cámara, limitada únicamente por el radio de cobertura.

Primera Situación.



Figura 81 - Nodos desplegados para OpenAg, primera situación.
Fuente propia.

Como fue mencionado más arriba, el propósito de esta situación fue evaluar la interacción entre una cantidad mínima suficiente de nodos en la red, por el cual se utilizó un total de 4 nodos. La cantidad definida obedece a la necesidad de integrar en la red, básicamente, un nodo servidor, un nodo actuador, asociado a un módulo de relés, un nodo sensor, que aproveche los sensores de temperatura, humedad y luminosidad, integrados en la CM5000, y adicionalmente, un segundo nodo sensor, al cual se adhieren los sensores externos, de temperatura y conductividad eléctrica de la sustancia nutritiva, no incluidos en la plataforma. Se consideró una distancia aleatoria de 5 metros entre el nodo servidor y el pequeño invernadero.

Segunda Situación.

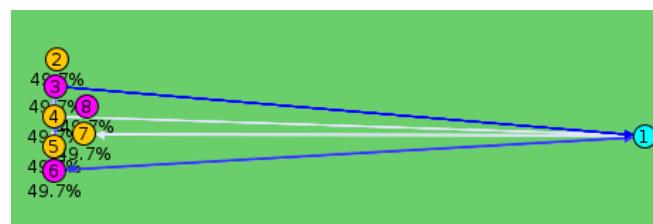


Figura 82 - Nodos desplegados para OpenAg, segunda situación.
Fuente propia.

Aquí, atendiendo al propósito de evaluar la interacción entre una cantidad sobredimensionada de nodos en la red, se utilizó un total de 8 nodos, duplicando la cantidad de

la primera situación. Nuevamente se consideró una distancia aleatoria de 5 metros entre el nodo servidor y el pequeño invernadero.

7.3.2 FIA-UNE.

A fin de simular un escenario que presente mayores necesidades que el OpenAg, en cuanto al tamaño del área a monitorear, y habiendo determinado las necesidades existentes en el lugar, mediante la visita técnica realizada, los invernaderos montados en la FIA-UNE fueron tomados como segundo escenario de simulación. La facultad cuenta con tres invernaderos, de los cuales dos poseen una superficie de 256 m², mientras que el tercero ocupa un área de 64 m². A poca distancia de estos invernaderos se encuentra la sala de control. La Fig. 83 muestra una imagen extraída de Google Maps, en la cual se aprecia la distribución de los recintos mencionados, mientras que en la Fig. 84 se aprecia un plano de planta básico, en el cual fueron señaladas las posiciones de los nodos.



Figura 83 - Imagen satelital de los invernaderos de la FIA-UNE.

Fuente: Google Maps.

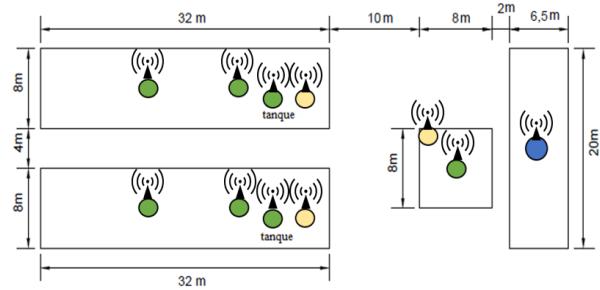


Figura 84 - Plano de planta básico de la FIA-UNE

Fuente propia.

Así como en el escenario anterior, para una posible implementación, los nodos sensores y los nodos actuadores (representados por los nodos de colores verde y amarillo, respectivamente, en la Fig. 84) deberían estar dispuestos en el interior de los invernaderos, de forma fija, mientras que el nodo servidor (representado por el nodo de color azul, en la Fig. 84) podría estar a una distancia variable, limitada únicamente por el radio de cobertura.

Primera Situación.

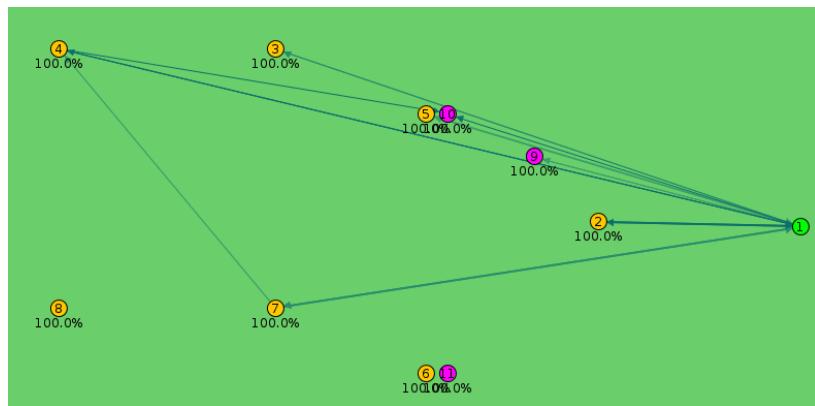


Figura 85 - Nodos desplegados para FIA-UNE, primera situación.

Fuente propia.

Atendiendo al propósito de evaluar la interacción entre una cantidad mínima suficiente de nodos en la red, se utilizó un total de 11 nodos. La cantidad definida obedece a la necesidad de integrar en la red un nodo servidor, un nodo actuador por cada invernadero, un nodo sensor en el invernadero más pequeño, y tres nodos sensores en cada uno de los invernaderos más grandes; se consideró que en estos últimos no bastaría el uso de apenas un nodo sensor para la medición de las variables ambientales, atendiendo a sus dimensiones. Se consideró para la distribución de los nodos, las ubicaciones que tendrían, de ser desplegados efectivamente en este escenario, considerándose en la simulación la distancia real fija que existiría entre ellos.

Segunda Situación.

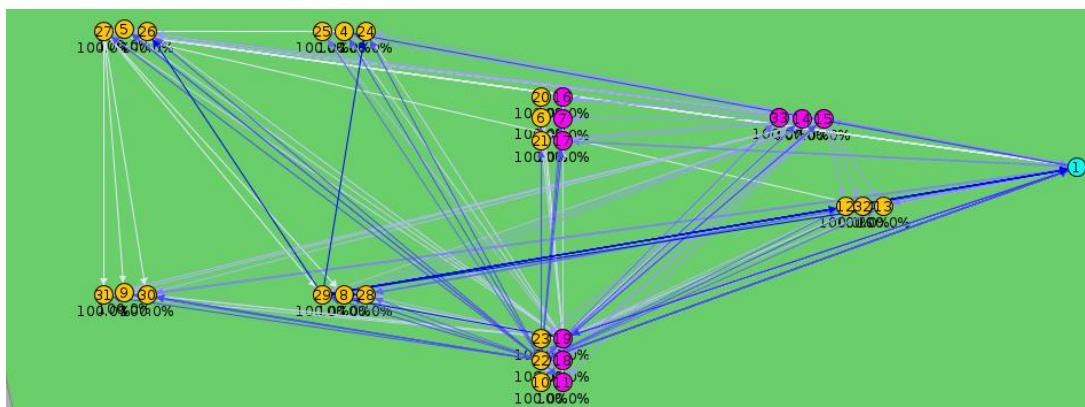


Figura 86 - Nodos desplegados para FIA-UNE, segunda situación.

Fuente propia.

Aquí, atendiendo al propósito de evaluar la interacción entre una cantidad sobredimensionada de nodos en la red, se utilizó un total de 31 nodos, triplicando la cantidad de nodos sensores y actuadores de la primera situación. Nuevamente, se consideró para la

distribución de los nodos, las ubicaciones que tendrían, de ser desplegados efectivamente en este escenario, considerándose en la simulación la distancia real fija que existiría entre ellos.

7.4 Resultados

En este apartado se describen los resultados obtenidos en cada uno de los escenarios propuestos, bajo las situaciones planteadas.

Primer Escenario.

En el escenario OpenAg, se tomaron las condiciones que se tendrían presentes para el despliegue de la red propuesta, asumiéndose las dos situaciones especificadas, de menor y mayor cantidad de nodos en la red, así como tasas de suceso en la transmisión y recepción de datos (TX / RX) del 100%, 75% y 50%.

En los cuadros siguientes, se presentan los resultados obtenidos en el análisis de la pérdida de paquetes de datos, para el escenario OpenAg, con menor cantidad de nodos.

Tabla 6 - Paquetes perdidos en el escenario OpenAg, bajo la primera situación, con TX / RX del 100%.

RX/TX Ratio	ID	Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Paquetes Perdidos	%
100%	2	267	267	0	0,00
	3	268	268	0	0,00
	4	267	267	0	0,00
Total		802	802	0	0,00

Nota. Los valores mostrados en la tabla corresponden a los valores obtenidos mediante el análisis de los mensajes intercambiados por los nodos, ante una tasa de suceso en la transmisión y recepción de paquetes del 100%. Fuente propia.

Tabla 7 - Paquetes perdidos en el escenario OpenAg, bajo la primera situación, con TX / RX del 75%.

RX/TX Ratio	ID	Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Paquetes Perdidos	%
75%	2	267	267	0	0,00
	3	267	267	0	0,00
	4	267	267	0	0,00
Total		801	801	0	0,00

Nota. Los valores mostrados en la tabla corresponden a los valores obtenidos mediante el análisis de los mensajes intercambiados por los nodos, ante una tasa de suceso en la transmisión y recepción de paquetes del 75%. Fuente propia.

Tabla 8 - Paquetes perdidos en el escenario OpenAg, bajo la primera situación, con TX / RX del 50%.

RX/TX Ratio	ID	Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Paquetes Perdidos	%
50%	2	277	247	30	10,83
	3	276	276	0	0,00
	4	277	277	0	0,00
	Total	830	800	30	3,61

Nota. Los valores mostrados en la tabla corresponden a los valores obtenidos mediante el análisis de los mensajes intercambiados por los nodos, ante una tasa de suceso en la transmisión y recepción de paquetes del 50%. Fuente propia.

En cuanto a la latencia promedio experimentada por los nodos, en el siguiente cuadro se presentan los resultados obtenidos para el escenario OpenAg, con menor cantidad de nodos, para cada una de las tasas de TX / RX.

Tabla 9 - Latencia experimentada en el escenario OpenAg, con menor cantidad de nodos.

Parámetro	ID	RX/TX Ratio (%)		
		100	75	50
Latencia (ms)	2	91	92	13628
	3	47	242	152
	4	101	96	126

Nota. Los valores mostrados en la tabla corresponden a los valores obtenidos mediante el análisis de los mensajes intercambiados por los nodos, ante las tasas de suceso en la transmisión y recepción de paquetes estudiadas. Fuente propia.

En cuanto a la pérdida de paquetes, este suceso no se hizo presente en las simulaciones hechas bajo TX / RX del 100 % y del 75%, mientras que para TX / RX del 50%, se observó una ligera pérdida de paquetes, alcanzando un porcentaje de 3,61%. Se obtuvo una tasa promedio de transmisión de datos de 0,197 paq/s.

Con respecto a la latencia promedio experimentada, se observaron resultados aproximados para TX / RX del 100% y 75%. Ya para TX / RX del 50%, la latencia promedio experimentada fue significativamente mayor en el nodo 2, coincidiendo con la pérdida de paquetes observada.

En los cuadros siguientes, se presentan los resultados obtenidos en el análisis de la pérdida de paquetes de datos, para el escenario OpenAg, con mayor cantidad de nodos.

Tabla 10 - Paquetes perdidos en el escenario OpenAg, bajo la segunda situación, con TX / RX del 100%.

RX/TX Ratio	ID	Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Paquetes Perdidos	%
100%	2	114	114	0	0,00
	3	114	114	0	0,00
	4	114	114	0	0,00
	5	115	115	0	0,00
	6	115	115	0	0,00
	7	114	114	0	0,00
	8	114	114	0	0,00
	Total	800	800	0	0,00

Nota. Los valores mostrados en la tabla corresponden a los valores obtenidos mediante el análisis de los mensajes intercambiados por los nodos, ante una tasa de suceso en la transmisión y recepción de paquetes del 100%. Fuente propia.

Tabla 11 - Paquetes perdidos en el escenario OpenAg, bajo la segunda situación, con TX / RX del 75%.

RX/TX Ratio	ID	Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Paquetes Perdidos	%
75%	2	115	115	0	0,00
	3	114	114	0	0,00
	4	114	114	0	0,00
	5	115	115	0	0,00
	6	114	114	0	0,00
	7	115	115	0	0,00
	8	114	114	0	0,00
	Total	801	801	0	0,00

Nota. Los valores mostrados en la tabla corresponden a los valores obtenidos mediante el análisis de los mensajes intercambiados por los nodos, ante una tasa de suceso en la transmisión y recepción de paquetes del 75%. Fuente propia.

Tabla 12 - Paquetes perdidos en el escenario OpenAg, bajo la segunda situación, con TX / RX del 50%.

RX/TX Ratio	ID	Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Paquetes Perdidos	%
50%	2	124	106	18	14,52
	3	124	119	5	4,03
	4	124	119	5	4,03
	5	125	120	5	4,00
	6	124	103	21	16,94
	7	124	113	11	8,87
	8	125	120	5	4,00
	Total	870	800	70	8,05

Nota. Los valores mostrados en la tabla corresponden a los valores obtenidos mediante el análisis de los mensajes intercambiados por los nodos, ante una tasa de suceso en la transmisión y recepción de paquetes del 50%. Fuente propia.

En cuanto a la latencia promedio experimentada por los nodos, en el siguiente cuadro se presentan los resultados obtenidos para el escenario OpenAg, con mayor cantidad de nodos, para cada una de las tasas de TX / RX.

Tabla 13 - Tabla 8 - Latencia experimentada en el escenario OpenAg, con mayor cantidad de nodos.

Parámetro	ID	RX/TX Ratio (%)		
		100	75	50
Latencia (ms)	2	65	122	102
	3	61	70	1391
	4	69	60	1035
	5	41	98	5253
	6	55	57	97
	7	74	56	343
	8	47	157	136

Nota. Los valores mostrados en la tabla corresponden a los valores obtenidos mediante el análisis de los mensajes intercambiados por los nodos, ante las tasas de suceso en la transmisión y recepción de paquetes estudiadas. Fuente propia.

En cuanto a la pérdida de paquetes, así como sucedió bajo la situación de menor cantidad de nodos, las pérdidas no se hicieron presentes para TX / RX del 100% y 75%, mientras que para TX / RX del 50%, las pérdidas fueron bastante significativas en casi todos los nodos, alcanzando un porcentaje de pérdida total de 8,05%. Se obtuvo una tasa promedio de transmisión de datos de 0,45 paq/s.

En cuanto a la latencia promedio experimentada, fue visible cómo, para TX / RX del 50%, los valores obtenidos para este escenario, con mayor cantidad de nodos, son mayores que los obtenidos para el mismo escenario, con menor cantidad de nodos.

En la página siguiente se presentan gráficos de las curvas correspondientes a la latencia experimentada por cada mota, en el escenario OpenAg, en las situaciones planteadas, y con las correspondientes tasas de suceso en la transmisión.

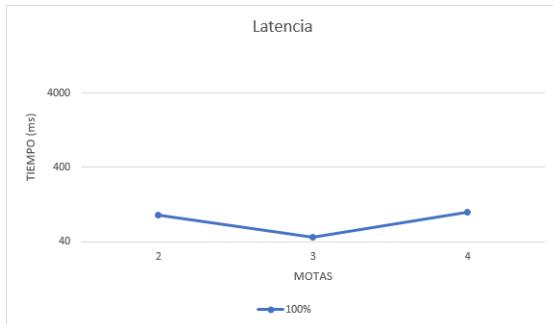


Figura 87 - Latencia promedio experimentada en el escenario OpenAg, con menor cantidad de nodos y TX / RX del 100%.
Fuente propia.

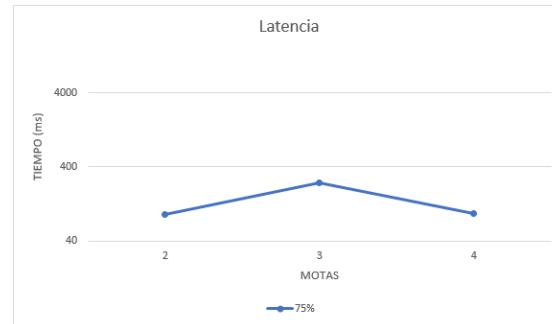


Figura 89 - Latencia promedio experimentada en el escenario OpenAg, con menor cantidad de nodos y TX / RX del 75%.
Fuente propia.

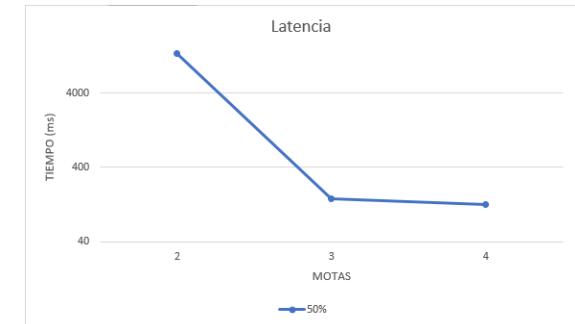


Figura 91 - Latencia promedio experimentada en el escenario OpenAg, con menor cantidad de nodos y TX / RX del 50%.
Fuente propia.

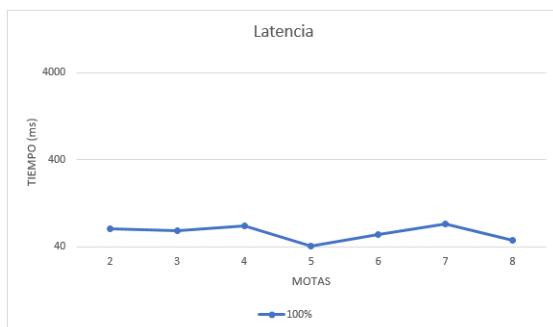


Figura 88 - Latencia promedio experimentada en el escenario OpenAg, con mayor cantidad de nodos y TX / RX del 100%.
Fuente propia.

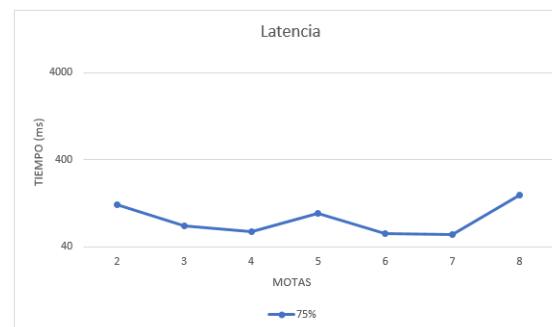


Figura 90 - Latencia promedio experimentada en el escenario OpenAg, con mayor cantidad de nodos y TX / RX del 75%.
Fuente propia.

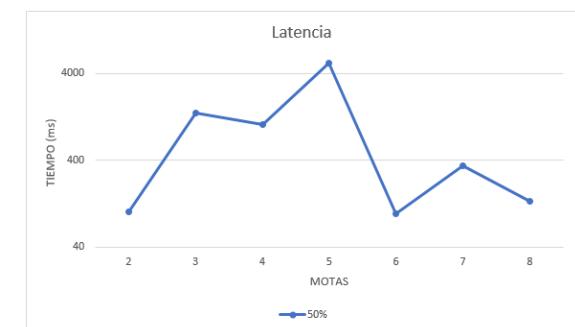


Figura 92 - Latencia promedio experimentada en el escenario OpenAg, con mayor cantidad de nodos y TX / RX del 50%.
Fuente propia.

Segundo Escenario.

En el escenario FIA-UNE, también se tomaron las condiciones que se tendrían presentes para el despliegue de la red propuesta, asumiéndose las dos situaciones especificadas, de menor y mayor cantidad de nodos en la red, así como tasas de suceso en la transmisión y recepción de datos (TX / RX) del 100%, 75% y 50%.

En los cuadros siguientes, se presentan los resultados obtenidos en el análisis de la pérdida de paquetes de datos, para el escenario FIA-UNE, con menor cantidad de nodos.

Tabla 14 - Paquetes perdidos en el escenario FIA-UNE, bajo la primera situación, con TX / RX del 100%.

RX/TX Ratio	ID	Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Paquetes Perdidos	%
100%	2	80	80	0	0,00
	3	80	80	0	0,00
	4	80	80	0	0,00
	5	80	80	0	0,00
	6	80	80	0	0,00
	7	80	80	0	0,00
	8	80	80	0	0,00
	9	80	80	0	0,00
	10	80	80	0	0,00
	11	80	80	0	0,00
	Total	800	800	0	0

Nota. Los valores mostrados en la tabla corresponden a los valores obtenidos mediante el análisis de los mensajes intercambiados por los nodos, ante una tasa de suceso en la transmisión y recepción de paquetes del 100%. Fuente propia.

Tabla 15 - Paquetes perdidos en el escenario FIA-UNE, bajo la primera situación, con TX / RX del 75%.

RX/TX Ratio	ID	Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Paquetes Perdidos	%
75%	2	80	80	0	0,00
	3	81	81	0	0,00
	4	81	81	0	0,00
	5	81	81	0	0,00
	6	80	80	0	0,00
	7	81	81	0	0,00
	8	81	80	1	1,23
	9	80	80	0	0,00
	10	80	79	1	1,25
	11	80	80	0	0,00
	Total	805	803	2	0,25

Nota. Los valores mostrados en la tabla corresponden a los valores obtenidos mediante el análisis de los mensajes intercambiados por los nodos, ante una tasa de suceso en la transmisión y recepción de paquetes del 75%. Fuente propia.

Tabla 16 - Paquetes perdidos en el escenario FIA-UNE, bajo la primera situación, con TX / RX del 50%.

RX/TX Ratio	ID	Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Paquetes Perdidos	%
50%	2	83	83	0	0,00
	3	82	82	0	0,00
	4	83	82	1	1,20
	5	83	71	12	14,46
	6	83	83	0	0,00
	7	83	83	0	0,00
	8	83	69	14	16,87
	9	82	82	0	0,00
	10	83	83	0	0,00
	11	83	83	0	0,00
	Total	828	801	27	3,26

Nota. Los valores mostrados en la tabla corresponden a los valores obtenidos mediante el análisis de los mensajes intercambiados por los nodos, ante una tasa de suceso en la transmisión y recepción de paquetes del 75%. Fuente propia.

En cuanto a la latencia promedio experimentada por los nodos, en el siguiente cuadro se presentan los resultados obtenidos para el escenario FIA-UNE, con menor cantidad de nodos, para cada una de las tasas de TX / RX.

Tabla 17 - Latencia experimentada en el escenario FIA-UNE, con menor cantidad de nodos.

Parámetro	ID	RX/TX Ratio (%)		
		100	75	50
Latencia (ms)	2	101	80	225
	3	72	113	373
	4	107	118	249
	5	105	162	12.328
	6	152	493	191
	7	162	154	305
	8	80	630	12.313
	9	115	118	194
	10	87	521	394
	11	80	133	133

Nota. Los valores mostrados en la tabla corresponden a los valores obtenidos mediante el análisis de los mensajes intercambiados por los nodos, ante las tasas de suceso en la transmisión y recepción de paquetes estudiadas. Fuente propia.

En cuanto a la pérdida de paquetes en el escenario FIA-UNE, para la menor cantidad de nodos, no se observó pérdida de paquetes bajo TX / RX del 100%, mientras que bajo TX / RX del 75%, las pérdidas observadas fueron mínimas. Como era de esperarse, bajo TX / RX del 50% se observaron pérdidas significativas en algunos nodos, habiendo visto una situación

similar en el escenario OpenAg, alcanzando un porcentaje total de pérdida de 3,26%. Se obtuvo una tasa promedio de transmisión de datos de 0,651 paq/s.

Con respecto a la latencia promedio experimentada, se observó que a medida que fue disminuyéndose la tasa de suceso TX / RX, la latencia promedio fue aumentando en cada nodo, donde, por ejemplo, para los nodos 5 y 8, se registraron valores superiores a los 12 segundos, bajo TX/RX del 50%, lo que condice con el elevado porcentaje registrado en cuanto a pérdidas de paquetes enviados por esos nodos.

En los cuadros siguientes, se presentan los resultados obtenidos en el análisis de la pérdida de paquetes de datos, para el escenario FIA-UNE, con mayor cantidad de nodos.

Tabla 18 - Paquetes perdidos en el escenario FIA-UNE, bajo la segunda situación, con TX / RX del 100%.

RX/TX Ratio	ID	Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Paquetes Perdidos	%
100%	2	27	27	0	0,00
	3	26	26	0	0,00
	4	26	26	0	0,00
	5	27	27	0	0,00
	6	27	27	0	0,00
	7	27	27	0	0,00
	8	27	27	0	0,00
	9	27	27	0	0,00
	10	26	26	0	0,00
	11	26	26	0	0,00
	12	27	27	0	0,00
	13	27	27	0	0,00
	14	26	26	0	0,00
	15	27	27	0	0,00
	16	27	27	0	0,00
	17	27	27	0	0,00
	18	27	27	0	0,00
	19	27	27	0	0,00
	20	27	27	0	0,00
	21	26	26	0	0,00
	22	27	27	0	0,00
	23	26	26	0	0,00
	24	27	27	0	0,00
	25	27	27	0	0,00
	26	27	27	0	0,00
	27	26	26	0	0,00
	28	27	27	0	0,00
	29	27	27	0	0,00
	30	27	27	0	0,00
	31	27	27	0	0,00
Total		802	802	0	0,00

Nota. Los valores mostrados en la tabla corresponden a los valores obtenidos mediante el análisis de los mensajes intercambiados por los nodos, ante una tasa de suceso en la transmisión y recepción de paquetes del 100%. Fuente propia.

Tabla 19 - Paquetes perdidos en el escenario FIA-UNE, bajo la segunda situación, con TX / RX del 75%.

RX/TX Ratio	ID	Paquetes Envíados	Paquetes Recibidos	Paquetes Perdidos	%
75%	2	26	26	0	0,00
	3	27	27	0	0,00
	4	26	26	0	0,00
	5	27	27	0	0,00
	6	27	26	1	3,70
	7	27	27	0	0,00
	8	27	27	0	0,00
	9	27	27	0	0,00
	10	26	26	0	0,00
	11	27	26	1	3,70
	12	27	27	0	0,00
	13	27	27	0	0,00
	14	27	27	0	0,00
	15	26	26	0	0,00
	16	26	26	0	0,00
	17	27	27	0	0,00
	18	27	27	0	0,00
	19	27	27	0	0,00
	20	27	27	0	0,00
	21	27	27	0	0,00
	22	27	27	0	0,00
	23	27	27	0	0,00
	24	27	27	0	0,00
	25	27	27	0	0,00
	26	27	27	0	0,00
	27	26	26	0	0,00
	28	27	27	0	0,00
	29	26	26	0	0,00
	30	27	27	0	0,00
	31	27	27	0	0,00
Total		803	801	2	0,25

Nota. Los valores mostrados en la tabla corresponden a los valores obtenidos mediante el análisis de los mensajes intercambiados por los nodos, ante una tasa de suceso en la transmisión y recepción de paquetes del 75%. Fuente propia.

Tabla 20 - Paquetes perdidos en el escenario FIA-UNE, bajo la segunda situación, con TX / RX del 50%.

RX/TX Ratio	ID	Paquetes Envíados	Paquetes Recibidos	Paquetes Perdidos	%
50%	2	30	30	0	0,00
	3	30	22	8	26,67
	4	30	24	6	20,00
	5	30	30	0	0,00
	6	30	27	3	10,00
	7	30	30	0	0,00
	8	30	30	0	0,00
	9	30	30	0	0,00
	10	30	28	2	6,67
	11	30	30	0	0,00
	12	29	24	5	17,24
	13	29	23	6	20,69
	14	30	20	10	33,33
	15	29	26	3	10,34
	16	30	20	10	33,33
	17	30	25	5	16,67
	18	30	24	6	20,00
	19	29	27	2	6,90
	20	30	20	10	33,33
	21	30	30	0	0,00
	22	30	30	0	0,00
	23	30	30	0	0,00
	24	30	27	3	10,00
	25	30	28	2	6,67
	26	30	26	4	13,33
	27	30	30	0	0,00
	28	29	27	2	6,90
	29	30	30	0	0,00
	30	30	25	5	16,67
	31	30	27	3	10,00
Total		895	800	95	10,60

Nota. Los valores mostrados en la tabla corresponden a los valores obtenidos mediante el análisis de los mensajes intercambiados por los nodos, ante una tasa de suceso en la transmisión y recepción de paquetes del 50%. Fuente propia.

En cuanto a la latencia promedio experimentada por los nodos, en el siguiente cuadro se presentan los resultados obtenidos para el escenario FIA-UNE, con mayor cantidad de nodos, para cada una de las tasas de TX / RX.

Tabla 21 - Latencia experimentada en el escenario FIA-UNE, con mayor cantidad de nodos.

Parámetro	ID	RX/TX Ratio (%)		
		100	75	50
Latencia (ms)	2	149	163	7.573
	3	114	810	40.457
	4	151	233	51.781
	5	164	869	3.174
	6	166	153	18.026
	7	133	9.316	650
	8	159	136	1.589
	9	165	1.110	3.860
	10	105	104	19.564
	11	99	225	16.547
	12	132	2.904	22.738
	13	267	936	24.185
	14	2.120	221	89.270
	15	133	630	30.019
	16	70	828	62.430
	17	141	380	20.069
	18	203	209	29.868
	19	63	1.092	30.462
	20	74	344	96.622
	21	100	670	756
	22	113	317	545
	23	76	177	1.904
	24	339	772	24.356
	25	158	1.063	32.712
	26	109	162	21.325
	27	99	564	413
	28	173	153	19.048
	29	98	232	645
	30	178	278	27.143
	31	127	223	18.210

Nota. Los valores mostrados en la tabla corresponden a los valores obtenidos mediante el análisis de los mensajes intercambiados por los nodos, ante las tasas de suceso en la transmisión y recepción de paquetes estudiadas. Fuente propia.

En cuanto a la pérdida de paquetes, no fue observada ninguna bajo TX / RX del 100%, mientras que la observada bajo TX / RX del 75% fue mínima. Nuevamente, la pérdida observada bajo TX / RX del 50% fue bastante notoria, alcanzando el porcentaje total de pérdidas del 10,6%. Se obtuvo una tasa promedio de transmisión de datos de 1,88 paq/s.

Con respecto a la latencia promedio experimentada, nuevamente los valores fueron aumentando a medida que la tasa de suceso era disminuida, superando los 80.000 ms en el caso de los nodos 14 y 20, bajo TX/RX del 50%, justificando la elevada pérdida de paquetes que presentaron.

En la página siguiente se presentan gráficos de las curvas correspondientes a la latencia experimentada por cada mota, en el escenario FIA-UNE, en las situaciones planteadas, y con las correspondientes tasas de suceso en la transmisión.

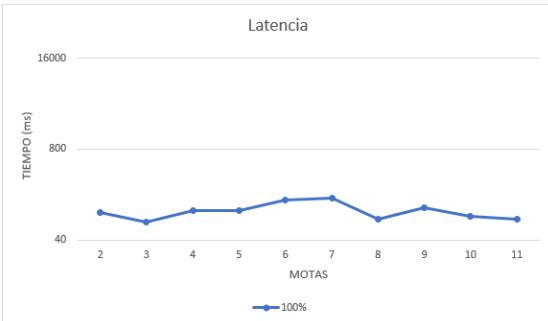


Figura 93 - Latencia promedio experimentada en el escenario FIA-UNE, con menor cantidad de nodos y TX / RX del 100%.
Fuente propia.

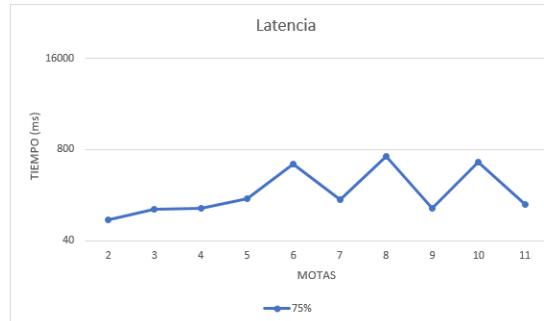


Figura 95 - Latencia promedio experimentada en el escenario FIA-UNE, con menor cantidad de nodos y TX / RX del 75%.
Fuente propia.

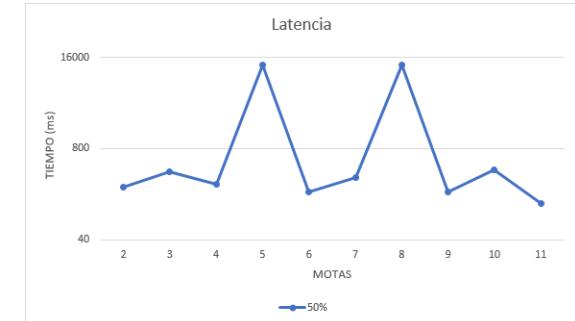


Figura 97 - Latencia promedio experimentada en el escenario FIA-UNE, con menor cantidad de nodos y TX / RX del 50%.
Fuente propia.

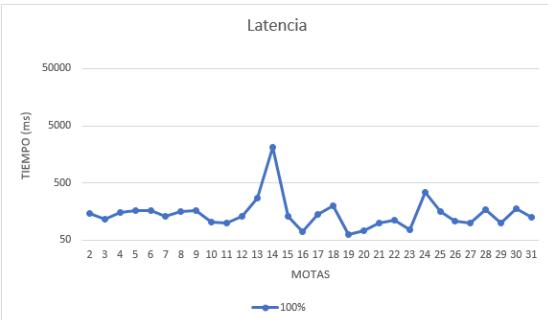


Figura 94 - Latencia promedio experimentada en el escenario FIA-UNE, con mayor cantidad de nodos y TX / RX del 100%.
Fuente propia.

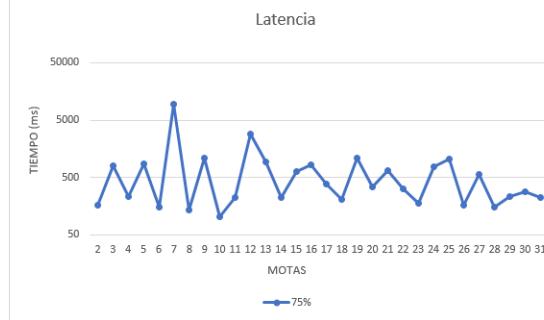


Figura 96 - Latencia promedio experimentada en el escenario FIA-UNE, con mayor cantidad de nodos y TX / RX del 75%.
Fuente propia.

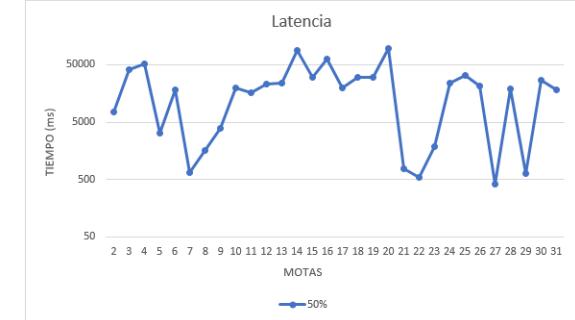


Figura 98 - Latencia promedio experimentada en el escenario FIA-UNE, con mayor cantidad de nodos y TX / RX del 50%.
Fuente propia.

Las Fig. 99 y 100 indican la relación de paquetes perdidos frente a la tasa de suceso en la transmisión y recepción de datos, para cada escenario, donde se observa un patrón de comportamiento similar para ambos casos, frente a las tasas de suceso adoptadas.

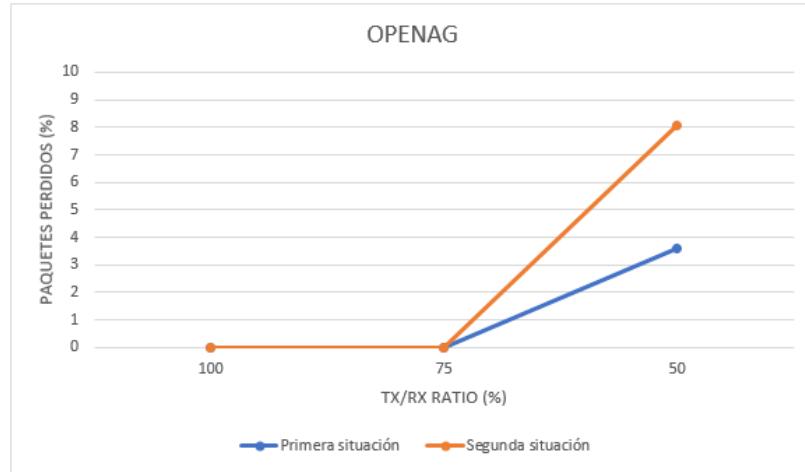


Figura 99 - Relación de paquetes perdidos frente a TX/RX para OpenAg.
Fuente propia.

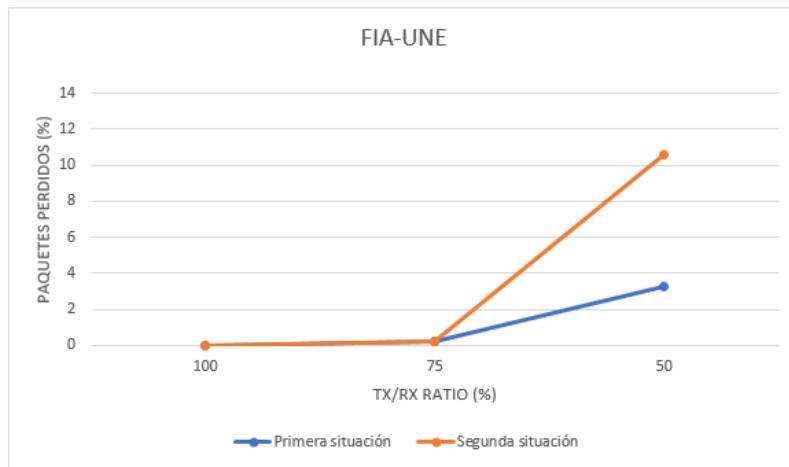


Figura 100 - Relación de paquetes perdidos frente a TX/RX para FIA-UNE.
Fuente propia.

El análisis de las simulaciones realizadas permitió determinar cómo afecta el aumento del número de nodos en la red, sobre la pérdida de paquetes y la latencia experimentada; el aumento de estos parámetros fue observado en ambos escenarios simulados. También se observó el aumento que sufrirían estos parámetros ante situaciones de baja tasa de suceso en la

transmisión y recepción de datos, considerándose que estas situaciones estarían constantemente presentes ante cualquier escenario de despliegue real de la red.

Altas tasas de transmisión de datos pueden derivar en el congestionamiento de la red, lo que también contribuye al aumento en las pérdidas de paquetes y la latencia, debido a que, a medida que aumenta el número de nodos, son enviados más paquetes hacia el servidor.

Con respecto a los requisitos temporales de la red, se observó que, para todos los escenarios estudiados, bajo las situaciones planteadas, la latencia experimentada fue inferior al orden de las centenas de segundos, siendo registrado un tiempo de 41 ms, en el mejor de los casos, y de 96.622 ms, en el peor de los casos.

Para la mayoría de las aplicaciones de las tecnologías de la comunicación, una latencia experimentada superior a 1.000 ms sería inaceptable. Sin embargo, como fue visto en el apartado 5.5, el requisito temporal para el asentamiento de una señal de control está en el orden de las centenas de segundos, por lo que, inclusive si se experimentase una latencia como la registrada en el peor de los casos, ésta aún sería inferior al requisito temporal mencionado, haciendo que la red pueda efectivamente ejecutar un esquema de control.

8 - Conclusiones y Trabajos Futuros

La ejecución de las actividades propuestas, en el marco del desarrollo de este proyecto, presentaron muchas perspectivas con respecto a la tecnología estudiada, las cuales se describen en este capítulo.

8.1 Conclusión

El análisis de la tecnología implementada en los invernaderos hidropónicos, a nivel país, permitió determinar una carencia de soluciones propias, para la automatización de los procesos que se desarrollan en el interior de estos recintos, teniendo que recurrir a propuestas extranjeras a fin de implementar procesos automatizados, mientras que el análisis de la literatura permitió identificar una creciente expansión de aplicaciones con tecnología WSAN, en los últimos años, en diversas ramas de la agricultura, siendo la hidroponía una de las que más puede beneficiarse del uso de éstas.

Las entrevistas con profesionales del área de la hidroponía arrojaron como resultado el interés de este sector por herramientas que permitan el monitoreo de variables tanto físicas (temperatura, humedad, y luminosidad del ambiente) como químicas (conductividad eléctrica de la sustancia), considerando de interés, para el desarrollo de las actividades productivas, disponer de esta información de forma precisa y constante.

Atendiendo al planteamiento del problema abordado en este proyecto, se presentó la arquitectura de un sistema para el monitoreo de parámetros tratados por los procesos seleccionados, a través de una red inalámbrica de topología dinámica y autoconfigurable, para la ejecución de tareas de control sobre procesos de actuación, en base a las mediciones realizadas. Del estudio de las tecnologías existentes hoy en día, pudieron identificarse aquellas que harían del diseño de una red WSAN, una tarea más sencilla, optándose por el uso

de la plataforma CM5000, el sistema operativo Contiki y el éstandar 6LoWPAN como principales componentes de la WSAN.

Se verificó mediante simulación que los requisitos temporales para el envío y la recepción de datos, entre los nodos de la red, son inferiores, y por lo tanto compatibles, con el tiempo para el asentamiento de la señal de control de un proceso, por lo que se concluye que la dinámica del sistema propuesto permitiría la implementación de un esquema de control.

8.3 Propuestas

Habiendo verificado la viabilidad del uso de la WSAN para la aplicación considerada, se alienta al uso de esta herramienta, tomando este trabajo de investigación como un anteproyecto que siente las bases para su implementación, buscando una mayor integración de los conceptos de las tecnologías de la información y comunicación, con los conocimientos de la ingeniería agronómica, así como también con los de la ingeniería electromecánica, convencionalmente aplicados para la ejecución de proyectos de automatización en invernaderos.

Así, se propone la implementación de la red diseñada en un invernadero de características similares a la propuesta de la iniciativa OpenAg, del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), la cual busca la integración de profesionales de distintos sectores para el desarrollo de plataformas tecnológicas *open source*, mirando hacia la exploración de los futuros sistemas de producción de alimentos. En el Anexo II de este libro se incluye un resumen ejecutivo, elaborado para su presentación a la Fundación Parque Tecnológico Itaipú – Paraguay (FPTI-PY), con respecto al montaje de una *personal food computer*.

También, se propone considerar la implementación de la WSAN en un invernadero hidropónico, destinado a la producción comercial de hortalizas. En el Anexo III de este libro

se incluye el presupuesto de la empresa Hidropar para el montaje de un invernadero de 189 m².

8.4 Trabajos Futuros.

Como líneas de trabajo futuro, se sugieren las siguientes:

- El diseño de una estación base, dotada de una interfaz gráfica, para la visualización de los parámetros monitoreados, junto con los controles disponibles, y el acceso a la información recolectada desde cualquier punto, mediante la conexión a la Internet.
- El diseño de un sistema automatizado para la dosificación de nutrientes, compatible con la tecnología WSAN.
- El diseño de un pequeño invernadero hidropónico, que siga las líneas constructivas del OpenAg, para la implementación de la red diseñada, a fin de evaluar su comportamiento, y determinar efectivamente los beneficios que proporciona el uso de esta tecnología para el crecimiento de los cultivos.
- La aplicación de la red propuesta en este proyecto a un invernadero de escala comercial, incluyendo la selección de los actuadores necesarios para la ejecución de procesos sobre las variables monitoreadas.

Referencias Bibliográficas

Abbasi, A., Islam, N. y Shaikh, Z. (2014). A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces*, 36(2), 263-270.

An Introduction to Cooja. (2016). Recuperado de <https://github.com/contiki-os/contiki/wiki/An-Introduction-to-Cooja>. Visitado el: 04/07/2017.

Asolkar, P.S. and Bhadade, U.S., 2015, February. An Effective Method of Controlling the Greenhouse and Crop Monitoring Using GSM. *Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA), 2015 International Conference on* (pp. 214-219). IEEE.

Ávila, Ó. (2011). *Migración del protocolo IPv4 a IPv6*.

Bhat, N. (2012). Design and implementation of IEEE 802.15. 4 Mac protocol on FPGA. *arXiv preprint arXiv:1203.2167*.

Buenas prácticas agrícolas -BPA- en la producción de tomate bajo condiciones protegidas. (2007). Organización de las Naciones Unidad para la Agricultura y la Alimentación.

Cáceres, G., Quiñónez, G., Aranda, L., Guerrero, A. y Arzamendia, M. (Octubre del 2016). Diseño de una red WSAN para la aplicación de un control de climatización en invernaderos. *Aranducon 2016*. Congreso llevado a cabo en Asunción, Paraguay.

Caprile, S., (2009). *Equisbí, Desarrollo de aplicaciones con comunicación remota basadas en módulos Zigbee y 802.15.4*. Buenos Aires, Argentina: Gran Aldea Editores.

Carrasco, G., Izquierdo, J. (1996). *La empresa hidropónica de mediana escala: la técnica de la solución nutritiva recirculante ("NFT")*. Manual Técnico. Talca, Chile: Universidad de Talca.

Castro, J. y Marques, J. (Ed. 1). (2009). *Agricultura de Precisão*. Lisboa, Portugal: Associação dos Jovens Agricultores de Portugal (AJAP).

Cazar, J., Abad, L. (2014). *Estudio y diseño de qos para una red de internet, datos y voip* (Tesis de pregrado). Universidad de Israel, Ecuador.

Contiki. (s.f). Recuperado de <http://www.contiki-os.org/>. Visitado: 04/07/2017.

Costa. M., y Amaral. J. (2012). *Analysis of wireless industrial automation standards: ISA-100.11a and WirelessHART*. InTech Magazine. Recuperado de <https://www.isa.org/standards-publications/isa-publications/intech-magazine/2012/december/web-exclusive-analysis-wireless-industrial-automation-standards-isa-100-11a-wirelesshart/>.

Crossbow. (sf). *Imote 2, high-performance wireless sensor network node*. Recuperado de http://wsn.cse.wustl.edu/images/e/e3/Imote2_Datasheet.pdf.

CupCarbon. (s.f). Recuperado de <http://www.cupcarbon.com/>. Visitado el: 04/07/2017.

De la Cruz, A. (2006). *El papel de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) en la alimentación y la agricultura: Un estudio de la cooperación FAO* (Tesis de maestría). Universidad de Málaga, España.

Dos Santos, R., Moreiras, A., Reis, E. y Da Rocha, A. (2010). *Curso IPV6 básico*. San Paulo, Brasil: CEPTRON.br.

Douglas, J. (1987). *Hidroponia, Cultura sem Terra*. (Z. Ziller, Trans.). São Paulo, Brasil: Nobel. (Trabajo original publicado en 1984).

El uso de la tecnología de la información en la agricultura de las economías del Foro de Cooperación Económica Asia-Pacífico (APEC) y más allá (Noviembre, 2016). Foro Global sobre Seguridad Alimentaria y Nutrición. Foro dirigido por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), China.

Erazo, M., Rivas, D., Pérez, M., Galarza, O., Bautista, V., Huerta, M. and Rojo, J.L., 2015, February. Design and implementation of a wireless sensor network for rose greenhouses monitoring. *Automation, Robotics and Applications (ICARA), 2015 6th International Conference on* (pp. 256-261). IEEE.

Escolar, S., Carretero, J., Calderón, A., Marinescu, M. y Bergua. B. (2011). A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(2), 252-265.

Fernández R., Ordieres J., Martínez F., González A., Alba F., Lostado R. y Pernía A. (2009). *Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica*. Madrid, España: Universidad de la Rioja.

Ferratto, M. y Panelo, M. (2003). Climatización de Invernaderos. *IDIA XXI*, 3(4), 160-163.

Fogel,G. (2013). *Diseño de estaciones experimentales basados en módulos invernaderos climatizados para la práctica de ensayos climáticos sobre los principales cultivos del*

Paraguay. (Tesis final de grado). Facultad Politécnica. Universidad Nacional de Asunción, Paraguay.

Garcia, E. y Flego, F. (Ed. 8). (2008). *Agricultura de Precisión.* Revista Ciencia y Tecnología. Palermo, Argentina: Universidad de Palermo.

Gilsanz, J. (2007). *Hidroponía.* Montevideo, Uruguay: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA).

Grupo de Cultivos Hortícolas. (2002). *El cultivo protegido en clima mediterráneo.* Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).

Guerrini, F., (18/02/2015). The Future of Agriculture? Smart Farming. *Forbes.* Recuperado de <https://www.forbes.com/sites/federicoguerrini/2015/02/18/the-future-of-agriculture-smart-farming/#3eaaba8d3c42>.

Halonen, T., Romero, J. y Melero, J. (Ed. 2). (2003). *GSM, GPRS and EDGE performance: evolution towards 3G/UMTS.* John Wiley & Sons. Inglaterra: Jhon Wiley & Sons, Ltd.

Hansman, H. (2015). What Is a Personal Food Computer? A farm the size of a desktop could change the way we grow food in cities. *Smithsonian.com.* Recuperado de <http://www.smithsonianmag.com/innovation/what-is-a-personal-food-computer-180956085/>.

Hu, F. y Cao, X. (2010). *Wireless Sensor Network: Principles and Practice*. Estados Unidos: CRC Press.

Ibersystems. (s.f.). *Redes WiMAX. Redes WiMAX.* Recuperado de <http://www.redeswimax.info/>. Visitado: 03/07/2017.

Inamasu, R. y Bernardi, A. (2014). Agricultura de precisão. En Bernardi, A., Naime, J., Resende, A., Bassoi, L. e Inamasu, R. *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar* (pp. 21-33). Brasilia, Brasil: Embrapa.

Keshtgari, M. y Deljoo, A. (2012). A wireless sensor network solution for precision agriculture based on zigbee technology. *Wireless Sensor Network*, 4(1), 25.

Libelium. (2016). *Wasp mote Datasheet.* Recuperado de http://www.libelium.com/downloads/documentation/waspmote_datasheet.pdf.

Liñán, A., Vives, A., Bagula, A., Zennaro, M. y Pietrosemoli, E. (2015). *Internet de las Cosas*. Italia: ICTP.

Maya, E. (2014). *Red inalámbrica de sensores a través de 6loWPAN para una agricultura de precisión aplicado en la Hacienda Cananvalle de la Ciudad de Ibarra*. (Tesis de maestría). Pontificia Universidad del Ecuador, Ecuador.

McFarland, Matt. (2015). Inside an MIT researcher's grand plan to create the personal food computer. *The Washington Post.* Recuperado de

https://www.washingtonpost.com/news/innovations/wp/2015/06/17/inside-an-mit-researchers-grand-plan-to-create-the-personal-food-computer/?utm_term=.8e218663e8b8.

Melodia, T., Pompili, D., Gungor, V. y Akyildiz, I. (2007). Communication and coordination in wireless sensor and actor networks. *IEEE transactions on mobile computing*, 6(10).

Memsic. (s.f.). *Iris, wireless measurement system.* Recuperado de http://www.memsic.com/userfiles/files/DataSheets/WSN/IRIS_Datasheet.pdf.

Milinković, A., Milinković, S. y Lazić, L. (2015). Choosing the right RTOS fot IoT platform. *International Symposium INFOTEH- JAHRINA*. (14), 504-509.

Misra, S., Kumar, M., & Obaidat, M. (2011). Connectivity preserving localized coverage algorithm for area monitoring using wireless sensor networks. *Computer Communications*, 34(12), 1484-1496.

Narayanan, R., Sarath, T. y Vineeth, V. (2016). Survey on motes used in wireless sensor networks: Performance & parametric analysis. *Wireless Sensor Network*, 8(04), 51.

Navarro, H. (2011). *Diseño e implementación de componentes software para dar soporte a la plataforma MEWiN en el sistema operativo Contiki.* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia.

NetLogo. (s.f). Recuperado de <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Visitado el: 04/07/2017.

NS-3. (s.f). Recuperado de <https://www.nsnam.org/>. Visitado el: 04/07/2017.

Oasis Easy Plant (s.f). *Manual de Hidroponía*. Monterrey, México: Smithers Oasis.

Ojha, T., Misra, S. y Raghuwanshi, N. S. (2015). Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 66-84.

OpenAg. (s.f). Project, Personal Food Computer. *MIT Media Lab*. Recuperado de <https://www.media.mit.edu/projects/personal-food-computer/overview/>. Visitado el: 05/07/2017.

Plant, R. (2001). Site-specific management: the application of information technology to crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30(1), 9-29.

Recio, B., Valero, C. y Diezma, B. (2009). *Las tecnologías de la información en la agricultura, una asignatura pendiente*. Recuperado de http://oa.upm.es/5333/2/INVE_MEM_2009_70503.pdf.

Reusing, T. (2012). Comparison of operating systems tinyos and contiki. *Sens. Nodes-Operation, Netw. Appli.(SN)*, 7.

Römer, K. y Mattern, F. (2004). The design space of wireless sensor networks. *IEEE wireless communication*, 11(6), 54-61.

Saad, S.M., Kamarudin, L.M., Kamarudin, K., Nooriman, W.M., Mamduh, S.M., Zakaria, A., Shakaff, A.Y.M. and Jaafar, M.N., 2014, August. A real-time greenhouse monitoring system for mango with Wireless Sensor Network (WSN). *Electronic Design (ICED), 2014 2nd International Conference on* (pp. 521-526). IEEE.

Shelby, Z. y Bormann, C. (2011). 6LoWPAN: *The wireless embedded Internet* (Vol. 43). John Wiley & Sons, Ltd.

Siegel, R. (s.f.). The rise of food computers. *Eniday*. Recuperado de https://www.eniday.com/en/sparks_en/food-computers-replace-farms/. Visitado el: 05/07/2017.

Silva, I., Guedes, L., Portugal, P. y Vasques, F. (2012). Reliability and availability evaluation of wireless sensor networks for industrial applications. *Sensors*, 12(1), 806-838.

TinyOS. (2013). TinyOS Documentation Wiki. *TinyOS*. Recuperado de http://tinyos.stanford.edu/tinyos-wiki/index.php/TinyOS_Documentation_Wiki. Visitado: 04/07/2017.

Wehrle, K., Günes, M. y Gross, J. (Eds.). (2010). *Modeling and tools for network simulation*. Springer Science & Business Media.

Younis, M., Senturk, I., Akkaya, K., Lee, S. y Senel, F. (2014). Topology management techniques for tolerating node failures in wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 58, 254-283.

Zolertia. (2010). *ZI Datasheet*. Recuperado de
http://zolertia.sourceforge.net/wiki/images/e/e8/Z1_RevC_Datasheet.pdf.

Anexo I

Artículo – *Diseño de una red WSAN para la aplicación de un control de climatización en
invernaderos*

Diseño de una red WSAN para la aplicación de un control de climatización en invernaderos

Gabriela Cáceres *, Gustavo Quiñónez*, Ariel Guerrero*, Mario Arzamendia⁺⁺ y Ladislao Aranda*

*Centro de Investigación Científico, Tecnológico e Innovación Avanzada (CICTIA)

Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción" (UCA) – Hernandarias, Paraguay

Email: gabicaceres1594@gmail.com, gustavo_quinonez@hotmail.com, ladislao.aranda@uc.edu.py

^Centro de Innovación en Automatización y Control (CIAC)

Parque Tecnológico Itaipú (PTI) – Hernandarias, Paraguay

Email: Ariel.guerrero@pti.org.py

→ Laboratorio de Sistemas Distribuidos

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción (FIUNA) – Asunción, Paraguay

Email: marzamendia@ing.una.py

Resumen— De entre las áreas de aplicación de las redes inalámbricas de sensores y actuadores (WSAN, del inglés *Wireless Sensor and Actuator Networks*), la agricultura de precisión presenta escenarios sumamente atractivos para la aplicación de esta tecnología. La utilización de tecnologías de información junto con buenas prácticas agrícolas permitirá obtener mayores beneficios de los cultivos. El presente artículo realiza una revisión del estado del arte de la aplicación de WSAN en la agricultura de precisión, casos de éxito, perspectivas y desafíos. Basado en este análisis, y enfocándose en los cultivos dentro de invernaderos, los cuales requieren de una tecnología de climatización adecuada para que funcione como cámara de ensayo, se estudian los procesos intervinientes en la climatización (refrigeración, humidificación, deshumidificación, calefacción, mezcla de aire y retorno exterior, fertilización carbónica, riego automático). Teniendo en cuenta estos subsistemas, se propone el diseño de una arquitectura WSAN aplicada para un caso específico en un invernadero. Esta arquitectura, desde el punto de la teoría de control, se constituirá en un sistema de control de bajo costo aplicado a los diversos procesos de climatización y adquisición de datos provenientes de ensayos.

Keywords— wsan; agricultura de precisión; invernadero; controlador pid

Abstract— Among the application areas of wireless networks of sensors and actuators (WSAN, Wireless Sensor and Actuator Networks), precision agriculture presents extremely attractive scenarios for the application of this technology. The uses of information technology along with good agricultural practices allow higher profits crop. This article makes a review of the state of the art of applying WSAN in precision agriculture, success stories, perspectives and challenges. Based on this analysis, and focusing on crops inside greenhouses, which require adequate cooling technology to function as test chamber, the processes involved in air conditioning (cooling, humidification, deshumidification, heating, and outdoor air mixture return, carbon dioxide fertilization, irrigation) are studied. Given these subsystems, the design of a WSAN architecture applied to a

specific case in a greenhouse is proposed. This architecture, from the point of control theory, will become a low-cost control system applied to various processes of climatizing and data acquisition from trials.

Keywords— wsan; precision agriculture; greenhouse; pid controller

I. INTRODUCCIÓN

Los últimos avances en ciencia e ingeniería han permitido implementar soluciones de WSANs para un creciente número de aplicaciones. Entre las principales ventajas de esta tecnología se puede resaltar la posibilidad de instalar una red de puntos de medición y/o actuación, facilitando su despliegue gracias a su comunicación inalámbrica. Uno de los campos de aplicación de las WSANs es la agricultura de precisión, en la que se utilizan sistemas de monitoreo y control para obtener mejores resultados, ya que pueden optimizar las condiciones ajustándose a las características y necesidades de cada cultivo; pueden ser utilizadas para predecir la salud de los cultivos y la calidad de la producción a través del tiempo, con el monitoreo de los niveles de nutrientes del suelo; predecir también los intervalos de riego con el monitoreo tanto de los niveles de humedad del suelo como de las condiciones climáticas [1]; y determinar el momento ideal para la siembra y cosecha, constituyéndose como herramientas para estimar, evaluar y comprender los cambios que ocurren en los cultivos [2].

Estos sistemas logran el monitoreo de parámetros ambientales mediante nodos sensores inalámbricos, también conocidos como motas. Debido a que las WSANs son escalables, redes ya desplegadas pueden ser mejoradas simplemente aumentando el número de motas que componen su arquitectura, para el monitoreo de parámetros adicionales [1]. Normalmente toda la información es recolectada hacia una estación base o sumidero donde se procesa y convierte en información útil para el usuario, además de enviar comandos a determinados nodos para ejecutar acciones [3].

Los invernaderos son cámaras diseñadas con el fin de mantener ambientes controlados en cultivos. Son estructuras montadas con material translúcidos o transparentes para obtener la iluminación solar, pero cerradas de tal manera que puedan ser regulados otros factores como la temperatura, la luminosidad o los niveles de CO₂ [4]. El sistema de control de un invernadero posee diferentes subsistemas, que por un lado miden el valor de cada una de estas variables, y por otro lado lo ajustan para el valor deseado. Es decir, existen un subsistema para refrigeración, humidificación, deshumidificación, calefacción, mezcla de aire, fertilización carbónica, riego automático [5].

La manera de controlar el ambiente es implementando un lazo de control. Uno de los algoritmos de control ampliamente utilizado es el controlador PID (Fig. 1), que históricamente ha sido utilizado cuando no se tiene un conocimiento del proceso. Este control calcula la desviación o error de un valor medido, con respecto al deseado. El algoritmo del control PID consiste en tres parámetros distintos: el Proporcional, el Integral, y el Derivativo. El valor Proporcional depende del error actual; el Integral depende de los errores pasados; y el Derivativo es una predicción de los errores futuros. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso por medio de un elemento de control.

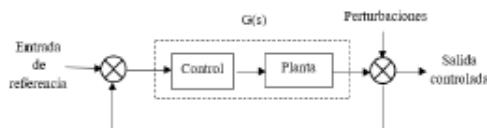


Fig. 1. Diagrama de bloques de un sistema controlado

Para el correcto funcionamiento de un controlador PID que regule un proceso o sistema, se necesita al menos:

- Un sensor, que determine el estado del sistema (termómetro, caudalímetro, manómetro, etc).
- Un controlador, que genere la señal que gobierna al actuador.
- Un actuador, que modifique al sistema de manera controlada (resistencia eléctrica, motor, válvula, bomba, etc)

TABLA I. FUNCIONES DE TRANSFERENCIAS DE LOS PROCESOS

Proc.	Funció n de transferencia
$G_1(s)$	$\frac{3.73}{2153.07s^4 + 2042s^3 + 549.1s^2 + 254.57s + 0.7}$ Proceso de Refrigeración [5]
$G_2(s)$	$\frac{140s + 28}{34200s^5 + 104791s^4 + 40746.63s^3 + 21617.76s^2 + 672.26s + 5.38}$ Proceso de Deshumidificación [5]
$G_3(s)$	$\frac{1}{2.5s + 1}$ Proceso de Riego Automático [5]

En la Tabla I se ven las funciones de transferencias,

considerando el modelado matemático de los procesos interviniéntes según Fogel [5], y que representa el comportamiento del invernadero.

El enfoque tradicional de estos sistemas para su despliegue es la utilización de una red cableada como medio físico para la comunicación, y la utilización de protocolos de comunicación industriales, como el RS-485, para el intercambio de datos entre los nodos de la red.

La contribución de este trabajo es el diseño de un sistema de control sobre una plataforma de comunicación inalámbrica. Además, se considera la utilización de una tecnología innovadora, como lo es 6LoWPAN, ya que está pensada para una mejor integración de las WSANs a la internet y que apunta al modelo de Internet de las Cosas (IoT, del inglés *Internet of Things*), que últimamente ha atrajo mucha atención en el ámbito académico.

La estructura del artículo es la siguiente. En la sección 2, se realiza una revisión del estado del arte; además se indican los principales desafíos en la aplicación de redes de sensores en agricultura de precisión. En la sección 3, se presenta una descripción de las WSANs. Luego, en la sección 4 se presentan algunas simulaciones del sistema de control propuesto de climatización y riego. El trabajo concluye con la sección 5, donde se resaltan los principales puntos del trabajo y los próximos pasos a realizar en el marco del presente proyecto.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

La revisión de la literatura disponible muestra varios aportes relacionados a las WSANs en agricultura de precisión en los últimos años.

Primeramente, respecto a trabajos de WSAN aplicados a cultivos en campo abierto, Diaz et al. [6] presentan una metodología bastante completa para la instalación de una WSAN, abarcando desde el estudio del campo donde ha de ser instalado, pasando por el diseño de la red, la simulación y la implementación de la misma. En el trabajo se consideran a los nodos MICAz y el protocolo de comunicación ZigBee. En otro trabajo presentado por Olalla, M. [3], se propone una WSAN asociada a actuadores para la optimización del riego con fines productivos, debido a la escasez de agua en la Hacienda Cananvalle de la ciudad de Ibarra (Ecuador); empleando el estándar 6LoWPAN y los protocolos UDP y TCP para el desarrollo de la red inalámbrica. En este trabajo se consideran a los nodos TelosB para implementar la red.

Por otro lado, en lo que se refiere a trabajos de agricultura de precisión, se revisaron los siguientes trabajos: Saad et al. [7] implementan un sistema de monitoreo en tiempo real para un invernadero con un volumen de 2600 m³, para un cultivo de mangos. El sistema cuenta con tres puntos de medición, siendo dos internos y uno externo. Los nodos se encuentran basados en el hardware de National Instruments, así como su interfaz de usuario fue desarrollada con el software LabVIEW de la misma empresa; el protocolo de comunicación utilizado es el IEEE 802.15.4. Asokar, P.S. y Bhadade, Us. [4] proponen un sistema de monitoreo y control para un cultivo de pepinos. Sin embargo, se trata de un solo punto de medición y actuación. Además, como medio de comunicación utilizan la red GSM de

telefonía. Finalmente, Erazo et al. [8] desarrollan una red WSAN para un invernadero con cultivo de rosas. Los nodos fueron desarrollados con microcontroladores del fabricante Microchip. La tecnología de comunicación inalámbrica utilizada fue ZigBee. Para la interfaz de usuario también fue utilizada la herramienta LabVIEW. Pruebas fueron realizadas en un invernadero con una superficie de 50 m². El sistema genera alarma en caso de que las mediciones caigan fuera de un rango de operación aceptable, para que el usuario pueda tomar acciones correctivas.

Por lo que se observa en los trabajos de invernaderos, las soluciones vistas presentan una aplicación más orientada a la medición de las variables, por lo que en el presente trabajo se intenta extender esto introduciendo el mecanismo de control de los subsistemas de climatización y riego del invernadero.

III. DESCRIPCIÓN DE LAS WSANS

A. Características

Una WSAN se considera como una herramienta potencial para la automatización en la agricultura, ya que la misma puede recolectar la información solicitada, y junto con actuadores, reaccionar ante las distintas situaciones. Para ello, debe contar básicamente con las características que se especifican a continuación.

- *Capacidad para la toma de decisiones*: el sistema debe poder ejecutarse sin alguna intervención humana durante un largo periodo, debido a que los nodos podrían ser desplegados en zonas de difícil acceso [9]. Así, múltiples nodos sensores colaboran entre ellos para tomar decisiones [1].
- *Tamaño compacto*: un nodo sensor debe ser de pequeño tamaño y poco peso, y debe prescindir del uso de cables, asegurando la portabilidad para el despliegue a larga escala de forma sencilla.
- *Configuración dinámica*: la topología de la red no debe ser fija. Los nodos pueden ser desplegados arbitrariamente y adaptados según las necesidades; cada uno de ellos debe mantenerse inactivo la mayor parte del tiempo, a fin de ahorrar energía y extender lo máximo posible el tiempo de operación de la red. Los nodos deben colaborar entre sí para determinar el mínimo número que debe permanecer activo [1].
- *Tolerancia de fallas*: un desafío que se presenta en el despliegue de una WSAN es el hecho de que los nodos son propensos a fallas [10] que afectan el rendimiento de la red. Sin embargo, los nodos pueden autoorganizarse configurando dinámicamente la topología de red [11].
- *Escalabilidad y adaptabilidad*: toda red escalable debe poder aumentar el número de nodos sin que ésto implique una disminución considerable de la funcionalidad o el rendimiento.
- *Acceso remoto*: se debe poder acceder a la información en tiempo real a distancia, de modo a que el usuario final la analice y tome decisiones en caso de necesidad sin importar su ubicación.

B. Diseño y Funcionalidad

Un sistema de monitoreo basado en tecnología WSAN debe estar compuesto de los siguientes elementos: nodos sensores, nodo sumidero, estación base y, adicionalmente, actuadores. La Fig. 2 representa un despliegue típico de una red inalámbrica de sensores y actuadores.

- *Nodos sensores*: representan la unidad básica de una WSAN; se encargan de leer la información del medio físico: los valores de las variables ambientales y del suelo; y transportarla hasta el nodo sumidero. Cada nodo, aparte de enviar su propia información, reenvía los paquetes de datos enviados por otros nodos. La Fig. 3 representa un esquema de los componentes más importantes de un nodo sensor.
- *Nodo sumidero*: es el responsable de la recolección de los datos transmitidos por los nodos sensores, para luego enviarlos a la estación base.
- *Estación base*: es el que recibe la información desde el nodo sumidero, y envía a través del mismo, comandos a los actuadores.
- *Nodos Actuadores*: son nodos que tienen la capacidad de recibir comandos desde la estación base, interpretarlos y generar una acción correspondiente. Por ejemplo, controlar un sistema de riego en base al nivel de humedad detectado.

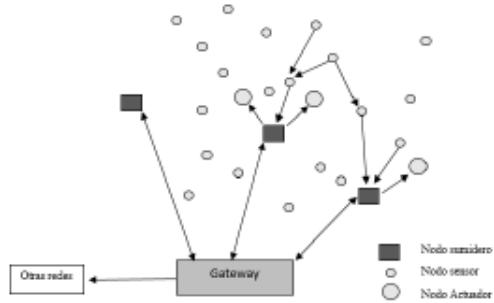


Fig. 2. Arquitectura de referencia de una WSAN.

C. Estándares utilizados y Tecnología Disponible

De entre los estándares evaluados en la tecnología de comunicación: IEEE 802.15.4 [12], Zigbee [13], Wireless Hart [14], ISA100.11A [15], Bluetooth Low Energy (BLE) [16], Wifi [1], GPRS/3G/4G [1], WiMax [17], se ha seleccionado para la implementación:

- *IEEE 802.15.4*: define las especificaciones de la capa física (PHY) y subcapa de control de acceso al medio (MAC), para la conectividad inalámbrica de dispositivos fijos o móviles, de baja velocidad de transferencia de datos y consumo limitado de energía [12].

- *6LoWPAN*: es un estándar que define la implementación del stack IPv6 sobre la capa física (PHY) y la subcapa de control de acceso al medio (MAC) de la IEEE 802.15.4, para que cualquier dispositivo que lo utilice pueda ser accedido desde internet [18].

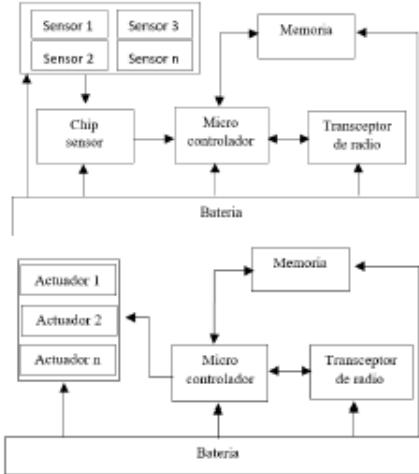


Fig. 3. Diagrama de bloques de un nodo sensor y un nodo actuador

En cuanto a las plataformas hardware para nodos sensores y actuadores, en la Tabla II se presentan características para diferentes plataformas de nodos sensores.

TABLA II. CARACTERÍSTICAS DE PLATAFORMAS

Plataforma	Características		
	Procesador	Memoria RAM	Frecuencia de transmisión (MHz)
TelosB	TIMSP430	10	2400
MICA2	ATmega128L	4	868/915
MicaZ	ATmega128L	4	2400
IRIS	ATmega28L	4	2400
Shimmer 3	TIMSP430	16	2400
SunSPOT	ARM920T	512	2400
LOTUS	NXPLPC 1758	64	2405/2480
Imote2	Marvell/XScale PXA271	256	2400

De entre todos ellos, el TelosB ha sido el nodo inalámbrico más popular en el ámbito académico. Además es compatible con el Sistema Operativo Contiki, por lo tanto ha sido elegido para el desarrollo de este trabajo.

ContikiOS: es el segundo sistema operativo más utilizado; está diseñado para pequeños sistemas que disponen solo de unos pocos kilobytes de memoria, resultando altamente eficiente en cuanto al manejo de la misma al proporcionar un

conjunto de mecanismos de asignación de memoria de bloques. También se destaca por incluir el simulador COOJA [19].

IV. CONTROL DE CLIMATIZACIÓN EN INVERNADEROS

Fogel [5], propuso el diseño de entornos aislados y de ambiente controlado (invernaderos), con el fin de ser utilizados como estaciones experimentales para la práctica de ensayos climáticos sobre los principales cultivos de Paraguay, basado en la utilización adecuada de sistemas de calefacción, ventilación, refrigeración y fertilización carbónica para la correcta adecuación de los niveles de radiación, temperatura, humedad y CO₂, utilizando la teoría de control para modelar el invernadero, y la correcta sintonización de los controles de los distintos procesos.

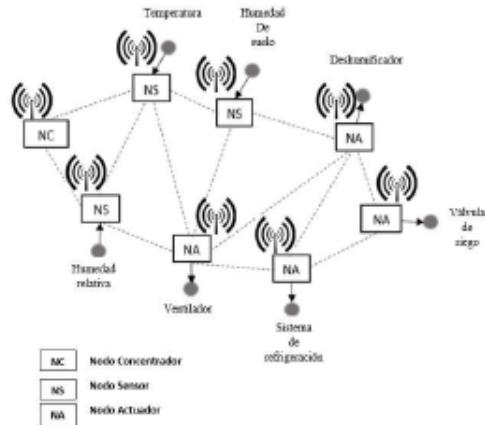


Fig. 4. Arquitectura del sistema propuesto

Utilizando este trabajo como referencia, se propone la integración de un sistema de control y una red de sensores y actuadores inalámbricos a un invernadero de 9 m², con el objetivo de ajustar las condiciones climáticas de su interior para el óptimo cultivo de tomates, específicamente. Considerando lo sugerido por la Guía Técnica de Cultivos Hortícolas, del Ministerio de Agricultura y Ganadería, el mejor comportamiento del tomate se consigue en climas tropicales o subtropicales; no tolera las temperaturas muy elevadas y tiene serios inconvenientes en climas tropicales húmedos. Así, de los procesos mencionados más arriba, se consideran de interés para esta tarea:

- El proceso de refrigeración sensible, debido a que es ideal para el cultivo, temperaturas entre 20° C a 25° C durante el día, y 11° C a 18° C durante la noche, considerando que la fructificación se ve perjudicada al no existir diferencia entre las temperaturas del día y de la noche;
- El proceso de deshumidificación, debido a que la elevada humedad del aire favorece al desarrollo de enfermedades producidas por hongos, por lo que se prefieren los ambientes secos, adoptándose un porcentaje del 60% como el ideal;

- El proceso de riego automático, debido a que las necesidades de agua del cultivo son elevadas, especialmente en el periodo de desarrollo de la fructificación, incluyendo la etapa de cosecha.

También, se considera necesaria la implementación de un sistema de ventilación/extracción mediante un algoritmo de encendido con respaldo, que será accionado por horarios ya previstos.

Los procesos considerados se han simulado en Scilab, respetando el modelado propuesto por Fogel [5], de manera a verificar los requerimientos temporales implementativos de los diferentes lazos de control, mediante las funciones de transferencia de los mismos (Tabla I). Se asume que en el despliegue los nodos tendrán una topología fija y se considera que la alimentación no es permanente.

En las Figuras 5 al 7 se ven las respuestas temporales de las plantas consideradas.

De manera a determinar la respuesta temporal de las variables a ser controladas y considerando la propuesta de Fogel [5], se procedió a evaluar la respuesta al pulso unitario de las funciones de transferencia propuestas.

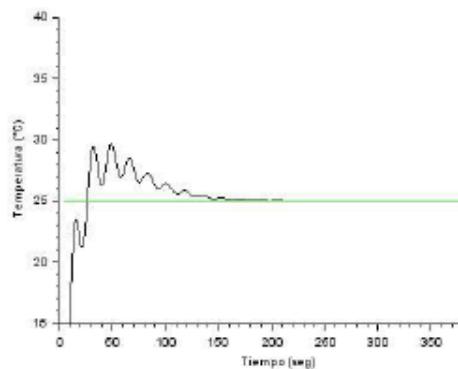


Fig. 5. Respuesta del proceso de refrigeración

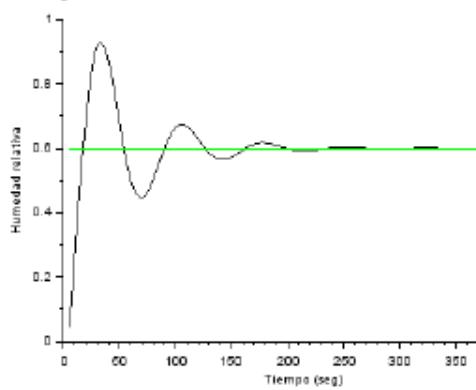


Fig. 6. Respuesta del proceso de deshumidificación

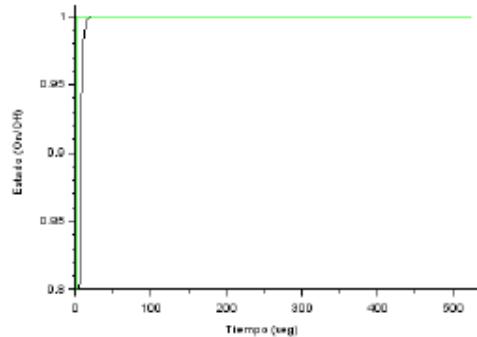


Fig. 7. Respuesta del proceso de riego por goteo

De las simulaciones se concluye que la dinámica del sistema permitiría la implementación de un esquema de control. El tiempo de asentamiento de la señal está en el orden de centenas de segundos, mientras que el tiempo de comunicación de un paquete en una red 802.15.4 está en el orden de los milisegundos.

V. CONCLUSIÓN

A partir de las consideraciones anteriores, se presenta la arquitectura de un sistema de monitoreo y control mediante el análisis de los parámetros tratados por los procesos seleccionados, a través de una red inalámbrica de topología fija y autoconfigurable. Se emplea 6LoWPAN para posibilitar el uso de IPv6 sobre redes basadas en el estándar 802.15.4.

La plataforma a utilizar como nodo sensor, actuador y sumidero es la CM5000, basada en la plataforma TelosB, que cuenta con las siguientes características:

- Plataforma WSN IEEE 802.15.4
- Procesador MSP430 de 2.4 GHz, 16bits y RF CC2420
- Sistema Operativo: ContikiOS
- Sensores ya incluidos a ser utilizados: Temperatura (SHT11) y humedad relativa (SHT11).

Asociado a la plataforma CM5000 irá el siguiente sensor compatible con la misma:

- Sensor de humedad de suelo, modelo EC-5

Esta red está conformada por nodos sensores programados mediante el sistema operativo Contiki, donde los mismos se encargan de recolectar la información y comunicarse entre sí; un nodo sumidero que recibe la información recolectada y la retransmite hasta una estación base, a fin de poder procesar la información y pueda ser accesible al usuario mediante una interfaz gráfica diseñada en el entorno de desarrollo LabVIEW;

y nodos actuadores, que controlan el funcionamiento de los componentes necesarios para la ejecución de los procesos de climatización, ventilación y riego, todo esto de forma automática.

REFERENCIAS

- [1] Ojha, T., Misra, S., & Raghuwanshi, N. S. (2015). Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 66-84.
- [2] Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and electronics in agriculture*, 36(2), 113-132.
- [3] Olalla, M., & Alberto, E. (2014). Red inalámbrica de sensores a través de filoWPAN para una agricultura de precisión aplicado en la Hacienda Camayvalle de la Ciudad de Ibarra, Tesis final de Master, Pontificia Universidad Católica de Ecuador..
- [4] Asolkar, P.S. and Bhadade, U.S., 2015, February. An Effective Method of Controlling the Greenhouse and Crop Monitoring Using GSM. In Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA), 2015 International Conference on (pp. 214-219). IEEE.
- [5] Fogel, Gerardo et Al. (2013) Diseño de Estaciones experimentales basados en módulos invernaderos climatizado para la práctica de ensayos climáticos sobre los principales cultivos del Paraguay. Tesis Final de Grado. Facultad Politécnica. Universidad Nacional de Asuncion.
- [6] Diaz, S. E., Pérez, J. C., Mateos, A. C., Marinescu, M. C., & Guerra, B. B. (2011). A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(2), 252-265.
- [7] Saad, S.M., Kamarudin, I.M., Kamarudin, K., Nooriman, W.M., Mamduh, S.M., Zakaria, A., Shakaff, A.Y.M. and Jaafar, M.N., 2014, August. A real-time greenhouse monitoring system for mango with Wireless Sensor Network (WSN). In Electronic Design (ICED), 2014 2nd International Conference on (pp. 521-526). IEEE.
- [8] Erazo, M., Rivas, D., Pérez, M., Galanza, O., Bautista, V., Huerta, M. and Rojo, J.L., 2015, February. Design and implementation of a wireless sensor network for rose greenhouses monitoring. In Automation, Robotics and Applications (ICARA), 2015 6th International Conference on (pp. 256-261). IEEE.
- [9] Keshtgari, M., & Deljoo, A. (2012). A wireless sensor network solution for precision agriculture based on zigbee technology. *Wireless Sensor Network*, 4(1), 25.
- [10] Younis, M., Senturk, I. F., Akkaya, K., Lee, S., & Senel, F. (2014). Topology management techniques for tolerating node failures in wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 58, 254-283.
- [11] Misra, S., Kumar, M. P., & Obaidat, M. S. (2011). Connectivity preserving localized coverage algorithm for area monitoring using wireless sensor networks. *Computer Communications*, 34(12), 1484-1496.
- [12] Bhat, N. S. (2012). Design and implementation of IEEE 802.15. 4 Mac protocol on FPGA. *arXiv preprint arXiv:1203.2167*.
- [13] www.zigbee.org, ZigBee Alliance, 2014.
- [14] www.hartcomm.org, 2014
- [15] www.isa.org, ISA100, Wireless Systems for Automation, 2014
- [16] www.bluetooth.com/Pages/low-energy.aspx, Bluetooth Low Energy, 2014.
- [17] *IEEE Standard for WirelessMAN-Advanced Air Interface for Broadband Wireless Access Systems*, IEEE Standard 802.16.1, 2012.
- [18] Iacono, L., Godoy, P., Marianetti, O. L., Garino, C. G., & Piñraga, C. (2012). Estudio de la Integración entre WSN y redes TCP/IP. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, (10), 57-68.
- [19] www.contiki-os.org/start.html

Anexo II

Anteproyecto - *Personal Food Computer*

**PTI**

Parque Tecnológico Itaipu

PARQUE TECNOLÓGICO ITAIPU - PARAGUAY
CENTRAL HIDROELÉCTRICA ITAIPU
Tel: +595 61 599 0030
contacto@pti.org.py
www.pti.org.py

Nombre del Proyecto	Sigla	Costo (U\$D)	Duración
Personal Computer Food 2.0 MIT	PCF	10.000 (Dos prototipos)	6 meses

Proponente PTI

Nombre del responsable/Área: Ariel Guerrero
Áreas relacionadas: CIE, CITAG

NuMEC

Área de Estudio / Línea de investigación

Sensores y Acondicionadores de Señal, Instrumentación Industrial, Sistemas de Monitoreo

Objetivo General

El proyecto consiste en implementar un prototipo del "personal computer food"(PCF) conforme las especificaciones técnicas del MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts).

Objetivos Específicos

Realizar la transferencia de conocimiento del proyecto PCF 2.0 del MIT.
Montar y Probar 2 (dos) "Personal Computer Food 2.0" PCF 2.0

Justificación

Paraguay es una de las potencias agrícolas produciendo aproximadamente 15 millones de toneladas de granos en el 2011, y ocupa al 30% de la población económica activa. La industria y técnica agrícola, con la incorporación de innovaciones tecnológicas, ofrece una oportunidad de lograr el aumento necesario de la eficacia, así como un manejo respetuoso de los recursos naturales. Es en este contexto de nuevas tecnologías, tales como la PCF ofrece una oportunidad de estudio y formación de los nuevos agricultores digitales, al recibir un panorama completo de las innovaciones, tendencias y desarrollos en el área de software y electrónica aplicada a la agricultura.

La PCF es una "plataforma tecnológica de agricultura", un ambiente controlado que utiliza Sistemas para controlar y monitorear el clima y la energía dentro de una cámara de cultivo especializada. Las variables climáticas como el dióxido de carbono, la temperatura del aire, la humedad, el oxígeno disuelto, el hidrógeno potencial, la conductividad eléctrica y la temperatura de la zona radicular están entre las muchas condiciones que pueden ser controladas y monitoreadas dentro de la cámara de crecimiento. La energía, el agua y el consumo de minerales operacionales son monitoreados (y ajustados) a través de contadores eléctricos, sensores de flujo y dosificadores químicos controlables durante todo el período de crecimiento.

Cada conjunto específico de condiciones puede considerarse como una receta climática, y cada receta produce resultados únicos en los fenotipos de las plantas. Las plantas cultivadas bajo diferentes condiciones pueden variar en color, tamaño, tasa de crecimiento de textura, rendimiento, sabor y densidad de nutrientes. Alimentos Las computadoras pueden incluso programar estrés biótico y abiótico, como una sequía inducida, para crear expresiones vegetales.

Resultados y Entregas del Proyecto

- Planilla de costos para montaje del prototipo
- Documentación técnica de Ingeniería de detalle para cada etapa del montaje
- Montaje de 2 (dos) PCF

Beneficio para el PTI-PY

- Contar con un prototipo mínimo viable para los estudios comerciales (
- Incorporar en las aulas móviles tecnología de enseñanza relacionada con una Granja Digital
- Convenio Institucional con el MIT para transferencia tecnológica



PTI

Parque Tecnológico Itaipú

PARQUE TECNOLÓGICO ITAIPU - PARAGUAY

CENTRAL HIDROELÉCTRICA ITAIPU

Tel: +595 61 599 0030

contacto@pti.org.py

www.pti.org.py

- Formar dos Ingenieros en el área de "Electrónica aplicada a la agricultura"



Laboratorios del MIT para PCF



Concepto de producto para el mercado



Concepto futurista del área de aplicación

**PTI**

Parque Tecnológico Itaipú

PARQUE TECNOLÓGICO ITAIPU - PARAGUAY
CENTRAL HIDROELÉCTRICA ITAIPU
Tel: +595 61 599 0030
contacto@pti.org.py
www.pti.org.py

Previsión Presupuestaria

1. RR.HH.	2 Estudiantes de Grado
2. Materiales Inventariables: (Equipamientos, sensores, etc.)	4.200,00 USD p/prototip
3. Materiales Fungibles: (consumibles, insumos, etc.)	800,00 USD p/prototipo
4. Viajes, Translados Diarias	-
5. Otros:	-
VALOR TOTAL ESTIMADO P/PROTOTIPO (U\$D.):	5.000,00
Cinco Mil dólares con cero centavos.	

Histórico del Documento

Versión	Autor	Fecha de Elaboración /Recepción	Observaciones
1.0.0	Ariel Guerrero	7/03/2017	Creación

Anexo III

Presupuesto – *Hidropar Invernaderos*



Hidropar
KM 8 1/2 Parque San Juan - Bloque D 3
Ciudad del Este - Paraguay
Tel: 061 575-107

Nome: Gabriela Caceres
Tel: 0973 670 481
Dirección: Paraguay - Ciudad del Este

PRESUPUESTO
INVERNADERO 7X27M

ITEM	QTDE	PRODUTOS	V. TOTAL
1.	4	PÉ DIREITO DE EUCALIPTO TRATADO 5,5M	
2.	20	PÉ DIREITO DE EUCALIPTO TRATADO 3,5M	
3.	10	ARCOS GALVANIZADOS 7M	
4.	5	TUBO DE TRAVA GALVANIZADO 6M	
5.	4	TUBO MÃO FRANCESA GALVANIZADO 4M	
6.	10	PRESILHAS	
7.	2	TE PARA TUBO TRAVA	
8.	20	ENCAIXES	
9.	12	TUBO LATERAL GALVANIZADO 8M	
10.	2	TUBO GALVANIZADO PARA PORTÃO 6M	
11.	34	PERFIL ALUMÍNIO 6M	
12.	200	METROS DE MOLA GALVANIZADA	
13.	252	METROS DE FILME 150 MICRAS	
14.	240	METROS DE FRESHNET COBERTURA	
15.	354	METROS DE SOMBRITE LATERAL	
16.	1	PORTÃO / TRILHO / FECHADURA / ROLDANA / GUIA	
17.	15	BARRA ROSCADA	
18.	200	PORCA	
19.	200	ARRUELA	
20.	2	BROCANTE	
21.	1	TINTA SPRAY	
22.	300	TIRANTE ARAME DE AÇO GALVANIZADO	
23.	30	CATRACAS	
24.	16	ESTACAS PARA TIRANTE	
25.	300	AGULHAS	
26.	182	METROS DE RÁFIA DE SOLO C/ PREGO P/ FIXAR	
27.		METROS DE CALHA	
28.	1,5	AREIA	
29.	1,5	PEDRISCO	
30.	8	CIMENTO	
31.		MÃO DE OBRA	

HIDROPONIA 7X27

ITEM	QTDE	PRODUTOS
1.	30	TUBOS HIDROPÓNICOS DE 55MM
2.	24	TUBOS HIDROPÓNICOS DE 65MM
3.	30	TUBOS HIDROPÓNICOS DE 85MM
4.	6	CAIXAS 310L
5.	1	CAIXAS 200L
6.	7	MOTOBOMBAS N1500

7. 1	PAINEL C/ CAIXA, TIMER, TEMPORIZADOR, DISJUNTOR, TRILHO
8. 1	CONDUTIVÍMETRO
9. 12	TUBO 50MM RETORNO
10. 12	TAMPÃO 65MM
11. 36	TAMPÃO 85MM
12. 15	TAMPÃO 55MM
13. 7	TUBO COLETOR / SAÍDA / TAMPÃO
14. 7	ADAPTADOR / FLANGE P/ CAIXA D'ÁGUA
15. 7	BOIA
16. 7	JOELHO 50MM
17. 9	TOMADA
18. 1	TORNEIRA DE JARDIM
19. 1	JOELHO 20MM/1/2"
20. 1	FITA VEDA ROSCA
21. 1	FITA ISOLANTE
22. 60	FIO 2X2,5MM
23. 7	INJETOR LUVA, CAPA, TE, ADAPTADOR, MICRO TUBO, TUBO 25MM
24. 7	MANGUEIRA FLEXÍVEL P/ BOMBAS
25. 1	ENFORCA GATO P/ MESAS
26. 10	TUBO 20MM
27. 60	MANGUEIRA CORRUGADA
28. 1	TUBO DE COLA
29. 66	CAVALETES GALVANIZADOS
30. 1	VEDA CALHA
31. 8	REGISTRO 20MM
32. 2	CHAPA P/ MATERNIDADE 2 METROS DE LARGURA
33. 2	TELA P/ MATERNIDADE 2 METROS DE LARGURA
34. 66	CAVALETE GALVANIZADO
35.	MÃO DE OBRA

TOTAL: Gs 68.000.000

Producción aproximada mensual: 2500 lechuga o 6000 rucula.

OBS: Entrada de 5%, en la entrega de los materiales 50% y 45% al termino de la obra.

Otras dimensines 7x39m 3750 lechuga o 9000 rucula valor: Gs 92.000.000

7x51m 5000 lechuga o 12000 rucula valor: Gs 108.000.000

7x15m 1250 lechugas o 3000 rucula valor: Gs 37.000.000