DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS APLICADA EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN
SISTEMAS INTELIGENTES MULTIMEDIA

PRESENTA

ING. DIEGO MORA DELGADO
ASESOR: JOSÉ DANIEL COBOS DE LOS SANTOS

ZAPOPAN, JALISCO, JUNIO, 2020.

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR

GOBIERNO DE MÉXICO

CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

CIATEQ

Villahermosa, Tabasco, 12 de junio del 2020.

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero
Directora de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del (la) alumno (a) **Diego Mora Delgado**, cuyo título es:

"Diseño de una red de sensores inalámbricos aplicada en la agricultura de precisión"

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el (la) alumno(a), y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

Firma

M.I.C, Rodolfo Ortiz Pérez

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Zapopan, Jal. | +52 (33) 2687 0310 | 800 800 3798 | mkt@ciateq.mx | www.ciateq.mx

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR

GOBIERNO DE MÉXICO

CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

CIATEQ

Querétaro, Querétaro, 01 de abril de 2020.

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del Ingeniero Diego Mora Delgado, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis/tesina, titulado "Diseño de una red de sensores inalámbricos aplicada en la agricultura de precisión" **autorizo** que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de **Maestro en sistemas inteligentes multimedia**.

Sin otro particular por el momento, agradezco la atención prestada.

José Daniel Cobos de los santos

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Zapopan, Jal. +52 (33) 2687 0310 | 800 800 3798 | mkt@ciateq.mx www.ciateq.mx

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Ma. Guadalupe y Estanislao por su amor, paciencia, consejos y apoyo, gracias a su crianza y los valores inculcados en mí he progresado profesional y personalmente.

A mi esposa Fernanda por su amor, paciencia y comprensión, pero sobre todo gracias por tus invaluables consejos.

A mi asesor y revisor por sus consejos, motivación y paciencia.

A la empresa Getinsoft, por su apoyo en el desarrollo del presente proyecto.

RESUMEN

Este trabajo desarrolló una metodología para ingeniería y tecnología, tecnología electrónica, y circuitos. La oportunidad que se pretende atender en el presente proyecto es la adquisición remota de datos en campos de cultivo, de forma más específica la implementación del Hardware (sensores, transductores, sistemas embebidos) y Firmware necesario para la recolección de información. La información recolectada es enviada a un sitio web donde es almacenada para posteriormente poder generar conocimiento de las condiciones actuales encontradas en los campos de cultivo.

La manera en que se aborda la forma de recolección de datos de variables en campo es mediante una red de sensores inalámbricos configurable. Esta red se comprende de nodos sensor, los cuales básicamente son un sistema embebido equipado con sensores y de un transceptor inalámbrico de comunicación. Estos nodos recolectan los datos de las variables para después ser trasmitidos inalámbricamente a otro nodo conocido como nodo base. El nodo base solo tiene como tarea utilizar una red inalámbrica de área local o red GSM para enviar los datos al servicio web donde serán almacenados.

En el presente proyecto se aplica un procedimiento sistemático para la definición, diseño, construcción, pruebas e implementación de una red de sensores inalámbricos configurable aplicada a la recolección de información dentro del campo de cultivo para su uso en la aplicación de la agricultura de precisión. Se desarrolla y se implementa un algoritmo de gestión energética en la red de sensores inalámbricos y se analizan los resultados obtenidos del diseño y la implementación de la red de sensores inalámbricos configurable desplegada en campo. Emplear una red de sensores inalámbricos configurable en el campo de cultivo para la recolección de información tiene grandes ventajas ya que solo se integran los componentes necesarios según las necesidades específicas del productor agrícola, limitando la inversión económica del sistema únicamente a lo necesario.

Palabras clave: Ingeniería y tecnología, Tecnología electrónica, Circuitos, Ingeniería de los ordenadores, Diseño de sistemas de sensores.

ABSTRACT

This work developed a methodology for engineering and technology, electronic technology, circuits. The opportunity that this project intends to attend is the remote acquisition of data in crop fields, more specifically the implementation of the Hardware (sensors, transducers, embedded systems) and Firmware necessary for the collection of information. The information collected is sent to a web site where it is stored in order to generate knowledge of the current conditions found in the fields. The way in which variable data is collected in the field is through a configurable wireless sensor network. This network is comprised of sensor nodes, which are basically an embedded system equipped with sensors and a wireless communication transceiver. These nodes collect the variable data to later be transmitted wirelessly to another node known as the base node. The base node only has the task of using a wireless local area network or GSM network to send the data to the web service where it will be stored.

This project applies a systematic procedure for the definition, design, construction, testing and implementation of a configurable wireless sensor network applied to the collection of information within the field for use in the application of precision agriculture. An energy management algorithm is developed and implemented in the wireless sensor network and the results obtained from the design and implementation of the configurable wireless sensor network deployed in the field are analyzed.

Using a configurable wireless sensor network in the field for data collection has great advantages since only the necessary components are integrated according to the specific needs of the farmer, limiting the economic investment of the system only to what is necessary.

Keywords: Engineering and technology, Electronic technology, Circuits, Computer engineering, Design of sensor systems.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR I

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR II

AGRADECIMIENTOS III

RESUMEN IV

ABSTRACT V

ÍNDICE DE CONTENIDO VI

ÍNDICE DE FIGURAS IX

ÍNDICE DE TABLAS XII

GLOSARIO XIII

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN 1

1.1 ANTECEDENTES 1

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA 5

1.3 JUSTIFICACIÓN 6

1.4 OBJETIVOS 8

1.4.1 Objetivo general 8

1.4.2 Objetivos específicos 8

1.5 HIPÓTESIS 11

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 12

2.1 LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN COMO MÉTODO PARA EL MANEJO DE LA VARIABILIDAD EN LA PRODUCCIÓN DE LOS CAMPOS AGRÍCOLAS 12

2.1.1. Temperatura ambiente 14

2.1.2. Presión atmosférica 16

2.1.3. Humedad relativa ambiente 17

2.1.4. Radiación solar global 18

2.1.5. Radiación fotosintéticamente activa 20

2.1.6. Radiación ultravioleta 21

2.1.7. Velocidad y dirección del viento 23
2.1.8. Volumen de precipitaciones pluviales 24
2.1.9. Temperatura del suelo 25
2.1.10. Contenido volumétrico de agua en el suelo 26
2.1.11. pH del suelo 28
2.1.12. Conductividad eléctrica del suelo 29
2.2. VENTAJAS DE LA APLICACIÓN DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN LOS CAMPOS AGRÍCOLAS 30
2.3 SISTEMAS DE MONITOREO REMOTO DE VARIABLES EN LOS CAMPOS AGRÍCOLAS .. 31
2.4 REDES AD-HOC 36
2.4.1 Redes de sensores inalámbricos 38
2.4.2 Arquitecturas de las redes de sensores inalámbricos 41
2.5 LINK BUDGET 47
2.6 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN TCP/IP 49
2.7 SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO PARA ENERGIZAR LOS NODOS SENSOR 51
2.7.1 Dimensionamiento de un sistema fotovoltaico autónomo 53
CAPITULO 3. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN 63
3.1 SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES QUE INTEGRARAN LOS NODOS SENSOR Y NODOS BASE 65
3.1.1 Selección de los transductores y sensores 65
3.1.2 Selección de los componentes de comunicación 74
3.1.3 Unidad de microcontrolador 77
3.2 DISEÑO DE LAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO 79
3.2.1 Diseño de la placa de circuito impreso de los transductores de pH y conductividad eléctrica 80
3.2.2 Diseño de la placa de circuito impreso de los nodos sensor 81
3.2.3 Diseño de la PCB para el nodo base 83

3.2.4 Maquila de las placas de circuito impreso 84
3.3 LEVANTAMIENTO DE REQUERIMIENTOS ESPECÍFICOS DE UN PRODUCTOR AGRÍCOLA 86
3.4 IMPLEMENTACIÓN DE LOS COMPONENTES EN LAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO 89
3.5 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO 95
3.5.1 Obtención del perfil de carga 95
3.6 DISEÑO DEL ALGORITMO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA 99
CAPÍTULO 4. RESULTADOS 107
4.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LOS NODOS 107
4.2 IMPLEMENTACIÓN DE LA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS EN CAMPO 109
4.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS CONFIGURABLE EN CAMPO 110
CONCLUSIONES 113
RECOMENDACIONES 118
APORTACIÓN DE LA TESIS 120
APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS 121
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Despliegue típico de una red de sensores inalámbricos. 38

Figura 2 Elementos principales de un nodo sensor. 39

Figura 3 Clasificación de las redes de sensores inalámbricos. 42

Figura 4 Capas del modelo OSI. 50

Figura 5 Componentes de un sistema fotovoltaico autónomo. 53

Figura 6 Punto de máxima potencia. 55

Figura 7 Proceso sistemático para el diseño y evaluación de una red de sensores inalámbricos configurable. 64

Figura 8 Sensor SHT10. 66

Figura 9 Sensor BMP388. 67

Figura 10 Transductor SP-110-SS. 68

Figura 11 Transductor SU-100-SS. 69

Figura 12 Anemómetro Davis®. 70

Figura 13 Transductor SQ-110-SS. 71

Figura 14 Sensor DS18B20. 71

Figura 15 Transductor de pH. 72

Figura 16 Transductor de conductividad eléctrica. 73

Figura 17 Transductor de contenido volumétrico de agua en suelo. 74

Figura 18 Transceptor de radiofrecuencia. 75

Figura 19 ATWINC1500. 76

Figura 20 SIM800H. 77

Figura 21 ATMega328PB-AU. 79

Figura 22 Diagrama esquemático de la PCB de pH y conductividad eléctrica. 80

Figura 23 Vista en 3D de la PCB 81

Figura 24 Vista superior de la PCB 81

Figura 25 Componentes en etapa de sensado. 81

Figura 26 Módulos del nodo sensor. 82

Figura 27 Componentes pasivos y transceptor de radiofrecuencia. 82

Figura 28 Unidad de microcontrolador. 82

Figura 29 Vista superior del foot print de la PCB de los nodos sensor. 83

Figura 30 Módulos y su conexión con la unidad microcontrolador. 83

Figura 31 Vista superior del foot print de la PCB del nodo base. 84

Figura 32 PCB pH y EC. 85

Figura 33 PCB nodos sensor 85

Figura 34 PCB nodo base 85

Figura 35 Campo de pruebas. 86

Figura 36 Configuración de la red inalámbrica de sensores. 88

Figura 37 PCB de acondicionamiento de señal de los transductores de pH y conductividad eléctrica del suelo. 89

Figura 38 Circuito del nodo sensor. 91

Figura 39 Circuito de obtención del perfil de carga de los nodos. 96

Figura 40 Conexión del nodo con el circuito de obtención de perfil de corriente. 96

Figura 41Nodo sensor conectado al circuito de obtención del perfil de carga. 97

Figura 42 Perfil de carga del nodo base sin algoritmo. 98

Figura 43 Perfil de carga del nodo sensor sin algoritmo. 98

Figura 44 Diagrama de flujo de la configuración de la red de sensores inalámbricos. 102

Figura 45 Diagrama de flujo de la rutina de recolección de información. 104

Figura 46 Diagrama de flujo del reconocimiento del nodo base. 105

Figura 47 Diagrama de secuencia entre el nodo base y nodo sensor. 106

Figura 48 Perfil de carga del nodo base con algoritmo. 107

Figura 49 Perfil de carga del nodo sensor con algoritmo. 108

Figura 50 Ubicación de los nodos en el campo de pruebas. 109

Figura 51 Instalación de la red de sensores inalámbricos en campo..... 110

Figura 52 Visualización del campo en la interfaz de usuario. 110

Figura 53 Visualización de los nodos en campo en la interfaz de usuario..... 111

Figura 54 Datos recolectados por el nodo 2 perteneciente a la red de sensores inalámbricos. 111

Figura 55 Posición geográfica del nodo en el campo. 112

Figura 56 Datos recolectados de la conductividad eléctrica del suelo. 115

Figura 57 Datos recolectados del contenido volumétrico de agua en el suelo. 115

Figura 58 . Evento de fertiirrigación. 116

Figura 59 Evento de fertiirrigación. 116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Umbrales de temperatura para distintos cultivos. 16

Tabla 2 Longitudes de onda de la radiación solar global y sus efectos sobre las plantas 20

Tabla 3 Comparación entre dispositivos de monitoreo de variables en campo. 34

Tabla 4 Potencia instalada en el circuito de acondicionamiento. 90

Tabla 5 Potencia instalada de los elementos del nodo sensor. 91

Tabla 6 Potencia total instalada característica del nodo sensor 1. 92

Tabla 7 Potencia total instalada característica del nodo sensor 2. 92

Tabla 8 Potencia total instalada característica del nodo sensor 3. 93

Tabla 9 Potencia total instalada característica del nodo sensor 4. 94

Tabla 10 Potencia total instalada característica del nodo base. 94

Tabla 11 procesos del algoritmo y el nodo donde se lleva a cabo. 100

Tabla 12 Comparación de los perfiles de carga con y sin el algoritmo de eficiencia energética 109

GLOSARIO

API: Conjunto de reglas y especificaciones para establecer comunicación entre los dispositivos en campo y el servicio web.

ADC: Conversor Análogo-Digital.

Datos de variables: Medición de una variable física como (temperatura, presión, frecuencia).

dS/cm: deci-Siemens/centímetro (medida de electro conductividad).

Driver: Software o programa necesario para la gestión e inicialización de algún recurso de hardware.

EC: Conductividad eléctrica del suelo.

GPRS: General Packet Radio Service (Servicio General de Paquetes vía Radio), protocolo de comunicación inalámbrica mediante la infraestructura de comunicación celular.

GSM: Global System for Mobile Communications (Sistema Global para Comunicaciones Móviles).

HR: Humedad relativa.

I2C: Protocolo serial síncrono de comunicación.

LLP: Probabilidad de perdida de carga.

mAh: Medida de consumo energético miliamperes/hora.

Módulo RF: Hardware necesario para la comunicación inalámbrica mediante radiofrecuencia.

M2M: interfaz máquina-máquina.

mS/cm: mili-Siemens/centímetro.

MCU: Unidad de micro procesamiento.

MPP: Punto de máxima potencia.

MPPT: Seguidor del punto de máxima transferencia de potencia.

MHz: Mega Hertz (Unidad de Medición de Frecuencia).

Nodo base: Hardware encargado de recibir paquetes de datos de las estaciones en campo (estación de suelo) y enviarlo al servicio web.

Nodo sensor: Se refiere a las estaciones en campo encargadas de la recolección de datos de variables, tal como la estación de suelo.

One-wire: Protocolo de comunicación digital con un medio físico de un solo cable.

pH: Conjunto de rangos numéricos para representar la acidez de una solución.

PCB: Tarjeta de circuito impreso.

RF: Radio Frequency (Radio Frecuencia).

Redes ad hoc: Se trata de un tipo de red de comunicación descentralizada, es decir, esta red no cuenta con elementos centrales de comendo o manejo del tráfico de información, esta tarea la realizan en conjunto todos los nodos o elementos pertenecientes a esta red.

Red de sensores inalámbricos: Todo equipo de hardware instalado en campo encargado de recolección de datos de variables y envió de datos al servicio web.

Radiación PAR: Radiación fotosintéticamente activa.

SPI: Protocolo serial síncrono de comunicación.

Sistemas embebidos: Sistema de cómputo diseñado para ejecutar un conjunto de tareas específicas.

Transceptor inalámbrico: Circuito electrónico que tiene la capacidad tanto de recibir como emitir señales de radio a una determinada frecuencia de resonancia.

UART: Universal Asynchronous Receiver Transmitter (Transmisor Receptor Asíncrono Universal).

VWC: Contenido volumétrico de agua en suelo.

W/h: Medida de consumo energético Watts/hora.

W: Medida de potencia (Watts).

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La agricultura de precisión se refiere a la aplicación de las tecnologías emergentes teniendo en cuenta las distintas propiedades del suelo, del medio ambiente y de las necesidades específicas de los cultivos, con el fin de manejar y optimizar los recursos necesarios para llegar a una producción de gran calidad, rentable y respetuosa con el medio ambiente. La agricultura de precisión se puede definir de la siguiente manera: "conjunto de técnicas y tecnologías para trabajar de manera correcta con la variabilidad espacial y temporal presente en los campos de cultivo, con el fin de mejorar las utilidades generadas y a su vez buscando reducir el impacto ambiental ocasionado por las actividades agrícolas" (1). Hoy en día la tecnología ha alcanzado un nivel que le puede permitir al productor medir, analizar, y manejar las variaciones en la productividad dentro de los campos de producción agrícola la cual hasta este punto era conocida pero no había manera de que esta se pudiera manejar. La habilidad de manejar variaciones en la productividad dentro de los campos de los campos agrícolas y alcanzar un nivel óptimo en los rendimientos de los cultivos han sido siempre metas de los productores.

La experiencia de profesionales del agro, indica la existencia de importantes variaciones dentro de la producción agrícola, tanto en volumen como en calidad.

Gran cantidad de productores a través de años de experiencia ha logrado identificar diferentes zonas o áreas con características productivas similares en sus campos de cultivos. Sin embargo, estos no contaban con las herramientas adecuadas que les permitieran cuantificar claramente la variación en la producción agrícola.

El manejo homogéneo de terrenos agrícolas o áreas de cultivo, que presentan una importante variación espacial en sus características, significa un uso ineficiente de los recursos.

La agricultura tradicional considera homogeneidad en los campos agrícolas, por lo tanto, la aplicación de insumos no tiene en cuenta la variabilidad espacial y temporal de la producción. Es por esta razón que la principal meta de la aplicación de la

agricultura de precisión sea la de trabajar y manejar estas variaciones en los campos agrícolas.

Para aplicar la agricultura de precisión se necesita conocer las condiciones actuales del campo agrícola recolectando información de las variables que influyen dentro del desarrollo óptimo del cultivo, las cuales se mencionan a continuación y más adelante en el capítulo dos se revisaran más a detalle.

1. **Temperatura ambiente**: esta variable suele utilizarse en casi todas las etapas fenológicas del cultivo, ya sea para detectar condiciones para que una enfermedad o plaga aparezca durante el crecimiento de la planta o para estimar el tiempo de maduración de un fruto y establecer la mejor fecha de cosecha para maximizar la productividad del campo de cultivo.

2. **Presión atmosférica**: regula las masas de aire cálido y frio, también tiene un efecto directo en la tasa de crecimiento de las plantas ya que si la presión atmosférica disminuye las plantas no podrán absorber gases vitales para su desarrollo como lo son el oxígeno y el dióxido de carbono. Directamente una baja presión atmosférica no obstruye la absorción de estos gases si no que dispersa sus moléculas haciendo que la concentración no sea la adecuada.

3. **Humedad relativa ambiente**: al igual que la temperatura ambiente la humedad relativa ambiente se trata de una variable critica en todas las etapas fenológicas de la planta, ya que esta variable puede utilizarse para estimar la perdida de agua de la planta a causa de la transpiración la cual en cantidades excesivas puede ocasionar un crecimiento deficiente de la planta. La humedad relativa ambiente también es utilizada para la previsión de las plagas y enfermedades de las plantas, las cuales causan perdidas en la productividad del campo de cultivo.

4. **Radiación solar global**: la radiación solar es la principal fuente de energía radiante que influye en la planta, parte de esta energía es utilizada para la generación de carbohidratos a partir del dióxido de carbono mediante el proceso fotosintético y por lo tanto esta variable influye en el crecimiento adecuado de la plata, sin

embargo, un exceso de incidencia de radiación solar sobre la planta puede elevar su temperatura a un punto donde se presentan quemaduras en hojas y frutos disminuyendo la productividad de la planta y por consecuencia del campo.

5. **Radiación fotosintéticamente activa**: es el componente de la radiación solar global integrada por las longitudes de onda entre los 400 y los 700 nanómetros las cuales son las responsables de activar el proceso fotosintético de la planta, una deficiencia de radiación fotosintéticamente activa en la planta puede ocasionar un crecimiento deficiente tanto de la planta como de los frutos.

6. **Radiación ultravioleta**: es el componente de la radiación solar comprendido entre las longitudes de onda de 200 a 400 nanómetros, la radiación ultravioleta se divide en tres categorías: UV-C (comprendida entre los 200 y los 280 nanómetros), UV-B (comprendida entre los 280 y los y los 320 nanómetros) y UV-A (comprendida entre los 320 y los 400 nanómetros), el efecto de la incidencia de la radiación ultravioleta sobre las plantas puede derivarse en una disminución en el área foliar disminuyendo notablemente la producción de follaje y haciendo a las plantas más susceptibles a ataques de plagas.

7. **Velocidad y dirección del viento**: la velocidad y dirección del viento es muy utilizada en la previsión de las plagas y enfermedades específicamente en la propagación de la plaga que ataca la planta, para propagarse las plagas utilizan el viento como medio de transporte hacia otras áreas del campo de cultivo afectando cada vez más área conforme la plaga se valla propagando ocasionando una mayor pérdida de la productividad.

8. **Volumen de precipitaciones pluviales**: el monitorear esta variable permite conocer la cantidad de agua que ha caído sobre tu campo ante una precipitación pluvial, esta información puede ser usada para conocer si los requerimientos de agua de tu cultivo son cubiertos por la cantidad de agua depositada en el campo mediante las lluvias o se necesita un sistema de riego para completar estos requerimientos, las precipitaciones pluviales en exceso también pueden afectar la productividad del cultivo lavando o retirando los nutrientes esenciales para la planta fuera del área

radicular, de igual manera se pueden presentar afectaciones a las plantas debido a la saturación del suelo impidiendo la correcta aeración de las raíces de la planta.

9. **Temperatura del suelo:** la temperatura es de los principales factores de los procesos bióticos y químicos que tienen lugar en el suelo agrícola, estos procesos pueden ir desde la absorción de nutrientes por la planta hasta la aparición de agentes patógenos que atacan la raíz de la planta, las enfermedades en las raíces pueden llegar a ser mortales para la planta afectando enormemente la productividad del campo de cultivo.

10. **pH del suelo:** es considerada como una de las variables más importantes en el suelo agrícola ya que es un indicador de la calidad de la absorción de los nutrientes por parte de la planta, el pH óptimo para los suelos agrícolas debe estar entre 6.5 y 7.0, esto para poder obtener la mejor productividad posible.

11. **Conductividad eléctrica del suelo**: la importancia del monitoreo de la conductividad eléctrica en el suelo agrícola es que a partir de esta puede ser estimada la concentración de sales en el medio, también puede llegar a ser un indicador de los eventos de fertilización ya que todos los fertilizantes inorgánicos son sales, las altas concentraciones de sales en el campo agrícola puede afectar a la absorción de nutrientes y agua por la planta y como consecuencia generando un desarrollo deficiente lo cual termina afectando el rendimiento del campo agrícola.

12. **Contenido volumétrico de agua en el suelo:** esta variable representa el volumen de agua contenida dentro de una unidad de volumen de suelo, el suelo agrícola se compone de tres principales componentes los cuales son: partículas de suelo, agua y aire, un suelo completamente seco o sin contenido volumétrico de agua tiene aire en todos los poros o espacios entre las partículas de suelo, un suelo completamente saturado tiene agua en todos estos espacios, el manejo de esta variable es sumamente importante para maximizar el rendimiento del campo ya que permitirá a la planta la correcta aeración al no saturar el suelo y evitar que la planta entre en estrés hídrico por falta de agua.

Para obtener la información de las variables previamente definidas en un campo de cultivo se necesita la implementación de diversos puntos de muestreo a lo largo del campo del cultivo para lograr que la información obtenida sea lo suficientemente demostrativa, es aquí donde nace el interés del desarrollo del presente proyecto que es la de diseñar una red inalámbrica de baja potencia que implementa sensores y/o transductores para la obtención de los datos de las variables en distintos puntos del campo agrícola, los nodos o dispositivos que integran esta red podrán ser configurados según las necesidades del usuario, es decir los dispositivos serán capaces de integrar solo los sensores y/o transductores que se requieren para obtener las variables de interés en un punto en específico del campo agrícola, las variables que se deseen monitorear se pueden especificar de acuerdo al tipo de cultivo, el microclima especifico de la región o incluso la metodología de cultivo utilizada.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La variabilidad en la productividad de los campos agrícolas es algo bien conocido en el sector agrícola, sin embargo, el no poder detectar o cuantificar las causas de esta variabilidad a resultado en un manejo homogéneo del campo agrícola. Esta situación representa un problema, ya que este tipo de manejo no atiende precisamente las necesidades específicas del cultivo en cierto momento o en cierta ubicación en el campo, además implica realizar las mismas actividades y aplicar el mismo tipo y cantidad de insumos a lo largo del campo ocasionando un desperdicio de recursos agrícolas.

Para poder manejar la variabilidad en la productividad del campo agrícola se necesita conocer las condiciones actuales del campo y en base a estas condiciones tomar las decisiones de las actividades a realizar, dosificación y tipo de insumos a aplicar y en qué punto aplicarlos, de esta manera los recursos serán empleados solo donde se necesitan evitando los desperdicios y buscando la mejor productividad del cultivo.

Con el fin de recolectar información que permita conocer las condiciones actuales del campo se propone la implementación de una red de sensores inalámbricos para recolección de información de únicamente las variables de interés para el usuario.

En el presente proyecto se propone la implementación de una red de sensores inalámbricos cuyos nodos deberán de poder integrar como mínimo un sensor o transductor que obtenga información de alguna de las siguientes variables:

I. Variables climatológicas:
   - Temperatura ambiente
   - Presión atmosférica
   - Humedad relativa ambiente
   - Radiación solar global
   - Radiación fotosintéticamente activa
   - Radiación ultravioleta
   - Velocidad y dirección del viento
   - Volumen de precipitaciones pluviales

II. Variables de suelo
   - Temperatura del suelo
   - pH del suelo
   - Conductividad eléctrica del suelo
   - Contenido volumétrico de agua en el suelo

La arquitectura de los nodos propuesta le permitirá al usuario adaptar la red de sensores inalámbricos que será desplegada en su campo para que solo monitoree las variables de interés de acuerdo con su tipo de cultivo, microclima específico y metodología de cultivo.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En la compañía donde trabajo se está desarrollando un software que ayuda a la administración y aplicación de la agricultura de precisión el cual tiene como nombre comercial Agricos®, este software consta de los siguientes módulos:

Módulo 1: sistema de planeación de recursos agrícola.

Módulo 2: análisis de plagas y enfermedades en las plantas.

Módulo 3: análisis de imágenes tomadas con drones.

Módulo 4: planificación de tareas agrícolas y gestión de proveedores y clientes.

Se creó el módulo 5 el cual recibe la información recolectada por la red de sensores inalámbricos desplegada el campo agrícola y los muestra al usuario en un panel informativo, además de generar graficas con la información recolectada las cuales muestran la tendencia de cambio de la variable con respecto al tiempo.

La información almacenada en este módulo también será utilizada con los siguientes fines:

1. El módulo 2 de plagas y enfermedades de Agricos® utiliza los datos recolectados en campo para generar alertas de que las condiciones para que una cierta plaga o enfermedad aparezca se están presentado, de esta manera el usuario podrá tomar medidas preventivas en lugar de correctivas y evitar pérdidas en la productividad de su cultivo debido al padecimiento de una enfermedad.

2. El módulo 4 dentro de la planificación de tareas agrícolas utilizara la información de las variables de conductividad eléctrica y pH para la planificación, dosificación y tipo de insumo que se aplicara a la planta, esto mejora la manera en que se toman las decisiones de las tareas de fertilización del campo agrícola evitando el desperdicio de los insumos al aplicar donde solo son necesarios en las cantidades correctas.

3. Servicio de consultores de expertos del agro en base a los históricos de datos almacenados en el módulo de monitoreo, los expertos del agro podrán analizar la información recolectada en el campo y en base a este análisis formular recomendaciones de manejo de las actividades agrícolas para tratar de maximizar el rendimiento del cultivo.

4. Generación de reportes y recomendaciones en base al microclima específico en donde se encuentra el campo de cultivo agrícola, esto permitirá la toma de decisiones en base al ambiente al que la planta está siendo sometida, las heladas y los golpes de calor generan pérdidas importantes en la productividad de los cultivos, así cuando se detecten las condiciones de una helada o las condiciones para que determinado cultivo sufra un golpe de calor las actividades agrícolas

deberán orientarse a ayudar al cultivo a soportar dichas condiciones y no a solucionar las afectaciones ya sufridas.

El objetivo principal del presente proyecto es la de lograr la implementación de una red de sensores inalámbricos configurable aplicada en la agricultura de precisión, diseñando una arquitectura de nodos capaz de configurarse y ofrecer solo la integración de los sensores y/o transductores necesarios para obtener las variables de interés por los usuarios.

La implementación de una red de sensores inalámbricos configurable permitirá conocer el estado actual del campo agrícola mediante la recolección de información de las variables de interés según el microclima especifico además del tipo y la metodología de cultivo. Lo anterior generará información que podría permitir una gestión más eficiente de los recursos agrícolas, aplicación de insumos y ejecución de tareas teniendo en cuenta el estado actual del ambiente donde se encuentra el cultivo, además de la toma de decisiones preventivas y no correctivas ante plagas y enfermedades. Todo esto podría maximizar el rendimiento del campo agrícola y gestionar un uso eficiente de los recursos e insumos.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Implementación de una red de sensores inalámbricos configurable la cual constara de nodos tanto de recolección de información como de comunicación. Para cada nodo se dimensionará un sistema fotovoltaico autónomo que se encargará de sustentar su consumo energético, la red de sensores inalámbricos se desplegará en un campo de pruebas para evaluar su desempeño.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Desarrollar un prototipo base del nodo para la obtención de variables, este nodo como mínimo deberá de poder integrar un sensor y/o transductor que obtenga alguna de las siguientes variables:

- Temperatura ambiente
- Presión atmosférica
- Humedad relativa ambiente
- Radiación solar global
- Radiación fotosintéticamente activa
- Radiación ultravioleta
- Velocidad y dirección del viento
- Volumen de precipitaciones pluviales
- Temperatura del suelo
- pH del suelo
- Conductividad eléctrica del suelo
- Contenido volumétrico de agua en el suelo

2. Desarrollar un prototipo base del nodo de comunicaciones. Su función será la de recolectar la información de las variables de todos los nodos desplegados en el campo y enviarla al servicio web mediante la red GSM.

3. Desarrollo de las librerías necesarias para programar la interfaz de comunicación necesaria para la interacción entre el prototipo de nodo sensor desarrollado y todos los sensores o transductores seleccionados para cada variable.

4. Construcción del nodo de comunicaciones y de cuatro nodos de recolección de información los cuales tendrán la siguiente configuración de sensores o transductores:

- Nodo 1
    - Dos transductores de conductividad eléctrica del suelo
    - Dos sensores de temperatura del suelo
    - Dos sensores de temperatura ambiente y humedad relativa
    - Un transductor de pH del suelo
    - Un transductor de radiación ultravioleta
    - Un transductor de contenido volumétrico de agua en el suelo

- Nodo 2
    - Un transductor de velocidad y dirección del viento
    - Dos transductores de conductividad eléctrica del suelo
    - Dos sensores de temperatura del suelo
    - Dos sensores de temperatura ambiente y humada relativa
    - Un transductor de volumen de precipitaciones pluviales
    - Un transductor de pH del suelo
    - Un transductor de radiación solar global
    - Un transductor de radiación fotosintéticamente activa
    - Un transductor de contenido volumétrico de agua en el suelo

- Nodo 3
    - Dos transductores de conductividad eléctrica del suelo
    - Dos sensores de temperatura del suelo
    - Dos sensores de temperatura ambiente y humedad relativa
    - Un transductor de pH del suelo
    - Un transductor de contenido volumétrico de agua en el suelo

- Nodo 4
    - Dos transductores de conductividad eléctrica del suelo
    - Dos sensores de temperatura del suelo
    - Dos sensores de temperatura ambiente y humedad relativa
    - Un transductor de pH del suelo
    - Un sensor de presión atmosférica
    - Un transductor de contenido volumétrico de agua en el suelo

5. Para la realización de las pruebas de funcionamiento en campo los nodos deben de contar con autonomía energética (batería) y generación de energía (paneles solares) para que funcionen sin la necesidad de tendido eléctrico.

6. Desplegar los dispositivos en un campo de pruebas y realizar un informe de despeño de los prototipos en campo.

1.5 HIPÓTESIS

Será posible diseñar una red de sensores inalámbricos configurable que tenga la capacidad de integrar solo los sensores o transductores necesarios para obtener información de las variables de interés según el tipo y metodología de cultivo. Información que podría ser utilizada para el manejo de la variabilidad en la producción de los campos agrícolas.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El presente capitulo tiene el propósito de presentar las tecnologías o temas que aportan al desarrollo del proyecto, presentando en primera instancia la importancia de la aplicación de la agricultura de precisión en los campos de cultivo y revisando las variables críticas que influyen en el desarrollo y crecimiento de las plantas. Seguidamente se presentan las redes ad hoc la cual es una arquitectura de computación distribuida que no cuenta con un sistema de procesamiento central y por lo tanto las hace adecuadas para ser desplegadas en un campo de cultivo agrícola para el monitoreo de las variables de interés, las redes de sensores inalámbricos tienen topología de red ad hoc es por esta razón que después de presentar el concepto de las redes ad hoc se presenta la teoría de las redes de sensores inalámbricos y sus distintas arquitecturas, una vez presentadas las redes de sensores inalámbricos se aborda el cálculo de la perdida de potencia de transmisión en las redes de comunicación inalámbricas, ya que este es un tema de suma importancia al momento de asegurar que la información recolectada por los nodos llegue al sistema Agricos®. En este punto se ha presentado teoría que solo abarca redes de comunicación de área local, sin embargo, la información recolectada en el campo debe de ser enviada a una base de datos utilizando un protocolo de comunicación TCP/IP, el cual será implementado entre el sistema Agricos® y el nodo base. Finalmente se aborda el tema del dimensionamiento y diseño de los sistemas fotovoltaicos autónomos, ya estos serán utilizados para el sustento energético de los nodos pertenecientes a la red de sensores inalámbricos que se diseñara en el presente proyecto.

2.1 LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN COMO MÉTODO PARA EL MANEJO DE LA VARIABILIDAD EN LA PRODUCCIÓN DE LOS CAMPOS AGRÍCOLAS

La agricultura tradicional se basa en su mayoría de recomendaciones generales para grandes extensiones de terrenos, de esta manera las labores para grandes regiones geográficas se generalizan según la especie vegetativa a cultivar y el tipo de suelo, esto sin tener en cuenta las características propias del sitio y del cultivo en sí. Este proceso de generalización en las labores agrícolas ha tenido como resultado una degradación ambiental y una ineficiencia del uso de los recursos disponibles teniendo como consecuencia un desarrollo limitado de la potencialidad del cultivo y aumentando los costos de producción (2). La agricultura de precisión busca optimizar el manejo de la

producción agrícola teniendo en cuenta la variabilidad del agro sistema (clima, suelo y vegetación), para que la optimización sea posible en primera instancia se necesita conocer las condiciones actuales en las que se encuentra el campo y después tomar acciones en base a estas condiciones.

La variabilidad que busca manejar la agricultura de precisión se ha clasificado en natural, inducida, espacial y temporal (1). La variabilidad natural, se debe a los procesos naturales como en el caso de los distintos tipos de climas, suelos, topografía y especies tanto vegetales como animales, la variabilidad inducida se debe a las actividades antrópicas sobre el medio, por ejemplo, la compactación de suelos, micro topografía de un lote agrícola, la variabilidad espacial, esta puede ocurrir dentro de un mismo campo de cultivo, por ejemplo, mediante distintas metodologías de cultivo o la variación de la concentración de un nutriente en específico en distintos puntos del suelo y la variabilidad temporal guarda estrecha relación con el clima, por ejemplo, en eventos de precipitaciones pluviales y heladas.

El campo agrícola está constantemente sometido a cambios, no solo cambios ocasionados por las actividades humanas en el proceso de cultivación (degradación del suelo, erosión del suelo), sino también por los cambios climáticos. La FAO (organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura), indica que la agricultura climáticamente inteligente constituye un enfoque destinado a orientar las acciones necesarias para transformar los sistemas agrícolas con el fin de apoyar de forma eficaz el desarrollo del cultivo y garantizar la seguridad alimentaria en el contexto de un clima cambiante (3).

Para poder lidiar con las variaciones antes dichas primero deben de ser conocidas y para ello se deben de monitorear ciertas variables tanto climatológicas como de suelo:

I. Variables climatológicas:
    - Temperatura ambiente
    - Presión atmosférica
    - Humedad relativa ambiente
    - Radiación solar global

- Radiación fotosintéticamente activa
- Radiación ultravioleta
- Velocidad y dirección del viento
- Volumen de precipitaciones pluviales

II. Variables de suelo
    - Temperatura del suelo
    - pH del suelo
    - Conductividad eléctrica del suelo
    - Contenido volumétrico de agua en el suelo

2.1.1. Temperatura ambiente

Esta variable suele utilizarse en casi todas las etapas fenológicas del cultivo, ya sea para detectar condiciones para que una enfermedad o plaga aparezca durante el crecimiento de la planta o para estimar el tiempo de maduración de un fruto y establecer la mejor fecha de cosecha para maximizar la productividad del campo de cultivo.

Es una de las variables climatológicas de más importancia para el óptimo desarrollo de los cultivos que cuentan con una metodología a cielo abierto, junto con el volumen de precipitaciones pluviales y la radiación solar.

La temperatura influye en el crecimiento de las plantas de tal manera que existe un concepto que relaciona la temperatura media por día y la tasa de crecimiento de las plantas, este concepto se trata de los grados de crecimiento diario (Growing Degree Days), el cual es un indicador basado en el clima para monitorear el desarrollo de las plantas, se utiliza tanto en el desarrollo de plagas como de las propias plantas (4).

En condiciones normales con ausencia de sequía y enfermedades o plagas el crecimiento de las plantas tiene una fuerte relación con la temperatura ambiente la cual puede ser utilizada para monitorear y registrar su desarrollo.

Los grados de crecimiento diario relacionan el promedio diario de la temperatura y un umbral base el cual es aplicado por cada tipo de cultivo en base a su desarrollo en específico, por ejemplo, este umbral en el trigo y avena es de 40 grados Fahrenheit.

Los grados de crecimiento diario pueden ser usados para la programación de la aplicación de fertilizantes y de esta manera maximizar el crecimiento del cultivo e incluso programar la aplicación de pesticidas para evitar el brote de una determinada plaga, este dato también es utilizado para la programación de cosechas y determinación de los ciclos fenológicos del cultivo y todo esto en base a la temperatura ambiente y su comportamiento durante el transcurso del día.

Dentro de todo cultivo existen tres puntos o umbrales fundamentales de temperatura:

1. Temperatura mínima de crecimiento: la cual es la mínima temperatura a la que un determinado cultivo comienza a activar sus procesos de crecimiento.

2. Temperatura optima de crecimiento: es la temperatura más ventajosa para el desarrollo de un determinado cultivo.

3. Temperatura máxima de crecimiento: se trata de la temperatura a la cual el cultivo detiene sus procesos de crecimiento debido a la activación de sus mecanismos de defensa contra golpes de calor ya que esta temperatura suele estar por debajo del índice de mortandad térmica.

A continuación, se presenta una tabla en donde se detallan estos tres umbrales en cultivos específicos:

Tabla 1 Umbrales de temperatura para distintos cultivos.

Fuente: elaboración propia.

Cultivo	Mínima	Óptima	Máxima
Maíz	15ºC	25ºC	33ºC
Bayas (arándanos)	8ºC	20ºC	28ºC
Avena	10ºC	25ºC	35ºC
Patatas	12ºC	20ºC	30ºC

2.1.2. Presión atmosférica

Es la presión que la atmosfera ejerce sobre la superficie terrestre, regula las masas de aire cálido y frio, también tiene un efecto directo en la tasa de crecimiento de las plantas ya que si la presión atmosférica disminuye las plantas no podrán absorber gases vitales para su desarrollo como lo son el oxígeno y el dióxido de carbono. Directamente una baja presión atmosférica no obstruye la absorción de estos gases si no que dispersa sus moléculas haciendo que la concentración no sea la adecuada.

Unas de las principales causas en la variación de la presión atmosférica son la altitud, la localización y la temperatura.

La altitud modifica tanto la presión atmosférica como la temperatura ya que la densidad del aire se modifica. El sol irradia energía sobre la superficie terrestre calentándola, la cual a su vez calienta el aire provocando que baje su densidad y haciendo que este aire caliente ascienda hasta la capa de aire donde encuentra un equilibrio en densidad sin embargo al no estar en contacto directo con una fuente de energía que le proporcione calor este se enfría y se contrae provocando un aumento en su densidad, este fenómeno hace que el aire descienda aumentando la presión atmosférica hasta un punto llamado estabilidad barométrica, este punto se caracteriza por no tener vientos, ya que el aire frio descendente es muy pesado y desciende muy lento en forma circular con sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio norte.

Sin embargo, por otro lado, cuando el aire caliente asciende hace bajar la presión provocando una inestabilidad barométrica y creando vientos, ciclones y tornados.

Se puede tomar a la presión atmosférica como un síntoma de la interacción de la superficie terrestre y su mayor fuente de energía radiante, el sol, y gracias a esto la presión atmosférica toma suma importancia para su constante monitoreo en la aplicación de la agricultura de precisión ya que su comportamiento proporciona información muy valiosa del estado actual del clima en donde se encuentra el campo de cultivo.

2.1.3. Humedad relativa ambiente

Al igual que la temperatura ambiente la humedad relativa ambiente se trata de una variable critica en todas las etapas fenológicas de la planta, ya que esta variable puede utilizarse para estimar la perdida de agua de la planta a causa de la transpiración la cual en cantidades excesivas puede ocasionar un crecimiento deficiente de la planta. La humedad relativa ambiente también es utilizada para la previsión de las plagas y enfermedades de las plantas, las cuales causan perdidas en la productividad del campo de cultivo.

Los niveles de humedad fluctúan con los cambios en la temperatura del aire, además, las plantas con su proceso de transpiración agregan vapor de agua al medio ambiente. La cantidad de humedad en el aire contribuye al desarrollo y agravamiento de enfermedades en las raíces y en el follaje de los cultivos, estrés hídrico en las plantas y pérdida de calidad en frutos, esto ocasiona una pérdida en la productividad.

Otra de las grandes funciones de la humedad en la agricultura es hacer la fotosíntesis posible, la humedad relativa, aunque no directamente condiciona la fotosíntesis de las plantas gracias a un concepto llamado déficit de presión de vapor, el cual es una medida de valor la cual puede ser expresada en cualquier medida de presión. Se obtiene a partir de la diferencia entre la presión de saturación del vapor y la presión real del vapor. El rango óptimo de humedad relativa ambiente para que una planta pueda transpirar y abrir sus estomas para que estos sean capaces de captar el Co2 y llevar a cabo la producción de carbohidratos a partir del proceso fotosintético es de aproximadamente 70% al 90% de humedad relativa (5).

El déficit de presión de vapor permite relacionar la tensión a la que se encuentran sometidas las partículas de agua en el aire con respecto a las condiciones térmicas a las cuales se llegaría al punto de saturación, produciendo a su vez condensación.

Puede usarse para previsión de enfermedades determinado si hay riesgo de condensación, programación de riegos y la necesidad de aumentar la humedad en un ambiente de cultivo controlado para de esta manera controlar la conductancia estomática y permitir la fotosíntesis.

Debido a que la planta se desarrolla en una atmósfera que limita su potencial de transpiración por la cantidad de vapor que puede contener el ambiente antes de saturarse, se pueden hacer algunas consideraciones desde el punto de vista fisiológico de la planta, como por ejemplo, al existir un aumento en el déficit de presión de vapor aumentara la transpiración y viceversa, sin embargo esto no significa un aumento en la eficiencia fotosintética, lo cual se debe a la respuesta de las estomas frente al estrés hídrico modificando la transpiración (5).

Por lo tanto, la humedad relativa permite que los estomas de las plantas los cuales son los encargados de absorber las moléculas de dióxido de carbono necesarias para la fotosíntesis se mantengan abiertos, lo cual es mucho más importante que la incidencia de luz fotosintéticamente activa sobre la planta, si los estomas están abiertos la fotosíntesis aún se puede dar con poca incidencia de luz, sin embargo, si los estomas están cerrados aun con gran cantidad de luz incidiendo sobre la planta la fotosíntesis no será posible.

2.1.4. Radiación solar global

El sol es la principal fuente de energía radiante que incide en la planta, parte de esta energía es utilizada para la generación de carbohidratos a partir del dióxido de carbono mediante el proceso fotosintético y por lo tanto esta variable influye en el crecimiento adecuado de la plata, sin embargo un exceso de incidencia de radiación solar sobre la planta puede elevar su temperatura a un punto donde se presentan quemaduras en hojas y frutos, disminuyendo de esta manera la productividad de la planta y por consecuencia del campo.

La energía radiante del sol se mide en potencia (cantidad de energía) la cual es representada por lo watts, por unidad de área, en este caso metros al cuadrado, siendo la unidad de medida de la radiación solar global: $^{w}/_{m^2}$

Esta energía llega a la superficie terrestre en forma de ondas electromagnéticas con longitudes de onda entre los 200 y 4000 nanómetros entre las cuales se distingue la banda de la radiación ultravioleta, infrarroja y visible.

La cantidad de radiación emitida por el sol es de 63 450 720 $^{w}/_{m^2}$, sin embargo, la energía que llega al exterior de la atmosfera terrestre es de apenas 1,353 $^{w}/_{m^2}$ variable durante el año un ± 3% a causa de la elipticidad de la órbita terrestre (6).

La radiación solar es un componente vital para el desarrollo de las plantas ya que estas utilizan un espectro muy específico de entre todas las longitudes de onda de esta radiación para realizar su proceso fotosintético, este espectro de longitudes de onda es conocido como la radiación fotosintéticamente activa y se constituye desde los 400 hasta los 700 nanómetros, la falta de la incidencia de luz sobre la planta suele impedir su desarrollo óptimo, sin embargo por el otro lado esta incidencia de radiación sobre la planta suele elevar su temperatura y por lo tanto la planta tienen que activar mecanismos como la transpiración para regularla, al reducir el sobrecalentamiento, la transpiración excesiva y la foto inhibición presentes en los cultivos al estar expuestos en zonas particularmente calientes, permite que exista una reducción en la fotosíntesis por este exceso de energía calorífica.

Otro de los factores a tener en cuenta con respecto a la relación entre la radiación solar y el desarrollo óptimo de las plantas es la incidencia de la radiación ultravioleta más en específico las longitudes comprendidas entre los 280 y 320 nanómetros llamada radiación UV-B, estas longitudes de onda fuera de abonar al desarrollo de la planta puede empeorarlo (7).

Tabla 2 Longitudes de onda de la radiación solar global y sus efectos sobre las plantas
Fuente: elaboración propia.

Longitudes de onda	Color	Descripción	Efecto
620-700nm	Rojo	Banda de mayor absorción por la clorofila	Positivo
510-620nm	Naranja, amarillo y verde	Baja actividad fotosintética, ocasiona un desarrollo deficiente del follaje de los cultivos	Negativo
380-510nm	Morado, azul y verde	Se trata de la banda más energética la cual puede ser absorbida por la clorofila. Acelera la tasa de crecimiento de los cultivos	Positivo
< 380nm	Ultravioleta	Efectos germicidas. Estas bandas de frecuencias son letales para los cultivos	Negativo

2.1.5. Radiación fotosintéticamente activa

Es el componente de la radiación solar global integrada por las longitudes de onda entre los 400 y los 700 nanómetros las cuales son las responsables de activar el proceso fotosintético de la planta, una deficiencia de radiación fotosintéticamente activa en la planta puede ocasionar un crecimiento deficiente tanto de la planta como de los frutos afectando enormemente la productividad del campo agrícola.

El proceso fotosintético depende más del número de fotones que inciden en el cuerpo de la planta que de la energía de estos fotones incidentes, es por esta razón que para la cuantificación de la radiación fotosintéticamente activa se cuenta la cantidad de fotones en las longitudes de onda comprendidas entre los 400 y 700 nanómetros incidentes por unidad de área y en un tiempo específico, este concepto se conoce como PPFD (por sus siglas en inglés, Photosynthetic Photon Flux Density), sus unidades son los micro moles de fotones/m2 * s.

Un sensor o transductor de radiación fotosintéticamente activa se encarga de cuantificar el flujo de moles por unidad de área de los fotones comprendidos entre las longitudes de onda de 400 y 700 nanómetros y de esta manera obtener la cantidad de fotones activadores de la actividad fotosintética en la planta está incidiendo en ella por día, mes, años.

El transductor de radiación fotosintéticamente activa proporciona una medición instantánea, es decir en el momento de tomar la lectura se proporciona la cantidad de fotones que incidieron sobre el instrumento de medición en ese tiempo en específico. Sin embargo, para los estudios de cómo esta variable afecta el desarrollo de los cultivos existe el DLI (por sus siglas en inglés: Daily light integral). Este es un valor calculado a partir de la suma de todos los valores instantáneos obtenidos del transductor al día. Sus unidades de medición son los moles de luz por metro cuadrado por día: $^{mol}/_{m^2\ dia}$, para un desarrollo de alta calidad de los cultivos el DLI debe estar entre 12 y 28 $^{mol}/_{m^2\ dia}$ (8).

El integrar un transductor de radiación fotosintéticamente activa en un sistema de monitoreo del estado actual de las condiciones climáticas en el campo de cultivo es de vital importancia ya que aportara información valiosa acerca del desempeño óptimo de la actividad fotosintética del cultivo, además si este dato es obtenido junto al dato de la radiación solar global y la radiación ultravioleta se podrá tener conocimiento de todos los aspectos de la radiación solar que afectan el crecimiento de los cultivos.

2.1.6. Radiación ultravioleta

Es el componente de la radiación solar comprendido entre las longitudes de onda de 200 a 400 nanómetros, la radiación ultravioleta se divide en tres categorías: UV-C (comprendida entre los 200 y los 280 nanómetros), UV-B (comprendida entre los 280 y los y los 320 nanómetros) y UV-A (comprendida entre los 320 y los 400 nanómetros) (9), el efecto de la incidencia de la radiación ultravioleta sobre las plantas puede derivarse en una disminución en el área foliar afectando enormemente la producción de follaje y haciendo a las plantas más susceptibles a ataques de plagas.

Al igual que en la radiación fotosintéticamente activa, esta radiación se mide a partir de la cantidad de fotones en las longitudes de onda comprendidas entre los 200 y 400 nanómetros incidentes por unidad de área y en un tiempo específico. Por lo tanto, su unidad de medición también es: $^{\mu mol}/_{m^2\ s}$.

La radiación solar global es de los principales factores que afectan la vida como la conocemos. Esta energía prácticamente regula el funcionamiento de los ecosistemas

terrestres y acuáticos, esto lo logra a partir de su influencia en procesos como la fotosíntesis y su acción sobre factores ambientales como la temperatura y la humedad ambiente. La radiación solar también influye de manera significativa en los ciclos naturales que finalmente condicionan la distribución de los organismos en la superficie terrestre, sin embargo, esta misma energía radiante que hizo posible la vida sobre la tierra puede ser muy perjudicial para la misma mediante un aumento en su intensidad o si la proporción de ondas cortas aumenta sobre límites ya determinados.

La degradación de la capa de ozono ha permitido que aumente la intensidad de la incidencia del espectro ultravioleta en la superficie terrestre y un conjunto de longitudes de onda llamado UV-B es de especial cuidado para las especies vegetales, no es que este conjunto de longitudes de onda sea el más peligroso del espectro ultravioleta si no que por sus características son las ondas más energéticas que en estos días están alcanzando la superficie terrestre, las longitudes de onda más energéticas comprendidas en el espectro ultravioleta son las llamadas UV-C, sin embargo el ozono junto con el oxígeno absorben casi la totalidad de estas longitudes de onda.

Si bien la radiación UV-B comprende una pequeña parte de la región del espectro electromagnético de la radiación solar global, el efecto que causa sobre plantas y animales es significativo.

Para que esta radiación sumamente dañina para las plantas pueda ocasionar alteraciones fisiológicas en las plantas debe de penetrar la hoja y ser absorbida por los cromóforos. Estos tipos de alteraciones van desde la modificación del follaje característico del cultivo, grueso del tallo, orientación de las hojas y perdida de tamaños lo que en cultivos destinados a generar forraje afectada en gran cantidad la productividad.

El contar con un transductor de radiación ultravioleta que sea capaz de detectar sus tres espectros (UV-A, UV-B y UV-C) será de gran utilidad para registrar los cambios de la intensidad en esta región en específico del espectro electromagnético y en base a estas alteraciones poder tomar decisiones que traten de asegurar la productividad del campo.

2.1.7. Velocidad y dirección del viento

La velocidad y dirección del viento es muy utilizada en la previsión de las plagas y enfermedades específicamente en la propagación de la plaga que ataca la planta, para propagarse las plagas utilizan el viento como medio de transporte hacia otras áreas del campo de cultivo afectando cada vez más área conforme la plaga se valla propagando, ocasionando una mayor pérdida de la productividad del campo.

En la gran mayoría de los campos de cultivo, las plantas dependen totalmente del clima para que este les proporcione los materiales básicos para su supervivencia. Las condiciones climáticas adversas pueden causar pérdidas significativas en la producción, especialmente en las etapas de crecimiento del cultivo.

El viento es una variable critica para monitorear en los campos agrícolas ya que no solo puede afectar el óptimo desarrollo del cultivo, sino que también puede afectar el desempeño de algunas actividades agrícolas como:

- Ocasionar deriva en el líquido de fumigaciones o aplicaciones foliares de nutrientes.

- Derribo de postes u otras estructuras dentro del campo de cultivo.

Los vientos muy fuertes pueden ocasionar daños en los cultivos y de esta manera afectar la productividad del campo agrícola, según la escala de Beaufort, el cual es una medida empírica de categorizar los vientos según su velocidad muestra que ante velocidades de viento de 30 a 49 km/h las afectaciones en los cultivos pueden ser:

- Quiebre de ramas y tallos

- Caída de flores y frutos

- Baja polinización por cese de la actividad de las abejas

- Mayor tasa de evapotranspiración

- Baja la eficiencia de la fotosíntesis por el polvo acarreado por el aire hacia la hoja

Sin embargo, vientos moderados a suaves de (3 a 12 km/h) pueden llegar a ser muy beneficiosos para el desarrollo óptimo de los cultivos:

- Renueva el aire facilitando la transpiración de las plantas y por lo tanto su enfriamiento.

- Ayuda a evitar las heladas nocturnas.

- En la etapa de cosecha ayuda al secado de los frutos.

- Transporta el polen ayudando a la fecundación de las flores.

- Remueve la humedad excesiva ayudando a evitar el ataque de patógenos.

Según su intensidad el viento puede ayudar a mejorar la productividad del campo agrícola o empeorarla, es por esta razón que se hace vital contar con un transductor que obtenga la velocidad y dirección del viento en los sistemas de monitoreo del estado actual de los campos de cultivo.

2.1.8. Volumen de precipitaciones pluviales

El monitorear esta variable permite conocer la cantidad de agua que se ha precipitado sobre el campo ante un evento de lluvia, esta información puede ser usada para conocer si los requerimientos de agua del cultivo son cubiertos por la cantidad de agua depositada en el campo mediante las lluvias o se necesita un sistema de riego para completar estos requerimientos. Las precipitaciones pluviales en exceso también pueden afectar la productividad del cultivo lavando o retirando los nutrientes esenciales para la planta fuera del área de la raíz, de igual manera se pueden presentar afectaciones a las plantas debido a la saturación del suelo impidiendo la correcta aeración de las raíces de la planta.

La unidad de medida del volumen de precipitaciones pluviales son los milímetros (mm). En este caso en específico, se trata del espesor de la lámina de agua formada a partir de la precipitación pluvial sobre una superficie plana e impermeable, lo cual equivale a 1 litro por metro cuadrado ($^{l}/_{m^2}$).

En las metodologías de cultivo a cielo abierto las precipitaciones pluviales son en ocasiones la única fuente de agua para los cultivos, dentro de estos requerimientos es sumamente importante conocer el volumen anual de precipitaciones en la región para tener cierta certeza que los requerimientos de agua de un determinado cultivo se satisfacen solo con la cantidad de agua depositada en el campo a parir de las precipitaciones pluviales. Sin embargo, en las metodologías de cultivo que integran sistemas de irrigación o fertiirrigación esta variable no pierde importancia ya que un evento de precipitación además de modificar el clima también puede crear condiciones ideales para que una plaga se desarrolló, como las gotas de agua sobre las hojas o el aumento de la humedad relativa ambiente.

El integrar un transductor que obtenga el volumen de precipitaciones pluviales permitirá conocer a detalle los eventos de lluvias, su frecuencia durante determinado periodo y además el volumen de agua que fue depositado en el campo, esta información podrá ser de suma importancia para la programación de riegos y para la previsión de plagas y enfermedades.

2.1.9. Temperatura del suelo

La temperatura es uno de los principales factores de los procesos bióticos y químicos que tienen lugar en el suelo agrícola, estos procesos pueden ir desde la absorción de nutrientes por la planta hasta la aparición de agentes patógenos que atacan la raíz de la planta. Las enfermedades en las raíces pueden llegar a ser mortales para la planta afectando enormemente la productividad del campo.

Las raíces es uno de los puntos vitales en los cultivos ya que ahí ocurre la absorción de nutrientes y agua, la temperatura en la zona de la raíz es un condicionante muy importante dentro del desarrollo y crecimiento óptimo de la planta, en general el crecimiento de los cultivos aumenta con el aumento de la temperatura edáfica entre

unos 25 y 35 °C, dependiendo de la especie y en general las temperaturas edáficas mínimas de desarrollo van desde los 8 hasta los 15 °C.

Las plantas solo cuentan con la capacidad de regular la temperatura en su follaje, las raíces no cuentan con este sistema, sumado a lo anterior la planta requiere de ciertas temperaturas durante sus distintos ciclos de vida, por ejemplo, se requieren temperaturas superiores en las etapas de germinación y plántula que en las etapas de maduración de sus órganos.

En las zonas donde suelen encontrarse los campos de cultivos la principal fuente de energía que aumenta la temperatura en la superficie del suelo y en el subsuelo es el sol, por lo tanto, las metodologías de cultivo a cielo abierto permiten una incidencia mayor de energía solar sobre la superficie propiciando un aumento de la temperatura en el área de la raíz.

La temperatura actúa sobre los órganos de las plantas como un factor indicador y regulador de los procesos metabólicos de crecimiento y desarrollo, tal es su influencia que algunos órganos pueden morir si ciertos umbrales de temperatura son alcanzados. El contar con un sensor o transductor que obtenga la temperatura en el área de la raíz en los sistemas de monitoreo del estado actual de las condiciones del campo de cultivo es de suma importancia debido a las implicaciones que esta variable tiene en las plantas, además de ser un factor que se relaciona directamente con la temperatura ambiente, el contenido volumétrico de agua en el suelo y la radiación solar global.

2.1.10. Contenido volumétrico de agua en el suelo

Esta variable representa el volumen de agua contenida dentro de una unidad de volumen de suelo, el suelo agrícola se compone de tres principales componentes los cuales son: partículas de suelo, agua y aire, un suelo completamente seco o sin contenido volumétrico de agua tiene aire en todos los poros o espacios entre las partículas de suelo, un suelo completamente saturado tiene agua en todos estos espacios, el manejo de esta variable es sumamente importante para maximizar el rendimiento del campo ya que se relaciona con la correcta aeración de la raíz de la planta y del volumen de agua total disponible para ser aprovechado por los cultivos.

La unidad de medida del contenido volumétrico de agua en el suelo son los metros cúbicos de agua encontrados en una unidad de metro cubico de suelo, es decir: $m^3 de\ agua/_{m^3\ de\ suelo}$. Ya que es físicamente imposible que exista mas de un metro cubico de agua en un metro cubico de suelo, la escala de esta variable es de 0 a aproximadamente 0.7. Donde un suelo con $0.7 m^3/_{m^3}$ se trata de un suelo completamente saturado.

El contenido volumétrico de agua en el suelo depende en gran medida de la composición y tipo del suelo, mientras que su textura influye de manera significativa en la capacidad de retención de agua, un suelo arcilloso con gran cantidad de materia orgánica en su composición retendrá por más tiempo el agua que un suelo arenoso, una de las principales causas del estudio de la composición de los suelos agrícolas es obtener información acerca de su capacidad para retener el agua.

Una de las características más importantes de los campos agrícolas es la capacidad de campo, la cual se refiere a la cantidad de agua la cual el suelo es capaz de retener después de ser saturado y hasta que el potencial hídrico se estabilice (entre las 24 y 48 horas después del evento de irrigación). Ante eventos de precipitaciones pluviales o riegos el agua entra en contacto con la superficie del suelo y esta se mina al subsuelo por acción de la gravedad, sin embargo, en su camino gracias a su capilaridad esta se adhiere a las partículas del suelo quedándose por determinado tiempo dentro del área de la raíz para que esta puede ser aprovechada por la planta.

El volumen óptimo de agua en el suelo para que la planta pueda llevar a cabo una correcta aireación y toma de agua con nutrientes del suelo va desde los 0.3 $m^3/_{m^3}$ hasta los 0.5 $m^3/_{m^3}$. Un suelo completamente saturado no permitirá una correcta respiración de las raíces ocasionando un desarrollo deficiente en el cultivo.

El que un sistema de monitoreo de las condiciones actuales del campo agrícola cuente con un transductor que obtenga el contenido volumétrico de agua en el suelo es de suma importancia ya que esta variable muestra cuánta agua está disponible en el suelo

y sobre todo cuanto tiempo, esto permitirá un manejo más eficiente de los recursos destinados a las actividades de riego.

2.1.11. pH del suelo

Es considerada como una de las variables más importantes en el suelo agrícola ya que es un indicador de la calidad de la absorción de los nutrientes por parte de la planta, el pH óptimo para los suelos agrícolas debe encontrarse entre 5.5 y 7.0 para obtener los mejores resultados y la mayor productividad posible (10).

El pH se mide mediante una escala logarítmica que consta del 0 al 14, el nivel 7 se denomina neutro, del 7 al 0 ácido y del 7 al 14 base o alcalino, una sustancia acida tiende a liberar iones de hidrogeno, por su parte las sustancias base tienden a liberar iones de hidroxilo.

El pH óptimo de crecimiento depende del tipo de cultivo, mientras que unos cultivos como la alfalfa tiende a tener un pH óptimo de crecimiento neutro (6.5 a 7) el de las bayas y las papas suele ser un poco acido (5.0 a 5.5).

Los suelos agrícolas se vuelven ácidos cuando elementos básicos como el calcio, magnesio, sodio y potasio son agregados a él. Otro elemento que dicta las condiciones del pH en los suelos agrícolas es la lluvia, los suelos en condiciones climáticas con lluvias anuales altas suelen ser más ácidos que los suelos ubicados en zonas áridas con poca lluvia anual los cuales tienen a ser neutros. El agua vaporizada se combina con el dióxido de carbono y forma la llamada lluvia acida (ácido carbónico) modificando aún más el pH del suelo.

Sin embargo, lo que más degrada los suelos es la actividad agrícola con la adición de fertilizantes a base de nitrógeno, resultando en una acidificación del suelo, este tipo de fertilizantes contienen o forman amonio el cual incrementa la acidificación del suelo a no ser que este amonio sea absorbido por las plantas, en el suelo el amonio es convertido en nitratos mediante un proceso llamado nitrificación donde sus iones de hidrogeno son liberados.

Un sistema de monitoreo de las condiciones actuales del campo debe de contar con un sensor de pH para la recolección de información valiosa que genere conocimiento acerca del estado nutricional del suelo agrícola y en base a este conocimiento gestionar las labores de fertilización y adecuación del suelo ante las distintas etapas de desarrollo del cultivo para de esta manera maximizar la productividad del campo agrícola.

2.1.12. Conductividad eléctrica del suelo

La importancia del monitoreo de la conductividad eléctrica en el suelo agrícola es que a partir de esta puede ser estimada la concentración de sales en el medio, también puede llegar a ser un indicador de los eventos de fertilización ya que todos los fertilizantes inorgánicos son sales, las altas concentraciones de sales en el campo agrícola puede afectar a la absorción de nutrientes y agua por la planta y como consecuencia generando un desarrollo deficiente lo cual termina afectando el rendimiento cultivo.

Las plantas necesitan obtener los nutrientes necesarios para desarrollarse del sustrato del subsuelo, si estos nutrientes no se encuentran en las concentraciones apropiadas pueden presentarse afectaciones al crecimiento de las plantas. Para proporcionar la cantidad correcta de estos nutrientes se suele aplicar fertilizantes, sin embargo, aplicar fertilizantes en concentraciones o frecuencias elevadas puede dañar los cultivos ya que estos elevan la concentración de sales en el suelo.

Las elevadas concentraciones de sal en el suelo en conjunto con su contenido de agua pueden crear un ambiente hostil para el desarrollo de la planta disminuyendo el agua disponible para la planta en el suelo, es decir disminuye el potencial hídrico del suelo.

La sal en el suelo de cultivo no solo llega ahí por la aplicación de fertilizantes, el agua de lluvia, riego y la disolución de los minerales que ya se encontraban en el suelo también aportan a la acumulación de sal en el suelo.

Uno de los fenómenos que agravan el problema de la salinidad del suelo es la evapotranspiración, cuando llega agua al cultivo ya sea por precipitaciones pluviales o riego la gravedad junto con el agua arrastran la sal al subsuelo tal vez fuera del área radicular del cultivo sin embargo esto dependerá en gran medida del tipo de suelo y de la cantidad de agua depositada en campo, si el agua cargada de sales se estanca o

detiene su camino hacia el subsuelo dentro del área de la raíz las plantas absorberán solo las moléculas de agua y dejaran atrás las moléculas de mayor tamaño, en su mayoría estas moléculas serán sales, sumado a esto la evaporación del agua contenida en el suelo de cultivo dejara también atrás las moléculas de sales, aumentando la salinidad del suelo.

La conductividad eléctrica se mide en Siemens, por lo tanto, la conductividad eléctrica en el suelo será medida en Siemens/distancia, la magnitud más comúnmente encontrada en los medidores de conductividad eléctrica del suelo son los dS/m (deci-Siemens/metro) esta unidad equivale a mS/cm (mili-Siemens/centímetro).

2.2. VENTAJAS DE LA APLICACIÓN DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN LOS CAMPOS AGRÍCOLAS

Como se aborda en el tema anterior la aplicación de la agricultura de precisión permite la caracterización del campo y de esta manera tomar decisiones específicas para un determinado punto dentro de tu campo, evitando de esta manera el tratamiento homogéneo del campo agrícola.

Entre las ventajas que aporta la aplicación de la agricultura de precisión son 4 las que destacan por su importancia social y económica (11).

1. Riego: Permite una mejor administración de los riegos y cantidades de agua por evento de riego, esto gracias a la obtención de datos de microclima, junto con las necesidades hídricas actuales y futuras en particular de cada área de cultivo (contenido volumétrico de agua en campo).

2. Clima: Gracias al monitoreo de las condiciones climáticas actuales, el productor tendrá la capacidad de tomar decisiones concretas para actuar ante las condiciones siempre cambiantes del clima, entre los usos más importantes que se da a los datos del clima destacan:
    - Estimación de las necesidades hídricas del cultivo
    - Previsión de plagas y enfermedades
    - Gestión y previsión del tiempo de crecimiento de los cultivos

3. Desarrollo del cultivo: Conocer el microclima específico y correlacionar esta información con las características de desarrollo del cultivo aportara información sumamente valiosa para la toma de decisiones tanto de manejo como de gestión del campo.

4. Plagas y enfermedades: Son unos de los riesgos más importantes de los campos de cultivo. En la actualidad lo que se busca es fortalecer los cultivos en cada ciclo productivo con productos para mitigar los síntomas y daños que una determinada plaga o enfermedad pueda ocasionar, este tipo de acciones son costosas tanto económicamente como medioambientalmente. Sin embargo, cuando exista un riesgo inminente de padecer una plaga o enfermedad no existe otra alternativa que aplicar tratamientos fitosanitarios, por lo tanto, se debe identificar este riesgo y mediante la red de sensado desplegada para la aplicación de la agricultura de precisión las condiciones favorables para que una plaga o enfermedad aparezca serán reconocidas y consecuentemente el riesgo será identificado.

2.3 SISTEMAS DE MONITOREO REMOTO DE VARIABLES EN LOS CAMPOS AGRÍCOLAS

Para poder crear conocimiento del estado actual del campo de cultivo en base al monitoreo de las variables antes listadas se necesita de un sistema automatizado que obtenga los datos con un intervalo de tiempo establecido en los puntos específicos dentro del campo de cultivo donde se desee monitorear integrando solo los sensores o transductores necesarios para obtener los datos de las variables requeridas por el productor y manteniendo un costo de inversión bajo. Para tratar de satisfacer este requisito se pueden emplear dispositivos de monitoreo que ya se encuentran disponibles en el mercado.

Los equipos existentes en el mercado no cumplen al 100% el requerimiento planteado anteriormente ya que en muchos de ellos se integran componentes, sensores y/o transductores definidos, esto quiere decir que no cumplirán con la parte que el productor es el que decide que variables le interesa monitorear y en qué puntos.

El que el productor tenga la capacidad de integrar los sensores o transductores que recolectan información que él considera crítica o importante es su proceso de cultivo

será de suma importancia, ya que se utilizará el conocimiento que el productor tiene de su campo para configurar la red de sensores inalámbricos y tendrá principalmente dos ventajas:

1. Integrar solo los sensores o transductores necesarios para obtener la información que al productor le interesa monitorear.

2. Solo pagara por los elementos necesarios para obtener los datos que a él le interesan.

Esto le dará el poder al productor de contar con un sistema de monitoreo de variables en campo que cubra con todas sus necesidades y que la inversión realizada sea solamente la necesaria para cubrir sus necesidades en específico.

Por ejemplo, la estación de monitoreo VANTAGE PRO2 de Davis® cuenta con solo las siguientes variables:

- Volumen de precipitaciones pluviales.

- Velocidad y dirección del viento.

- Temperatura y humedad relativa.

- Con la opción de integrar transductores de radiación ultravioleta y solar global con un costo extra.

Sin embargo, además se debe de adquirir un componente externo para proporcionarle a la estación la conectividad necesaria para enviar los datos recolectados vía red GSM.

Davis® también cuenta con nodos sensor llamados ENVIROMONITOR, sin embargo, estos nodos cuentan con capacidades muy limitadas ya que cada nodo tiene la capacidad de conectar solo 4 sensores si se quieren conectar más sensores se necesitará la implementación de otro nodo elevando el costo de la inversión. Sumando a lo anterior

el equipo Davis® no integra un elemento para monitorear la radiación fotosintéticamente activa y el pH del suelo.

A continuación, se presentan dispositivos de monitoreo de variables agrícolas que se encuentran actualmente en el mercado y la red de sensores inalámbricos configurable que se diseñara en el presente proyecto.

Tabla 3 Comparación entre dispositivos de monitoreo de variables en campo.

Fuente: Elaboración propia.

Nombre	Descripción	Envío de datos	Sensores disponibles	Aplicación	Inconvenientes	Ventajas
VANTAGE PRO2	Estación meteorológica	Local, a una consola llamada Vantage Pro2 Console	6	Monitoreo únicamente de clima. No integra sensores o transductores de suelo.	No tiene la capacidad de integrar sensores o transductores de suelo. No permite la configuración de sus sensores o transductores.	Fácil de instalar y no requiere de previa configuración, ya que al tener una arquitectura fija de sensores el dispositivo ya viene programado, solo necesita encenderse y emparejarse con la consola Vantage Pro2 Console.
Estación meteorológica WatchDog	Estación meteorológica	Local, RS-232 para comunicación con una PC o un componente externo de conexión GSM.	9	Monitoreo únicamente de clima. No integra sensores o transductores de suelo.	No tiene la capacidad de integrar sensores o transductores de suelo.	Estación meteorológica de bajo costo, además agregando componentes extra permite agregar sensores o transductores de clima, a parte de los que integra la estación en un inicio.

Nombre	Descripción	Envío de datos	Sensores disponibles	Aplicación	Inconvenientes	Ventajas
ENVIROMONITOR	Red de sensores	Alámbrica: RS-232. Inalámbrica: GSM, Bluetooth y Wifi. Para esto cada nodo necesita un dispositivo el cual les da la capacidad de comunicación inalámbrica, este dispositivo se comunica mediante el puerto de RS-232	7	Monitoreo de suelo y de clima.	Requiere de un elemento extra para poder enviar la información recolectada a un celular o a la nube. No integra sensor o transductor de pH y de radiación fotosintéticamente activa, las cuales tienen gran importancia dentro de la aplicación agrícola.	Se puede crear una red de sensores en el campo con distintos puntos de monitoreo gracias al bajo costo de cada uno de sus nodos sensor.
Red de sensores inalámbricos configurable propuesta en el presente proyecto.	Red de sensores inalámbrica	Inalámbrica: solo cuenta con un solo acceso a la nube, mediante GSM o Wifi. Este componente se le conoce como nodo base y es parte de la red de sensores inalámbricos configurable.	12	Monitoreo de suelo y de clima	La comunicación con la nube solo depende de un solo elemento, el nodo base. Si este elemento, la información de la red entera no podrá llegar a la base de datos para ser almacenada.	Creación de una red de sensores en el campo con distintos puntos de monitoreo gracias al bajo costo de cada uno de sus nodos sensor y lograr una reducción de costos al usar la banda ISM no licenciada de comunicación inalámbrica

Descripción de la red de sensores inalámbricos configurable: Lo que se pretende lograr al diseñar los nodos es que como mínimo sea capaz de integrar un sensor o transductor que obtenga el dato de las variables listadas. Para esto la arquitectura del nodo sensor deberá de ser capaz de integrar por lo menos un sensor o transductor de cada variable listada. Además, los nodos deberán de integrar transceptores para formar una red de comunicación de baja potencia entre los nodos sensor y el nodo base, además que cuente con un sistema de generación energética que sustente las necesidades eléctricas de cada uno de los nodos. De esta manera el productor tendrá la capacidad de configurar los nodos según sus necesidades específicas y pagando solo por lo que necesita. Además, en caso de ser necesario cada nodo sensor debe de tener la capacidad de integrar como mínimo un sensor o transductor de las 12 variables listadas, de esta manera el productor si así lo desea podrá combinar la obtención de variables de clima como temperatura ambiente y humedad relativa con variables del suelo como pH y temperatura del suelo, todo esto integrado y configurado en un solo nodo sensor.

La red de sensores inalámbricos configurable que se pretende diseñar proporcionara una mejor capacidad de configuración que los dispositivos que actualmente se encuentran en el mercado, además de aprovechar la banda ISM no licenciada de comunicación inalámbrica de norte América (900 – 915 MHz) para formar una red inalámbrica de área local de baja potencia para que todos los nodos sensor envíen la información al nodo base y este mediante la red GSM o una red local de Wifi envié la información al servidor de Agricos® o a cualquier otro servicio web, siempre y cuando este esté preparado para decodificar la información enviada por la red de sensores inalámbricos configurable. Esto permitirá un ahorro en la inversión, ya que el usuario solo deberá pagar un solo servicio de telefonía (solo para el nodo base), en caso de que el nodo base envié la información al servidor de Agricos® mediante la red GSM, o en caso de escoger una configuración Wifi para el nodo base, este deberá ser el único dentro de la zona de cobertura de la red Wifi y no todos y cada uno de los nodos sensor pertenecientes a la red.

2.4 REDES AD-HOC

En el apartado anterior se revisaron las variables que más influyen en el óptimo desarrollo de los cultivos y que para poder recolectar datos de estas variables se necesitan

implementar dispositivos especiales equipados con una etapa de procesamiento y otra etapa de obtención de datos, dichos dispositivos se tienen que distribuir en el campo de cultivo, la mejor manera de recolectar información y enviar comandos a estos dispositivos distribuidos en un entorno es mediante las redes ad hoc.

Las redes ad hoc se definen como una arquitectura de computación distribuida, la cual ofrece estructura, tecnología y control independiente implementado en red. Esta arquitectura soporta modalidades de inundación de red (flooding) y de punto a punto (12).

Este tipo de redes se caracteriza por no tener un sistema central de administración, los participantes o nodos de la red participan en la administración de esta, es decir pueden tener tareas de enrutamiento de paquetes y solución de problemas de la red (13).

Una de las principales ventajas de esta topología de red es que se pueden adaptar con facilidad a distintos entornos, son escalables, pueden llegar a ser muy robustas en caso de fallos de algunos de sus nodos y no dependen de un control central para su funcionamiento.

En general cada nodo perteneciente a este tipo de redes posee:

- Una unidad de procesamiento.
- Un transceptor de información.
- Hardware necesario para un propósito en específico del nodo (por ejemplo, en el caso del presente proyecto: sensores o transductores).

Este tipo de red es excelente para la comunicación y recolección de información en elementos distribuidos en un entorno, una de las aplicaciones de este tipo de arquitectura de computación son las redes de sensores inalámbricos o WSN por sus siglas en inglés (Wireless sensor networks), las cuales son explicadas a continuación.

2.4.1 Redes de sensores inalámbricos

Las redes de sensores inalámbricos se tratan de una red inalámbrica ad-hoc que consta de por lo menos dos dispositivos principales, los nodos sensor y el nodo fuente.

Los nodos sensor representan la capa de monitoreo, tienen como función generar datos a partir de una variable física, estos nodos generan información (toman lectura de sus sensores) de manera periódica o ante eventos, luego estas lecturas tomadas son enviadas al buffer del transductor de radio frecuencia para ser transmitidas al nodo fuente o base, el intervalo de tiempo de transmisión o el evento para desencadenar la medición de las variables físicas la define la capa de aplicación de la red de sensores inalámbricos.

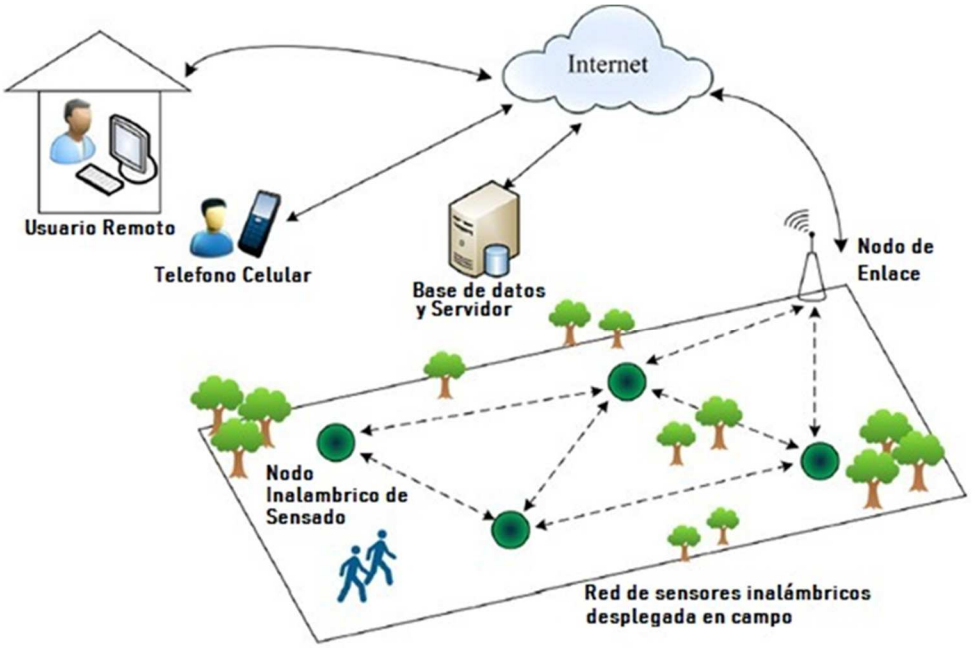

Figura 1 Despliegue típico de una red de sensores inalámbricos.

Fuente: elaboración propia.

En un artículo muy interesante acerca de la aplicación de las redes de sensores inalámbricos en la agricultura se menciona la arquitectura básica de los nodos sensor, los autores indican 6 elementos básicos, "un nodo sensor consta de una tarjeta de circuito impreso que incluye, microcontrolador, Transceptor de radio frecuencia, fuente de alimentación, interfaz de programación, memoria interna tanto para el programa

como para la información generada y las interfaces de comunicación donde se conectaran los sensores" (14), a continuación se presenta un diagrama de un nodo sensor con los elementos mencionados.

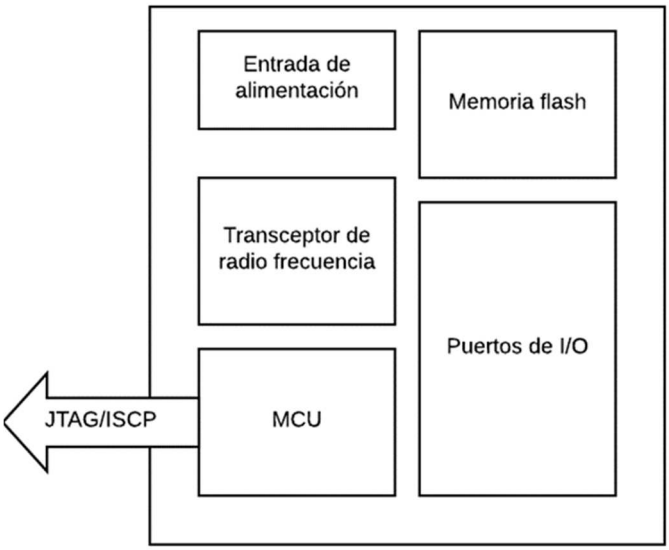

Figura 2 Elementos principales de un nodo sensor.

Fuente: elaboración propia.

Por lo general todos los nodos, se energizan a través de baterías (15), estas pueden recuperar su energía mediante un panel solar u otra fuente de energía a la mano, sin embargo, el panel solar es la mejor opción.

La aplicación de las redes de sensores inalámbricos en la agricultura de precisión tiene un gran potencial debido a que se pueden distribuir los nodos sensor a lo largo del campo agrícola donde se quieren monitorear las variables de interés y comunicar todos esos dispositivos mediante una red de comunicación inalámbrica de baja potencia, esto permitirá el monitoreo en distintos puntos del campo (16).

Además, se tienen que tomar en cuenta las condiciones de operación, el diseño de una red de sensores inalámbricos puede estar enfocada a la recolección de datos en lugares remotos, donde la intervención humana para el funcionamiento de la red podrá ser mínima, esto conlleva a que estos dispositivos deben estar preparados para funcionar en condiciones de polvo, lluvia, altas humedades, entre otras condiciones encontradas en un ambiente a la intemperie, para esto se deben utilizar los materiales adecuados

para proteger el circuito del nodo y elegir los sensores y/o transductores capaces de funcionar en estos ambientes.

Otro tema de gran interés en las redes de sensores inalámbricos es el consumo de energía y el tiempo de vida de la batería del nodo, el tiempo de vida de un nodo en una red de sensores inalámbricos viene definida por el tiempo de vida de su batería, mencionan (14) que "un manejo eficiente de la gestión de la energía en los nodos sensor es un factor crítico en el tiempo de vida de la red de sensores inalámbricos. Por lo que para prolongar el tiempo de vida de la red es crucial reducir el consumo de energía al mínimo posible", la mayor parte del total del consumo energético de los nodos sensor es la transmisión de información mediante el transceptor de radiofrecuencia, por ejemplo, el transceptor de radio frecuencia RFM95 puede alcanzar picos de corriente de hasta los 100 mA durante transmisión y hasta 30 mA durante la escucha activa.

Como se mencionó anteriormente la gestión en el consumo energético de los nodos es crítico y el elemento que más energía consume es el transductor de radiofrecuencia, entonces, para poder gestionar un consumo energético eficiente en los nodos se deben de manejar los estados de consumo del transductor de radiofrecuencia, mencionan (14)"El radio es controlado por un protocolo MAC (control del acceso al medio), por lo que un eficiente manejo del protocolo MAC debe de extender el tiempo de vida de los nodos sensor".

Algunas de las recomendaciones en el tema de energía en los nodos pertenecientes a una red de sensores inalámbricos son:

1. Minimizar los tiempos de escucha de los transceptores de radio.

2. Hibernar los componentes o sensores cuando no se necesiten.

3. Maximizar el rendimiento del enrutado de los paquetes de datos.

4. Utilizar un sistema de regeneración energética, como solar, eólico, etc.

5. Minimizar las colisiones de datos en el canal de los transceptores, esto se logra con una buena implementación del protocolo MAC.

6. Realizando el protocolo de enrutamiento teniendo en cuenta los puntos geográficos de los nodos, así como las capacidades de los transceptores utilizados.

Es vital una buena gestión de la energía en los nodos pertenecientes a una red de sensores inalámbricos ya que este es el factor que define su tiempo de vida, cabe señalar que la durabilidad de una red de sensores inalámbricos es tan fuerte como la vida útil de las baterías utilizadas en los nodos.

2.4.2 Arquitecturas de las redes de sensores inalámbricos

Para conocer cual tipo de arquitectura de las redes de sensores inalámbricos es la más adecuada para su implementación en los campos de cultivo agrícola se deben de analizar sus ventajas y desventajas, a partir de esto se diseñarán los prototipos de los nodos sensor y base del presente proyecto. Las redes de sensores inalámbricos ofrecen una gran oportunidad de aplicación en la agricultura de precisión, las cuales se pueden clasificar en base a tres parámetros:

1. Movilidad de los nodos.

2. Tipos de nodos.

3. Jerarquía del sistema.

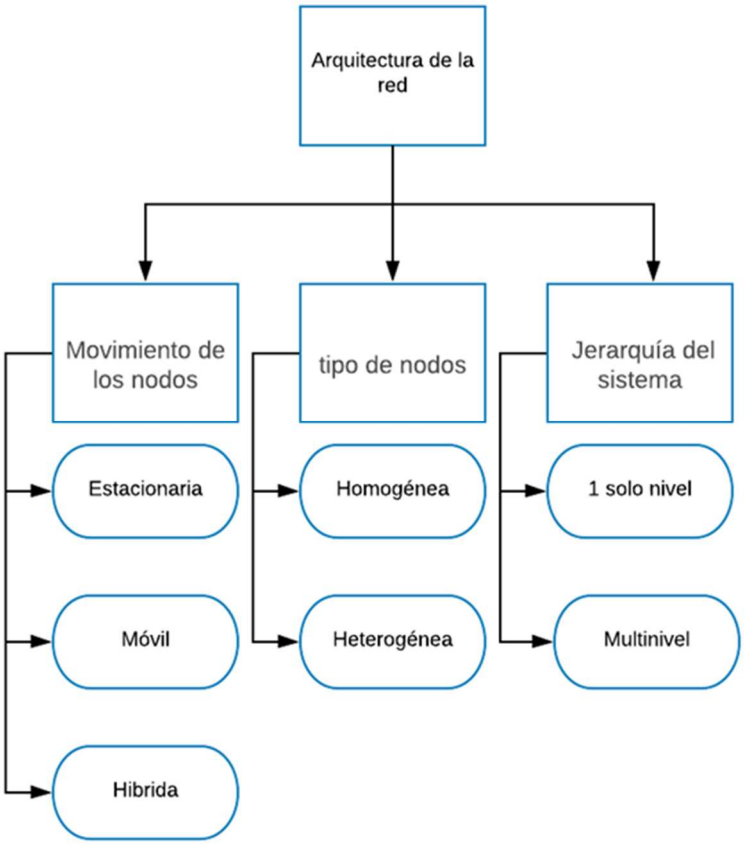

Figura 3 Clasificación de las redes de sensores inalámbricos.

Fuente: elaboración propia.

1. Arquitectura estacionaria

Este tipo de arquitectura clasificada bajo el parámetro de movilidad de los nodos se caracteriza por mantener los nodos sensor y base en posiciones prestablecidas al momento del despliegue de la red inalámbrica de sensores, es decir su posición es fija.

Algunas de las ventajas de este tipo de arquitectura de red de sensores inalámbricos son:

1. Se puede establecer el protocolo de enrutamiento de información antes del despliegue de la red de sensores inalámbricos, el cual se mantendrá sin cambios.

2. Para la georreferenciación de los nodos sensor tal vez no sea necesario implementar un GPS, ya que el nodo no cambiara de posición, abaratando el costo de este, además de tener ventajas en consumo eléctrico.

Algunas de sus desventajas pueden ser:

1. Cada que se desee cambiar un nodo de un punto de medición a otro se deberá de modificar los metadatos de posición de cada nodo para referenciar espacialmente los nuevos datos obtenidos, esto se lograría automáticamente agregando un GPS a cada nodo.

2. Arquitectura móvil

Este tipo de arquitectura también es clasificada bajo el parámetro de movilidad de los nodos sensor, sin embargo, a diferencia de la arquitectura anterior esta se caracteriza por que algunos nodos de la red serán móviles, es decir no tendrán una posición fija, por ejemplo, una red de sensores inalámbricos que incorpore los sensores en drones, maquinaria agrícola, celulares, etc.

Algunas de las ventajas de este tipo de arquitectura son:

1. Se puede conseguir un mapeo espacial temporal de mayor resolución, a coste de un mayor tiempo de recolección de datos.

2. Los nodos sensores deberán de contar con GPS para georreferenciar los datos obtenidos, el cual genera los metadatos necesarios para referenciar espacialmente el monitoreo de las variables de interés en el campo agrícola.

Algunas de sus desventajas pueden ser:

1. Los nodos sensor de este tipo de arquitectura tienden a tener un coste mayor, además de requerir o depender de un elemento externo (dron, maquinaria agrícola, celular) a la red de sensores inalámbricos para realizar su trabajo.

3. Arquitectura hibrida

En este tipo de arquitectura clasificada bajo el parámetro de movilidad de los nodos sensor se obtiene combinando la arquitectura estacionaria con la arquitectura móvil, es

decir en la red de sensores inalámbricos se pueden tener tanto nodos con posición fija, como nodos o elementos con posición variable.

Algunas ventajas de este tipo de arquitectura son:

1. Se puede conseguir un mapeo espacial temporal de mayor resolución.

2. Los nodos sensores deberán de contar con GPS para la georreferencia de los datos obtenidos, el cual genera los metadatos necesarios para referenciar espacialmente el monitoreo de las variables de interés en el campo agrícola.

Algunas de sus desventajas pueden ser:

1. Mayor coste tanto energético como económico debido a la lógica de enrutamiento, el protocolo de control de acceso al medio y las rutinas de recolección de información.

4. Arquitectura homogénea

Este tipo de arquitectura es clasificada bajo el parámetro de tipos de nodos sensor, está formada por nodos que tienen las mismas capacidades, es decir los nodos cuentan con el mismo modelo de transceptor, MCU, periféricos, etc.

Algunas ventajas de este tipo de arquitectura:

1. Este tipo de arquitectura puede ser muy útil en implementaciones donde es desconocida la geografía del campo donde se desplegará la red de sensores inalámbricos.

2. Así como es homogéneo el tipo de sensores también lo será el precio de cada nodo sensor, por lo que hacer estimaciones del costo de implementación de la red de sensores inalámbricos será sencillo.

Algunas de sus desventajas pueden ser:

1. Dado que todos los nodos tienen las mismas capacidades esto puede presentar deficiencias al momento del despliegue en campo, ya que no se tendrán nodos especializados para una determinada tarea o situación.

5. Arquitectura heterogénea

Este tipo de arquitectura es clasificada bajo el parámetro de tipos de nodos sensor, esta arquitectura está formada por nodos que tienen distintas capacidades, por lo que pueden ser específicos para cumplir cierto tipo de tareas, por ejemplo pueden existir nodos que solo tengan la finalidad de recibir datos de los nodos sensor y enviar mediante comunicación GPRS o satelital dichos datos recibidos, estos nodos desempeñaran solo esta tarea, los nodos sensor solo se centran en recolectar y enviar información a este nodo.

Algunas ventajas de este tipo de arquitectura:

1. Se tiene mayor flexibilidad, ya que la red se puede configurar teniendo en cuenta las capacidades especiales de cada sensor, además su despliegue en campo puede llegar a ser más apto en ambientes particulares dependiendo de la metodología de cultivo utilizada en el campo.

Algunas desventajas de esta arquitectura pueden ser:

1. Para su funcionamiento integral se pueden necesitar de más nodos, los cuales podrían desempeñar una tarea vital dentro de la red de sensores inalámbricos, en consecuencia, aumentarían los costos de implementación.

6. Arquitectura de un solo nivel

Este tipo de arquitectura es clasificada bajo el parámetro de jerarquía del sistema, dentro de la cual todos los nodos sensor se comunican al sensor base, el cual recolecta todos los datos de los nodos sensor desplegados en campo.

Ventajas de este tipo de arquitectura:

1. Es menos costosa energéticamente ya que la rutina de recolección de datos de los nodos sensor se puede realizar en poco tiempo (depende del número de nodos sensor), además que el protocolo de enrutamiento es simple ya que solo constara de una comunicación nodo sensor al nodo base.

Desventajas de este tipo de arquitectura:

1. Este tipo de arquitectura es muy limitado en su área de cobertura, ya que está limitada por el alcance del transceptor utilizado, se podría decir que el área de cobertura se reduce al área de propagación de la señal del nodo base.

7. Arquitectura multinivel

Este tipo de arquitectura es clasificada bajo el parámetro de jerarquía del sistema en la cual existen múltiples niveles, los nodos sensor permanecen en el nivel más bajo, después se crean grupos con los nodos sensor y cada uno de estos grupos cuenta con un nodo base, los cuales se comunican entre ellos y sincronizan la comunicación en su grupo, por lo general los nodos que conforman este tipo de arquitectura son heterogéneos (17).

Ventajas de este tipo de arquitectura

1. Pueden abarcar más área dado que los nodos base pueden estar equipados con transceptores más potentes, los nodos sensor pueden incluso tener transceptores de menor potencia.

Desventajas de este tipo de arquitectura

1. Los costos económicos y energéticos son mucho más elevadas que la arquitectura de 1 solo nivel.

Hasta el momento en el presente apartado y en los apartados anteriores se ha hablado de la implementación de una red inalámbrica de comunicación de baja potencia en los campos de cultivo, para garantizar que la información de todos los nodos sensor llegue al nodo base se debe de realizar un análisis de la perdida de potencia de la señal al momento de transmitir la información inalámbricamente.

2.5 LINK BUDGET

Una de las principales capacidades de las redes de sensores inalámbricos es que no necesitan un medio de comunicación cableado para el tráfico de información entre los nodos, esta capacidad permite que la implementación de los nodos en medios como los campos agrícolas se realice sin modificaciones o adecuaciones.

Sin embargo, existe una cuestión a tomar en cuenta al momento de diseñar la red de sensores inalámbricos enfocada a recolectar información de los campos agrícolas, se trata de la fiabilidad del tránsito de información entre los nodos de la red, es decir que los paquetes de información lleguen a su destino.

El llamado link Budget es el cálculo utilizado para determinar los requerimientos de energía necesarios para establecer un enlace inalámbrico entre dos dispositivos (18).
Existen tres preguntas básicas a ser planteadas cuando se diseña una red de comunicación inalámbrica.

1. ¿Cuál es la potencia de radiofrecuencia disponible en los transceptores a utilizar?

2. ¿Cuál es el ancho de banda disponible?

3. ¿Cuál es la fiabilidad requerida?

Por sí solas la potencia y el ancho de banda muestran un amplio panorama de las capacidades de la comunicación inalámbrica dentro de una red, mediante la aplicación del teorema de la capacidad de canal de Shannon:

$$C = B * \ log_2(1 + \frac{S}{N}) \qquad (1)$$

Donde:

C = capacidad del canal (bits/S)

B = ancho de banda del canal (Hz)

S = fuerza de la señal (W)

N = fuerza del ruido en la señal (W)

El ruido del canal está muy relacionado con el ancho de banda del canal, puede ser estimado con la siguiente ecuación

$$N = k * T * B \quad (2)$$

N = potencia del ruido (W)

K = Constante de Boltzmann ($1.38x10^{-23} J/K$)

T = Temperatura del sistema (por lo general se asume una temperatura de 290ºK)

B = Ancho de banda del canal (Hz)

Además de la calidad de la señal otro factor muy importante al momento de diseñar las comunicaciones inalámbricas en los nodos es la distribución, ya que la distribución de los nodos en el campo de cultivo será la que defina las distancias entre el nodo emisor y el receptor.

Las ondas de radio de propagan en el espacio libre, la potencia disminuye a una tasa del cuadrado del rango, es decir con un rango dos veces mayor a la potencia que recibe la antena del receptor, la cual es reducida 4 veces su valor de transmisión (18). Este factor se debe a la dispersión de las ondas de radio conforme se propagan y puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$L = 20\ log_{10}(4\pi\left(\frac{D}{\lambda}\right)) \quad (3)$$

L = perdida de potencia en el trayecto (dB)

D = Distancia entre el transmisor y receptor (m)

Λ = Longitud de onda libre (c/f)

C = velocidad de la luz ($3x10^8\ m/s$)

F = Frecuencia de la señal (Hz)

La ecuación anterior asume una línea de vista directa entre el transmisor y el receptor, es decir no existe nada entre ellos que atenué la señal de radio.

La red de sensores inalámbricos que se pretende diseñar tendrá una estructura estacionaria-heterogénea-de1 solo nivel, por lo tanto, se debe de asegurar que en el punto donde se posicionen los nodos sensor la señal del nodo base llegará con la suficiente potencia.

2.6 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN TCP/IP

Hasta el momento solo se han trato temas del diseño de una red inalámbrica de comunicación en área local, es decir el diseño de la red de sensores inalámbricos, sin embargo, falta un componente muy importante, la comunicación con el servidor de Agricos® y para ello se necesita de un elemento que sea capaz de implementar un protocolo en red llamado TCP/IP.

Para poder enviar la información recolectada en campo por la red de sensores inalámbricos se necesita de un nodo base el cual su singularidad es la de contar con un transceptor ya sea alámbrico o inalámbrico capaz de conectarse a un servidor mediante un DNS o dirección IP para de esta manera enviar a un servidor los datos recolectados y que esta información esté disponible para ser mostrada al usuario.

Para la interacción entre el nodo base y el servicio en la nube de Agricos® se utiliza el modelo OSI para describir la estructura de las actividades llevada a cabo entre estos dos componentes. Esta estructura se muestra en la siguiente figura.

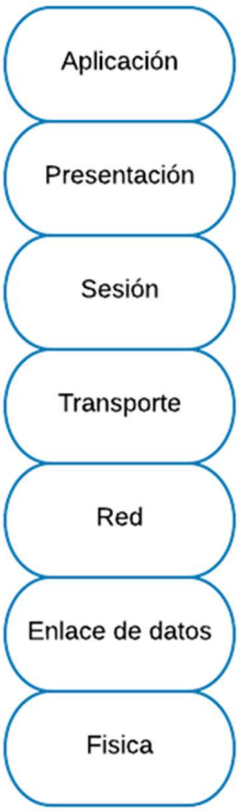

Figura 4 Capas del modelo OSI.

Fuente: elaboración propia.

Dentro de la capa física la información o los datos se presentan a partir de una señal digital, es decir los bits de información se transmiten o se reciben como una señal, esta señal puede venir por cable o como en el caso del presente proyecto a través de señales de radio.

Dentro de la capa de enlace de datos es donde se trabaja o se opera con la conmutación del tráfico de información, su unidad de datos se conoce como trama y es el enlace entre la capa física y la capa de red, dentro de esta capa se generan los errores debidos al control de flujo de la transmisión de las tramas, se podría decir que su tarea principal es recibir los bits provenientes de la capa física y formar la trama de datos libre de distorsiones o ruido. Seguidamente ya dentro de la capa de red la trama se convierte en un paquete de datos y es donde se utiliza la IP para el direccionamiento lógico de los paquetes de datos ya sea para enviarlos o para recibirlos, gracias al direccionamiento lógico esta capa des encapsula los paquetes de datos recibidos y encapsula los paquetes de datos a enviar.

La capa de transporte es la encargada de establecer una sesión temporal de comunicación entre las dos aplicaciones, en este caso entre el nodo base y el servidor donde se almacenarán los datos, esta capa implementa dos protocolos para lograr establecer la comunicación entre servidor y cliente, los cuales son: el protocolo de control de transmisión (TCP) y el protocolo de datagrama de usuario (UDP).

La capa de sesión es la encargada de controlar el inicio y la finalización del canal de comunicación, dentro de esta capa se proporcionan herramientas para la sincronización de las comunicaciones.

Por su parte la capa de presentación decide cómo se presentará la información transmitida a través de la red, dentro de ella tienen lugar las tareas de encriptado y des encriptado de información.

Dentro de la capa de aplicación es donde los usuarios de la red interactúan con los elementos, la unidad de datos de esta capa se le conoce como mensaje, dentro de la capa de aplicación es donde se realizará la mayor parte de la interacción con la API web que recibirá la información de la red de sensores inalámbricos en campo. Dentro de esta capa se agregan las cabeceras de la petición que será realizada al servidor.

Como se mencionó en el apartado donde se revisaron las redes de sensores inalámbricos un elemento de suma importancia es la gestión de la energía eléctrica consumida por los nodos y como ayudaría un sistema de generación energética a aumentar la confiabilidad de la implementación de una red de sensores inalámbricos en los campos de cultivo.

2.7 SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO PARA ENERGIZAR LOS NODOS SENSOR

Hasta este punto ya se ha revisado la importancia de embeber dispositivos con sensores en el campo agrícola para obtener información de las variables de interés, también la necesidad de formar una red de comunicación inalámbrica entre estos dispositivos con el fin de que la información recolectada en campo llegue al servidor de Agricos®, sin embargo uno de los temas fundamentales del éxito del despliegue de una red de sensores inalámbricos en el campo donde se desea aplicar la agricultura de precisión es

el tiempo de vida útil de los nodos. Como se mencionó en el apartado donde se aborda el tema del consumo energético de los nodos pertenecientes a las redes de sensores inalámbricos, "el tiempo de vida de un nodo sensor viene definido por el tiempo de vida de su fuente de alimentación (batería)", por lo tanto, es de suma importancia el diseño de un sistema que administre de energía durante todo el tiempo de operación del nodo, para ello se plantea utilizar un sistema fotovoltaico autónomo.

Los sistemas fotovoltaicos autónomos son aquellos sistemas de generación energética en base a celdas fotovoltaicas, los cuales no necesitan de un elemento de interconexión a otra fuente de energía para funcionar, este tipo de sistemas de generación y almacenamiento de energía cuentan con 4 elementos fundamentales:

1. Paneles fotovoltaicos, son los encargados de producir o generar la energía eléctrica a partir de la incidencia de la radiación solar sobre su superficie de captación.

2. Controlador de carga, este componente tiene varias funciones:
   - Controlar la carga de las baterías.
   - Gestiona el consumo energético de la carga del sistema.
   - protecciones térmicas.
   - Protecciones contra descargas profundas de la batería.

3. Baterías, la función principal de las baterías en los sistemas fotovoltaicos autónomos es la de proporcionar de energía las 24 horas a la carga, los paneles fotovoltaicos se utilizan para recuperar la energía consumida durante el ciclo de descarga de las baterías, los ciclos de descarga en los sistemas fotovoltaicos autónomos se dan durante la ausencia de sol.

4. Carga del sistema, es el elemento o elementos por energizar, en este caso se trata de los nodos pertenecientes a la red de sensores inalámbricos.

A continuación, se presenta un diagrama a bloques que bosqueja la arquitectura de manera general de un sistema fotovoltaico autónomo.

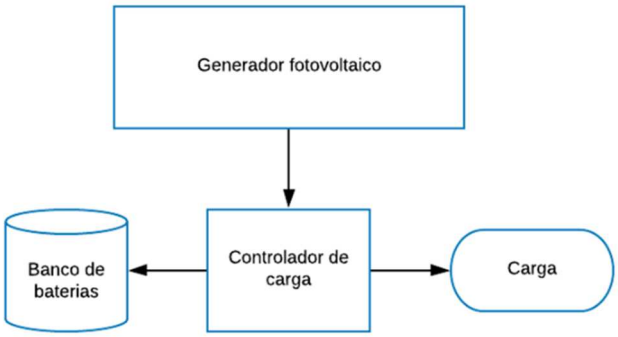

Figura 5 Componentes de un sistema fotovoltaico autónomo.
Fuente: elaboración propia.

El dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos autónomos juega un papel muy importante dentro del correcto funcionamiento de la carga del sistema, en este caso de los nodos.

2.7.1 Dimensionamiento de un sistema fotovoltaico autónomo

La parte fundamental dentro del diseño de un sistema fotovoltaico autónomo es el dimensionamiento del generador fotovoltaico (paneles fotovoltaicos) y del banco de baterías.

Por dimensionamiento de sistema se entiende la tarea fundamental del cálculo del tamaño óptimo de la instalación, es decir el tamaño del generador de energía (panel fotovoltaico) y del acumulador de energía (banco de baterías) (19).

El dimensionamiento de un sistema fotovoltaico autónomo no se basa en contar con una gran tasa de producción energética o que tan eficiente es al momento de captar y transformar la energía radiante del sol en energía eléctrica, se basa en una caracterización en base a las cargas o carga que estarán conectadas al sistema, lo que busca el dimensionamiento en los sistemas fotovoltaicos autónomos es la fiabilidad, es decir si lo dimensionado es capaz de mantener funcionando la carga durante las 24 horas del día, la carga deberá de contar en todo momento con la energía suficiente para poder funcionar.

Para proporcionar la fiabilidad a un sistema fotovoltaico autónomo se pueden utilizar técnicas de ahorro energético combinadas con técnicas de aprovechamiento de la potencia generada por el panel solar.

Una de las técnicas de aprovechamiento de la potencia generada por los paneles en distintos momentos de las horas solares es el seguimiento del punto de máxima potencia o Maximum Power Point Traker (MPPT), esta técnica utiliza la regla de la máxima transferencia de potencia para aprovechar al máximo la energía generada por el panel fotovoltaico.

Un seguidor de punto de potencia máxima se trata de un dispositivo electrónico que hace que el generador de energía fotovoltaica opere al voltaje asociado al punto de máxima potencia, para después ejecutar una conversión a la tensión requerida por la carga (19).

En los nodos pertenecientes a una red de sensores inalámbricos las baterías de los nodos pueden estar sometidas a descargas profundas (durante las horas donde no hay incidencia de luz solar sobre las celdas fotovoltaicas), por lo que es de vital importancia recuperar la energía agotada durante todas estas horas aprovechando solo una ventana de tiempo en la cual los generadores fotovoltaicos producen el voltaje mínimo de operación. De acuerdo a la base de datos The Atmospheric Science Data Center (ASDC), las horas de sol promedio en la ubicación: latitud: 20.65 y longitud: -103.33 (Algún punto en la ciudad de Guadalajara Jalisco) cuenta con solo 5.8 horas solares diarias, (20), es decir las baterías estarán en condiciones de descarga aproximadamente 18 horas.

Dada la condición expresada en el párrafo anterior es sumamente importante aprovechar al máximo la energía durante esas 5 casi 6 horas al día, es aquí donde radica la importancia de la técnica del seguimiento del punto de máxima potencia, ya que al implementarlo se buscará obtener siempre la máxima transferencia de energía entre el generador fotovoltaico y la batería.

La técnica del seguimiento de máxima potencia busca obtener el mejor rendimiento del generador fotovoltaico, para ello necesita ciertos parámetros que deben ser configurados:

1) Voltaje de punto de máxima potencia (Vmpp) del generador fotovoltaico

2) Voltaje nominal del acumulador de energía (baterías).

Mediante estos parámetros el método ajusta automáticamente la potencia transferida a los acumuladores de energía reduciendo las perdidas.

La razón de la palabra "seguidor o traker" en este método es porque se realizan ajustes para seguir el punto de máxima transferencia del circuito generador de energía, ya que la producción del generador fotovoltaico depende de la cantidad de luz solar que incida en su superficie de captación, por lo tanto la potencia generada por un panel fotovoltaico será tan variable como las condiciones climáticas en donde esté instalado, en la imagen siguiente se presenta el comportamiento del perfil de corriente, voltaje y potencia de una implementación de un seguidor de punto de máxima potencia.

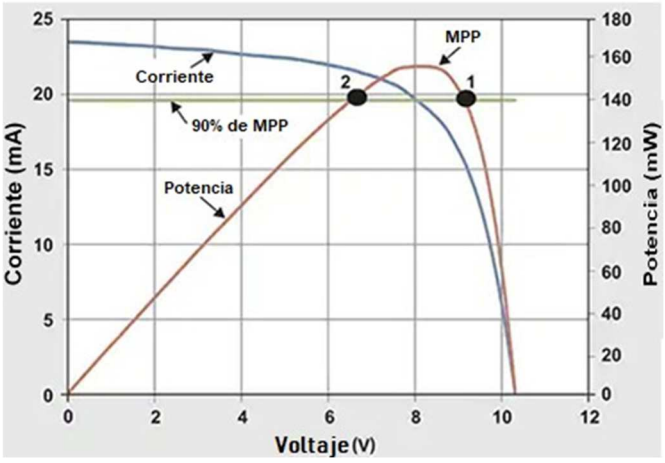

Figura 6 Punto de máxima potencia.

Fuente: **Frezzetti, A., Manfredi, S. y Pagano, M.** *A PV model-based Design of a MPPT controller for energy harvested wireless sensor nodes.* 2015. págs. 105.

El punto de máxima potencia como se puede observar en la ilustración anterior es un punto en el perfil de corriente y voltaje en el que se puede obtener la máxima eficiencia de producción energética en los generadores fotovoltaicos.

La corriente del panel (línea azul) decrementa conforme el voltaje del panel incrementa, por lo tanto, si la corriente es demasiado alta el voltaje tiende a 0 y la potencia del panel cae.

En pocas palabras para que la energía producida por un generador fotovoltaico sea aprovechada al máximo se tiene que mantener un valor determinado de corriente y voltaje, si se conecta una carga al panel directamente esta carga demandara una corriente continua, esta carga continua moverá el parámetro de corriente y la energía del panel no será aprovechada a la totalidad, es aquí donde se presenta una gran oportunidad para la implementación del método de seguimiento del punto de máxima potencia en la regeneración de energía en los nodos, la carga de la batería de los nodos se podrá realizar mediante pulsos, eliminando así del escenario la característica de una corriente de consumo continua al generar pulsos de carga los cuales podrán ayudar a mantener la máxima transferencia de potencia entre el generador fotovoltaico y las baterías de los nodos.

La manera de lograr esto es estableciendo un ciclo de trabajo, es decir una ventana en que se permite la transferencia de potencia entre el generador fotovoltaico y la carga (batería), en la imagen anterior son los puntos 2 y 1, si se observa bien, estos puntos son los extremos de la cresta del perfil del punto de máxima potencia, la acción es conectar o comenzar a generar el pulso de alimentación en el punto 1, cuando se conecta la carga el voltaje comenzara a decrementar y la corriente a incrementar, cuando el voltaje y la corriente lleguen a un valor determinado (punto 2) la carga se desconecta y por consecuencia la corriente comienza a disminuir y el voltaje incrementa hasta llegar de nuevo al punto 1 donde se vuelve a conectar la carga.

Al momento de dimensionar un sistema fotovoltaico autónomo se puede seguir un proceso sistematizado que parte del estudio de la potencia de la carga a alimentar, los pasos a seguir son:

1. Estimar/obtener el consumo de energía de la carga.

2. Dimensionar el generador de energía fotovoltaica.

3. Dimensionar el sistema de acumulación de energía.

4. Definir las características del controlador de carga.

Estimación/obtención del consumo energético

Para considerar que una red de sensores inalámbricos es fiable sus nodos deben de contar con un sistema de alimentación confiable, para ello se debe de conocer el total de la energía consumida por el nodo diariamente, esto se puede realizar utilizando un sensor de corriente o estimándolo con los consumos de los componentes que conforman al nodo.

En los nodos existen elementos que no tienen un consumo de energía constante o fija, es decir que tienden a generar picos de corriente, como por ejemplo los transceptores de radio. En casos como estos se debe de medir el tiempo que dura el evento (transmisión o recepción) y cuál es el valor promedio de la corriente demandada.

Para poder estimar los consumos eventuales dentro de los nodos se recomienda utilizar eventos, estos eventos tendrán sus propios atributos, entre los cuales deben de encontrarse:

- Tiempo de duración del evento.

- Potencia consumida durante el evento.

- Numero de eventos esperados al día.

Para calcular el tiempo diario en el que el evento estará presente se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$t_{di} = t_{ev} * n_{ev} \quad (4)$$

Donde:

t_{di}: $Tiempo\ diario\ de\ presencia\ del\ evento(\frac{h}{dia})$

t_{ev}: $Tiempo\ de\ duración\ del\ evento\ (h)$

n_{ev} : $Numero\ de\ eventos\ al\ dia$ (Día)

El tiempo diario de presencia del evento arrojara el número de horas al día en las que el evento se encuentra activo.

Si se cuenta con la corriente consumida durante el evento se puede obtener la potencia utilizando la siguiente ecuación, solo que para ello necesitara el voltaje de operación del elemento o dispositivo en el que se presenta el evento.

$$p_{ev} = v_{op} * c_{ev} \quad (5)$$

Donde:

p_{ev}: $Potencia\ del\ evento\ (watts)$

v_{op}: $Voltaje\ del\ componente\ o\ dispositivo\ donde\ el\ evento\ tiene\ lugar$

c_{ev}: $Corriente\ consumida\ durante\ el\ evento$

Una vez que se tiene la potencia del evento es momento de calcular la energía consumida al día por el evento, para ello se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$L_{md} = t_{di} * p_{ev} \quad (6)$$

Donde:

L_{md}: $Energia\ diaria\ consumida\ por\ el\ evento\ (\frac{W}{dia})$

t_{di}: $Tiempo\ diario\ de\ presencia\ del\ evento\ (\frac{h}{dia})$

p_{ev}: $Potencia\ del\ evento\ (watts)$

Calcular la energía diaria consumida tanto por elementos que cuentan con consumos contantes o fijos como variables es importante dentro de la estimación de los requerimientos energéticos diarios del nodo, ya que es la etapa más importante durante el dimensionamiento del sistema fotovoltaico autónomo que alimentara energéticamente a los nodos pertenecientes a la red de sensores inalámbricos.

Dimensionamiento del generador fotovoltaico

Existen varios métodos para el dimensionamiento de los generadores fotovoltaicos, cada uno de estos métodos se centran en un punto en específico dentro de las características de funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos autónomos (19). El método de dimensionamiento que se revisará en el presente proyecto se trata del método criterio del peor mes.

Criterio del peor mes: Este método de dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos autónomos toma en cuenta el parámetro de la radiación solar diaria en promedio en cada mes en el punto donde el sistema estará funcionando. Para poder realizar el dimensionamiento del generador fotovoltaico mediante este criterio es necesario contar con una base de datos que muestre la radiación solar global en promedio por mes en la localidad donde se pretendan instalar las redes de sensores inalámbricos.

Una vez que se tenga este dato se debe de obtener la energía diaria consumida por el nodo, a partir de esta información se puede calcular la potencia requerida por el generador fotovoltaico para recuperar la energía consumida por nuestro nodo sensor.

$$W_p = L_{md}/G_d \qquad (7)$$

Donde:

W_p: $Potencia\ requerida\ de\ generación\ por\ mes$ (W)

L_{md}: $Energia\ diaria\ consumida\ por\ el\ nodo\ sensor\ (\frac{W}{dia})$

G_d: $irradiación\ solar\ diaria\ en\ promedio\ en\ cada\ mes\ \ (W/m^2)$

Utilizando el dato de la Potencia requerida de generación por mes se puede escoger la potencia resultante en el mes con menor radiación solar diaria, los cuales por lo general son diciembre y enero, esta potencia necesaria en los meses con menos radiación solar global en promedio será tomada para dimensionar el generador fotovoltaico.

Una vez dimensionado el generador fotovoltaico es momento de dimensionar el sistema de acumulación de energía o banco de baterías.

Dimensionado del Sistema de Acumulación (Batería)

El generador fotovoltaico se utiliza para recuperar la energía utilizada por la carga durante todo su tiempo de uso, el sistema de acumulación de energía proveerá en todo momento la alimentación energética a la carga, para su dimensionamiento se deben de tener en cuenta dos parámetros:

1. Días de autonomía, este parámetro determina el número de días que la batería podrá ser sometida a descarga sin recibir energía de recuperación o carga, es decir cuantos días sin sol es capaz de soportar el sistema fotovoltaico autónomo dimensionado.

2. Profundidad de descarga, se trata del porcentaje de descarga que sufrirá el acumulador de energía durante el ciclo de descarga (horas sin luz solar), este parámetro determina en gran medida la vida útil de las baterías utilizadas, las baterías de ciclo profundo tienden a disminuir su vida útil dependiendo de la profundidad de descarga a las que sean sometidas.

Para dimensionar la capacidad del acumulador de energía se utiliza la siguiente ecuación:

$$C_{nd} = \frac{C_e}{V_{bat}} \qquad (8)$$

Donde:

C_{nd}: Capacidad de la batería (Ah)

$C_e(Wh)$: Consumo energético medio diario de la carga (Ah)

V_{bat}: Voltaje del banco de baterías (V)

En base a esto obtendremos la capacidad mínima requerida, sin embargo, se puede agregar un factor de dimensionamiento a la expresión anterior, este factor multiplica a $C_e(Wh)$ para de cierta manera sobredimensionar el sistema de acumulación de energía y evitar que las baterías sufran descargas demasiado grandes.

$$C_{nd}(Ah) = \frac{C_e * F_{dim}}{V_{bat}} \quad (9)$$

Donde:

F_{dim} $(adimensional)$: Factor de dimensionamiento, puede ser de 1.5 para dimensionar al 50% más el sistema de almacenamiento de energía o 2 para duplicarlo.

$Ce = Consumo\ eneregetico\ medio\ diario\ de\ la\ carga\ (Ah)$

V_{bat}: Voltaje del banco de baterías (V)

Para calcular el porcentaje de descarga diario nominal de la batería se puede utilizar la siguiente expresión:

$$\%_{desc} = \frac{Ce}{Cnd} \quad (10)$$

$Ce = Consumo\ eneregetico\ medio\ diario\ de\ la\ carga\ (Ah)$

$Cnd = Capacidad\ de\ la\ bateria\ (Ah)$

Un porcentaje de descarga muy alto puede perjudicar la vida útil de las baterías y un porcentaje de descarga muy bajo puede dar como resultado un sistema de almacenamiento de energía de mayor costo y tamaño.

Un correcto dimensionamiento del sistema fotovoltaico autónomo proporciona la fiabilidad necesaria a los nodos para poder funcionar dentro de una red de sensores inalámbricos empleada para la recolección de información en el campo agrícola para su uso en la aplicación de la agricultura de precisión.

CAPITULO 3. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

En el capítulo anterior se presentan las investigaciones y las bases de los procedimientos para conseguir el diseño de una red de sensores inalámbricos, además, de las consideraciones a tomar en cuenta durante la definición de su arquitectura, diseño e implementación.

El objetivo del presente capitulo es la de aplicar un procedimiento sistemático para la definición, diseño, construcción, pruebas e implementación de una red de sensores inalámbricos configurable aplicada a la recolección de información dentro del campo agrícola para su posible uso en la aplicación de la agricultura de precisión.

El proceso para llegar a la evaluación de los resultados obtenidos al desarrollar una red de sensores inalámbricos configurable consta de 7 partes con un ciclo de vida en cascada, el cual se muestra en la figura 7.

El primer paso consta en investigar los mejores sensores o transductores disponibles en el mercado para obtener las variables:

- Temperatura ambiente
- Presión atmosférica
- Humedad relativa ambiente
- Radiación solar global
- Radiación fotosintéticamente activa
- Radiación ultravioleta
- Velocidad y dirección del viento
- Volumen de precipitaciones pluviales
- Temperatura del suelo
- pH del suelo
- Conductividad eléctrica del suelo
- Contenido volumétrico de agua en el suelo

Además de los elementos de comunicación inalámbrica, componentes del sistema fotovoltaico autónomo y elementos de instalación del sistema a la intemperie.

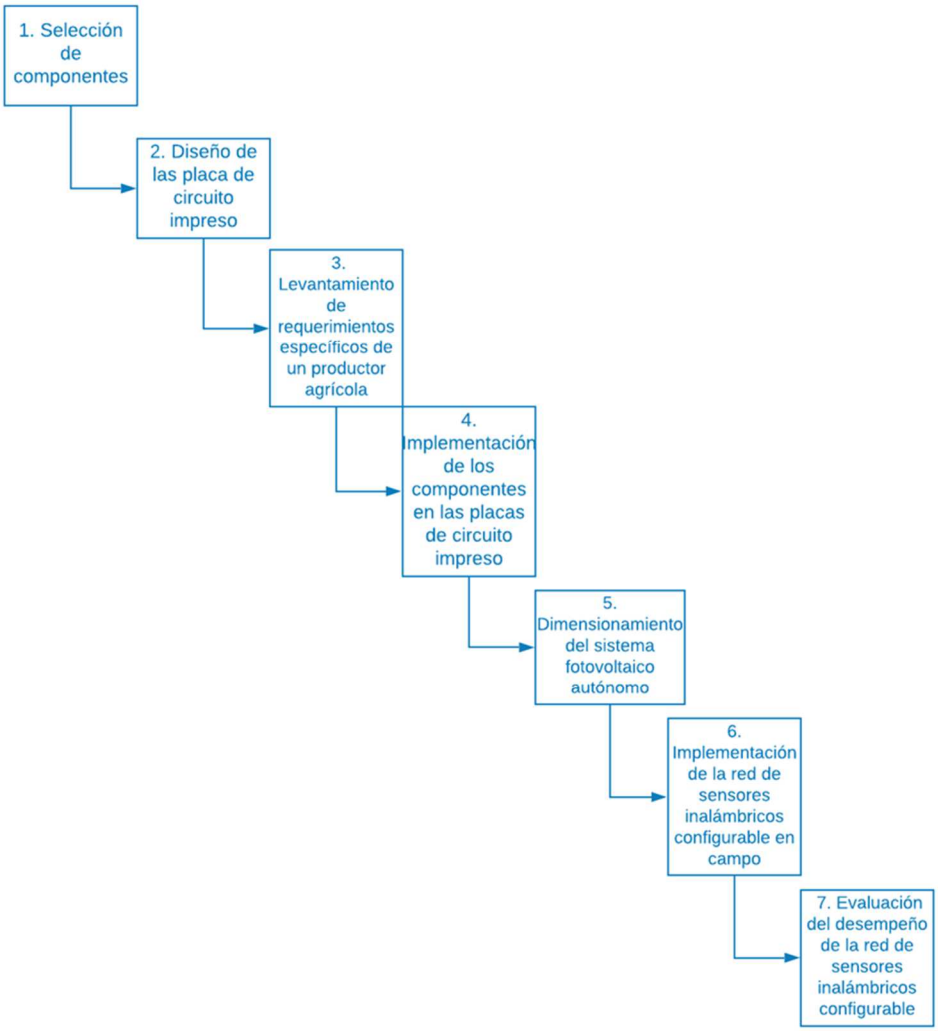

Figura 7 Proceso sistemático para el diseño y evaluación de una red de sensores inalámbricos configurable.

Fuente: elaboración propia.

Una vez teniendo seleccionados todos los componentes que integraran la red de sensores inalámbricos configurable, se procede al diseño de la placa de circuito impreso la cual será usada para integrar todos los elementos de los nodos.

Ya teniendo tanto los componentes y las PCB's de los nodos, se realiza un levantamiento de requerimientos de monitoreo de variables a un productor agrícola. Estos requerimientos servirán para evaluar el grado y la capacidad de configuración de la red de sensores inalámbricos. Una vez levantados los requerimientos, se procede a la integración de los componentes necesarios y el armado de los nodos sensor necesarios para la satisfacción de las necesidades de monitoreo del productor agrícola.

Posteriormente se implementará en campo y se evaluará el desempeño de la red de sensores inalámbricos configurable en campo y su capacidad de recolectar información que podrá ser utilizada para una mejor toma de decisiones y un mejoramiento en el manejo del campo agrícola.

3.1 SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES QUE INTEGRARAN LOS NODOS SENSOR Y NODOS BASE

La selección de los componentes que integrarán la red de sensores inalámbricos se trata de un paso crucial en la definición del diseño de la red de sensores inalámbricos. Estos componentes serán los que definirán las principales características de la red de sensores inalámbricos. Se comienza analizando la sección de sensores y transductores, después los elementos de comunicación, para posteriormente seleccionar la unidad de procesamiento y demás componentes necesarios para el funcionamiento de los nodos.

3.1.1 Selección de los transductores y sensores

En la presente sección se procede a seleccionar los sensores o transductores que conformaran la etapa de obtención de datos de variables de los nodos sensor. Las principales consideraciones que se deben de tomar en cuenta para su selección son:

- Características de operación
- Características técnicas del sensor o transductor
- Precisión o desviación
- Características físicas (¿el sensor es adecuado para su instalación a la intemperie y las condiciones de uso a las que estará expuesto en campo?)

Temperatura y humedad relativa. Para obtener la temperatura ambiente y la humedad relativa se optó por utilizar el sensor SHT10, la interfaz máquina-máquina de este sensor es digital. Se debe de proporcionar una señal de sincronización (pulso de reloj) y un bus bidireccional de comunicación.

Sus características eléctricas son:

Rango de voltaje de alimentación: 2.4 a 5.5 V

Consumo de corriente: midiendo = 0.55 mA, promedio = 28 µA.

Sus características de medición y operativas son:

Rango de medición de humedad relativa: 0 – 100%

Rango de medición de temperatura: -10 - 80ºC

Precisión humedad relativa: ±5.0%.

Temperatura ±0.5ºC.

Además, cuenta con una carcasa de malla de acero inoxidable la cual lo hace adecuado para su funcionamiento a la intemperie.

Figura 8 Sensor SHT10.

Fuente: SHT-10 Mesh-protected Weather-proof Temperature/Humidity Sensor. (2019, October 13). Recuperado de https://www.adafruit.com/product/1298.

Presión atmosférica. Para la obtención de la presión atmosférica se optó por el sensor BMP388 de BOSCH®. La interfaz máquina-máquina de este sensor se trata del protocolo de comunicación I2C.

Sus características eléctricas son:

- Rango de voltaje de alimentación: 3.3V-5.5V
- Consumo de corriente: 0.5mA

Sus características de medición y operativas son:

- Rango de operación: 300-1250 hPa y -40 a 80ºC
- Precisión relativa: ±8 Pa (±0.50m @700-900hPa, 25℃-40℃)
- Precisión absoluta: ±50 Pa (0℃-65℃@300-1100hPa)

Figura 9 Sensor BMP388.

Fuente: Adafruit BMP388 - Precision Barometric Pressure and Altimeter. (2019, October 13). Recuperado de https://www.adafruit.com/product/3966.

Radiación solar global. Para la obtención de la radiación solar global se optó por el transductor SP-110-SS de apogee instruments®, este transductor incorpora un fotodiodo de célula de silicio. Tiene potenciales aplicaciones en la agricultura, meteorología, monitoreo de la eficiencia de celdas fotovoltaicas, etc. Además, cuenta con conector ip-68 (grado marino).

Sus características eléctricas son:

- Alimentación: *self powered*

Sus características de medición y operativas son:

- Espectro de medición: 360 a 1120 nm
- Ambiente de operación: de -40 a 70ºC, de 0 a 100% RH. Pude ser sumergido en agua hasta 30 metros de profundidad.
- Precisión: 0.2 mV por Wm^{-2}
- Factor de calibración: 5 Wm^{-2} por mV.

- Rango de salida: de 0 a 400 mV.

Figura 10 Transductor SP-110-SS.

Fuente: SP-110-SS: Self-Powered Pyranometer. (2019, October 13). Recuperado de https://www.apogeeinstruments.com/sp-110-ss-self-powered-pyranometer/.

Radiación ultravioleta. Para la obtención de la radiación UV se optó por el transductor SU-100-SS de apogee instruments®. Este transductor incorpora un fotodiodo que detecta los rangos de UVA y UVB, tiene potenciales aplicaciones en la agricultura y meteorología. Cuenta con conector ip-68 (grado marino).

Sus características eléctricas son:

- Alimentación: *self powered*

Sus características de medición y operativas son:

- Espectro de medición: 250 a 400 nm
- Ambiente de operación: de -40 a 70ºC, de 0 a 100% RH
- Precisión: 0.2 mV por Wm^{-2} o $0.61\ \mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$
- Factor de calibración: 5 μmol m^{-2} s^{-1} per mV; 1.65 W m^{-2} per mV

Figura 11 Transductor SU-100-SS.

Fuente: SU-110-SS: ULTRA VIOLET SENSOR. (2019, October 13). Recuperado de https://www.apogeeinstruments.com/content/SU-100-spec-sheet.pdf.

Velocidad y dirección del viento. Para la obtención de ambas variables se optó por utilizar un anemómetro de la marca Davis Instruments®. Este instrumento de medición integra un transductor de la velocidad del viento con salida en frecuencia de pulsos y un transductor de orientación de viento con una salida resistiva.

Sus características de medición y operativas son:

- Velocidad de viento: sensor magnético de estado sólido (pulso por revolución)
- Rango de medición: 0.5 a 89 m/s
- Precisión: ± 1 m/s
- Dirección del viento: Potenciómetro con resolución de 16 pasos (aproximadamente 22. 5°)
- Precisión: ± 3°

Figura 12 Anemómetro Davis®.

Fuente: Anemometer for Vantage Pro2. (2019, October 13). Recuperado de https://www.davisinstruments.com/product/anemometer-for-vantage-pro2-vantage-pro/.

Radiación fotosintéticamente activa. Para la obtención de la radiación fotosintéticamente activa se optó por el transductor SQ-110-SS de apogee instruments®. Este transductor ha sido calibrado para su uso en ambientes exteriores expuesto a la luz solar, aplicaciones potenciales van desde meteorológicas hasta como monitor de la calidad de la fotosíntesis en los campos de cultivo. Cuenta con conector ip-68 (grado marino).

Sus características eléctricas son:

- Alimentación: *self powered*

Sus características de medición y operativas son:

- Espectro de medición: 410 a 655 nm
- Ambiente de operación: de -40 a 70ºC, de 0 a 100% RH
- Precisión: 0.2 mV $\mu mol\, m^{-2}\, s^{-1}$
- Factor de calibración: 5 µmol m^{-2} s^{-1} per mV
- Salida calibrada: 0 a 800 mV

Figura 13 Transductor SQ-110-SS.

Fuente: SQ-110-SS: Sun Calibration Quantum Sensor. (2019, October 13). Recuperado de https://www.apogeeinstruments.com/sq-110-ss-sun-calibration-quantum-sensor/.

Temperatura del suelo. Para la obtención de esta variable se optó por utilizar el sensor DS18B20 de Dallas semiconductor®, la interfaz máquina-máquina de este sensor es one-wire. Gracias a su case resistente al agua este sensor puede ser sumergido hasta 10 metros bajo la superficie.

Sus características eléctricas son:

- Alimentación: 3 a 5.5 V
- Consumo de corriente: 4mA

Sus características de medición y operativas son:

- 9 y 12 bits de resolución
- Ambiente de operación: de -55 a 125ºC, de 0 a 100% RH
- Precisión: ±0.5°C de -10°C a +85°C

Figura 14 Sensor DS18B20.

Fuente: Adafruit Sensor DS18B20. (2019, October 13). Recuperado de https://www.adafruit.com/product/381.

pH del suelo. Para la obtención del potencial de hidrogeno en el sustrato del subsuelo se optó por utilizar el transductor de pH de AtlasScientific®.

Sus características eléctricas son:

- Alimentación: 3 a 5.5 V
- Consumo de corriente: 19mA

Sus características de medición y operativas son:

- Rango de medición: 0-14
- Ambiente de operación: de 1 a 99ºC, de 0 a 100% RH
- Precisión: ±0.002
- Tiempo de recalibración: aprox. 1 año.

Figura 15 Transductor de pH.

Fuente: pH probe. (2019, October 13). Recuperado de https://www.atlas-scientific.com/probes/ph-probe/.

Conductividad eléctrica del suelo. Para la obtención de la conductividad eléctrica del suelo se optó por utilizar el transductor de EC de AtlasScientific®.

Otro factor importante para tomar en cuenta para la selección de este transductor es el tipo de suelos donde será instalada la sonda de conductividad eléctrica, ya que existen diferentes rangos de medición. AtlasScientific® cuenta con tres tipos de sondas:

- K 0.1, rango de medición de 0.07 µS/cm a 50,000 µS/cm
- K 1.0, rango de medición de 5 µS/cm a 200,000 µS/cm
- K 10, rango de medición de 10 µS/cm a 1S

Para la sonda K 0.1 estas son sus características:

- Alimentación: 3 a 5.5 V
- Consumo de corriente: 23mA

Sus características de medición y operativas son:

- Rango de medición: 0.07 µS/cm a 50,000 µS/cm
- Ambiente de operación: de 1 a 99ºC, de 0 a 100% RH
- Precisión: ±2%
- Tiempo de recalibración: aprox. 10 años.
- Presión máxima de operación: 3,447 kPa.

Figura 16 Transductor de conductividad eléctrica.

Fuente: EC k 1.0 probe. (2019, October 13). Recuperado de https://www.atlas-scientific.com/probes/EC-k1.0-probe/.

Contenido volumétrico de agua en el suelo. Para la obtención de esta variable, se optó por el transductor de contenido volumétrico de agua en suelo de METERGroup®. Este transductor obtiene su dato midiendo la constante dieléctrica del medio utilizando tecnologías capacitivas y de variación de frecuencias en la señal de medición.

Sus características eléctricas son:

- Alimentación: 3 a 15 V
- Consumo de corriente: 15mA

Sus características de medición y operativas son:

- Rango de medición: 0 a 57% VWC
- Ambiente de operación: de -40 a 50°C, de 0 a 100% RH
- Precisión: ±0.03 $M^3/_{M^3}$
- Rango de salida: de 1,000 a 2,500 mV
- Resolución: 0.001 $M^3/_{M^3}$

Figura 17 Transductor de contenido volumétrico de agua en suelo.
Fuente: SIMPLE SOIL MOISTURE SENSING. (2019, October 13). Recuperado de https://www.metergroup.com/environment/products/teros-10/.

3.1.2 Selección de los componentes de comunicación

Estos elementos serán los encargados del control de acceso al medio de las comunicaciones inalámbricas para la transferencia de información de un punto a otro, y de la red implementada en campo al servicio en la nube de Agricos®

Transceptor de radio frecuencia. Para la transferencia de información de manera local en la red de sensores inalámbricos se optó por el transceptor de radiofrecuencia RFM95

de HOPERF electronic. Este transductor trabaja bajo las especificaciones del protocolo de comunicaciones inalámbricas $LoRa^{TM}$.

Sus especificaciones son:

- Interfaz M2M: SPI
- Potencia de transmisión programable de +5 dBm hasta +20 dBm
- Tasa de transmisión de bits programable hasta 300 kbps
- Bajo consumo en recepción: 10.3 mA, 200 nA manteniendo el registro de entrada sin borrar
- Rango de frecuencias de la señal: 868/915 MHz
- Factor de dispersión de la señal: 6-12
- Ancho de banda: 7.8 – 500 KHz
- Consumo en transmisión: 50 mA (+13 dBm) hasta 150 mA (+20 dBm)
- Consumo en canal de escucha abierto: 30 mA.
- Viene con un level-shifter integrado, por lo tanto, se puede utilizar con lógica de 3.3 y 5V.

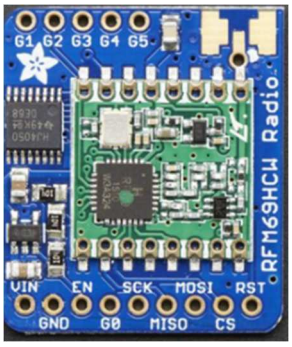

Figura 18 Transceptor de radiofrecuencia.

Fuente: elaboración propia.

Elementos de comunicación al servicio de Agricos®. El nodo base de la red de sensores inalámbricos configurable cuenta con dos opciones de comunicación a la nube:

1. Wifi
2. GSM

Módulo de Wifi. Para esta tarea se optó por implementar el módulo Wi-Fi ATWINC1500 de Microchip®, se trata de un módulo que a través de una interfaz SPI proporciona al MCU la capacidad de operar en una red Wi-Fi.

Sus características son:

- Potencia de salida: 18.5 dBm
- Interfaz M2M: SPI
- Temperatura de operación: -40 hasta 85ºC
- Rango de frecuencias de la señal: 2.412-2.472 MHz
- Consumo energético en transmisión: 287 mA
- Consumo energético en recepción: 83 mA
- Rango de voltaje: 3.0V a 4.2V.
- Servicios en red: DHCP, DNS, TCP/IP (IPv4), UDP, HTTP, HTTPS
- Memoria flash de 4 Mb.
- Protocolos de seguridad: WPA/WPA2 Personal and Enterprise, TLS, SSL

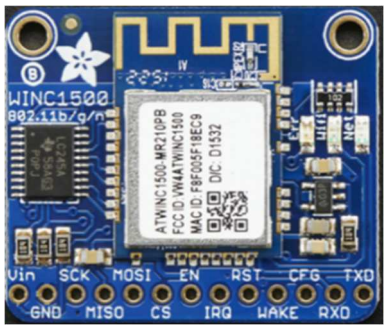

Figura 19 ATWINC1500.

Fuente: elaboración propia.

Módulo GSM. El módulo se basa en el chip SIM800H que cuenta con una interfaz de comandos AT. Los 2.8 V del módulo se convierten para que el usuario seleccione entre 3.3V o 5V. Trabaja con un rango de voltaje de 3.4 a 4.4V, edemas cuenta con la capacidad de bajo consumo de energía.

Figura 20 SIM800H.

Fuente: Adafruit FONA 808 Shield - Mini Cellular GSM. (2019, October 13). Recuperado https://www.adafruit.com/product/2636.

Integra un amplio conjunto de protocolos de Internet (TCP / protocolos UDP, protocolo FTP), las interfaces estándar de la industria (UART) y abundantes funciones para aplicar el módulo a una amplia gama de aplicaciones máquina-máquina, tales como la medición, sistemas, soluciones de seguridad, enrutadores de seguimiento, POS inalámbrico, dispositivos informáticos móviles, PDA, Tablet PC y muchas más.

Sus características son:

- Temperatura de operación: -40 hasta 85°C
- Rango de frecuencias de la señal: 850/900/1800/1900MHz
- Consumo energético en transmisión: 287 mA
- Consumo energético en recepción: 83 mA
- Rango de voltaje: 3.0V a 4.2V.
- interfaz de comandos AT
- Envía y recibe mensajes SMS
- Funcionalidad de GPRS (TCP/IP, HTTP)

3.1.3 Unidad de microcontrolador

Para la integración y el procesamiento provenientes de la etapa de sensado de los nodos sensor se necesitan implementar los siguientes protocolos:

- I2C
- One Wire
- 5 puertos ADC

- Two wire
- 1 entrada con vector de interrupción activado por hardware.

Además, contar con SPI para implementar el transductor de radiofrecuencia. El MCU por el que se optó fue el ATMega328PB-AU, se trata de un microcontrolador de 8 bits con tecnóloga RISC.

Las características de este MCU son:

- Cuenta con 131 instrucciones
- 32 x 8 GPR`s
- 32 KBytes de memoria flash para guardar el programa incrustado
- 1 KBytes EEPROM
- 2 KBytes SRAM
- Ciclos de escritura/borrado: 10,000 flash y 100,000 EEPROM
- Voltaje de operación: 1.8 a 5.5V
- Temperatura de operación: -40ºC a 105ºC

Periféricos

- 2 timer/contadores de 8 bits
- 3 timer/contadores de 16 bits
- 10 canales con salida PWM
- 8 canales de ADC de 10-bits
- 2 canales de comunicación serial USART
- 2 interfaces de comunicación SPI
- 2 interfaces de comunicación 2-wire compatibles con I2C
- On-Chip Analog Comparator

I/O

- 27 líneas programables de I/O

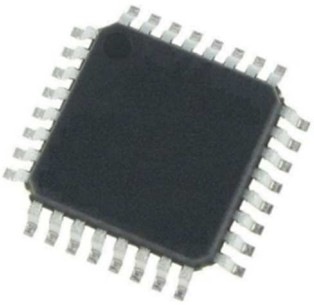

Figura 21 ATMega328PB-AU.

Fuente: Adafruit bootloader-programmed chip (Atmega328P). (2019, October 13). Recuperado https://www.adafruit.com/product/123.

Una vez que se tienen identificados todos los componentes que conformaran los nodos de la red de sensores inalámbrica configurable, es momento de diseñar las placas de circuito impreso que serán utilizadas para integrar todos estos componentes en un sistema embebido funcional.

3.2 DISEÑO DE LAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO

Una vez seleccionados todos los componentes y contando tanto con sus características de operación y técnicas es momento de diseñar la tarjeta de circuito impreso para los nodos de la red de sensores inalámbricos configurable.

La placa de circuito impreso se diseñó teniendo en cuenta los siguientes puntos:

Restricciones mecánicas

- El tamaño de la PCB debe de ser el apropiado para el montaje dentro del gabinete de protección.
- La PCB debe de contar con orificios de fijación
- Los componentes montados sobre la PCB no deben de exceder el borde de la PCB.

Restricciones de ensamblaje

- Las líneas, componentes y bordes de pistas deben de estar por lo menos a 0.5 mm del borde de la PCB
- El espacio entre componentes debe de ser por lo menos de 1mm

- Mantener los conectores y terminales cerca del borde de la PCB.

Recomendaciones

- Agrupe los componentes similares y oriéntelos hacia la misma dirección
- Mantén todos los componentes y terminales en una sola cara
- Implementar red p capa de tierra sobre la PCB
- Las pistas de alimentación y GND deben de soportar la corriente que circulara por ellas.
- Si es necesario utilice pistas para remover el calor de los componentes.
- No deben existir trazos de vías en 90º
- Preferir los ángulos redondeados sobre los ángulos de 45º

3.2.1 Diseño de la placa de circuito impreso de los transductores de pH y conductividad eléctrica

El objetivo de esta PCB es comunicar los conectores tipo BNC de los transductores de PH y conductividad eléctrica a los aisladores de señales y la salida de los aisladores al bus I2C de interfaz de comunicación al microcontrolador. A continuación, se muestra el diagrama esquemático de esta PCB.

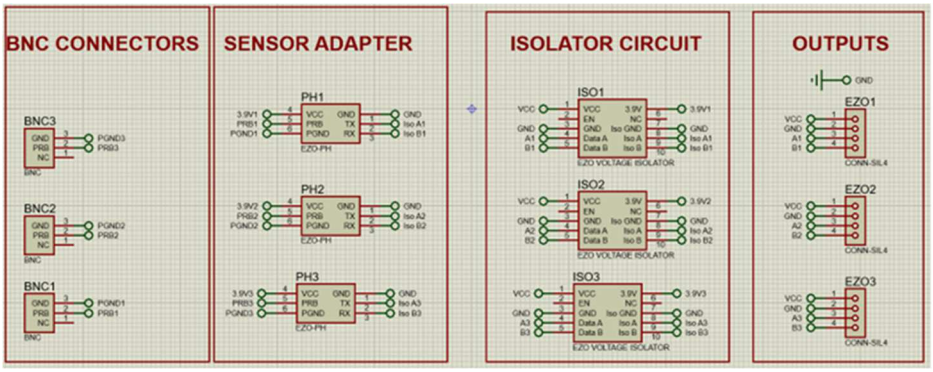

Figura 22 Diagrama esquemático de la PCB de pH y conductividad eléctrica.

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta los puntos de diseño revisados al principio, se diseña el foot print de la placa de circuito impreso.

A continuación, se muestra la vista superior de la PCB diseñada.

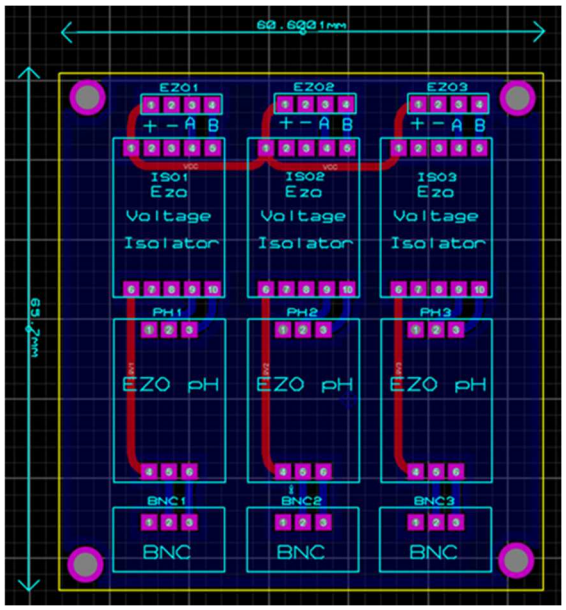

Figura 23 Vista en 3D de la PCB

Fuente: elaboración propia.

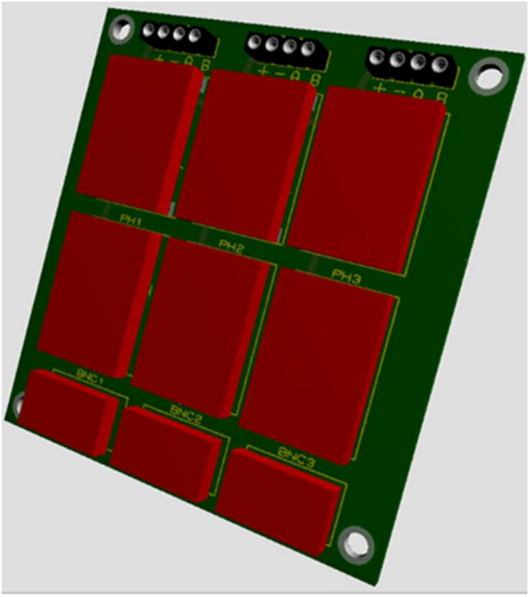

Figura 24 Vista superior de la PCB

Fuente: elaboración propia.

3.2.2 Diseño de la placa de circuito impreso de los nodos sensor

El objetivo de esta PCB es conectar todos los componentes que conforman el nodo sensor a la unidad de microcontrolador. A continuación, se muestra el diagrama esquemático de la PCB.

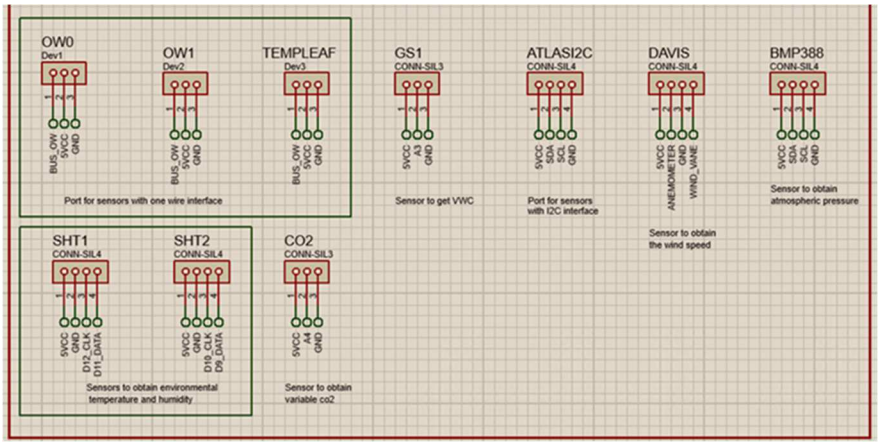

Figura 25 Componentes en etapa de sensado.

Fuente: elaboración propia.

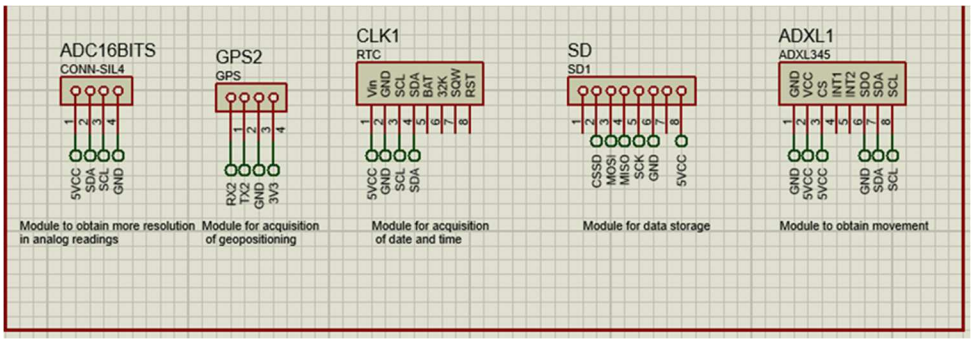

Figura 26 Módulos del nodo sensor.

Fuente: elaboración propia.

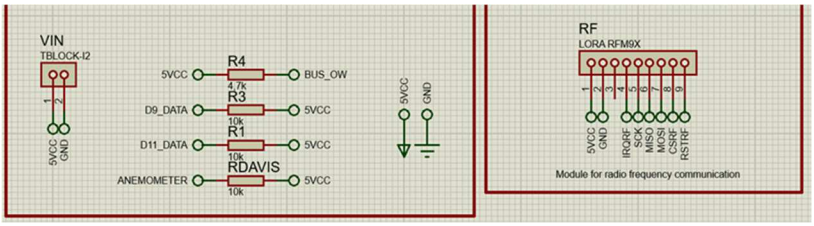

Figura 27 Componentes pasivos y transceptor de radiofrecuencia.

Fuente: elaboración propia.

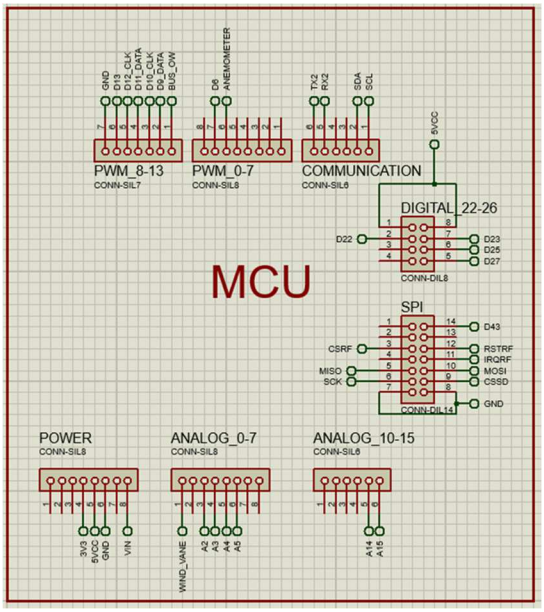

Figura 28 Unidad de microcontrolador.

Fuente: elaboración propia.

Una vez teniendo el esquemático de la placa de circuito impreso se pasa al diseño el *foot print*.

A continuación, se muestra la vista superior de la PCB diseñada.

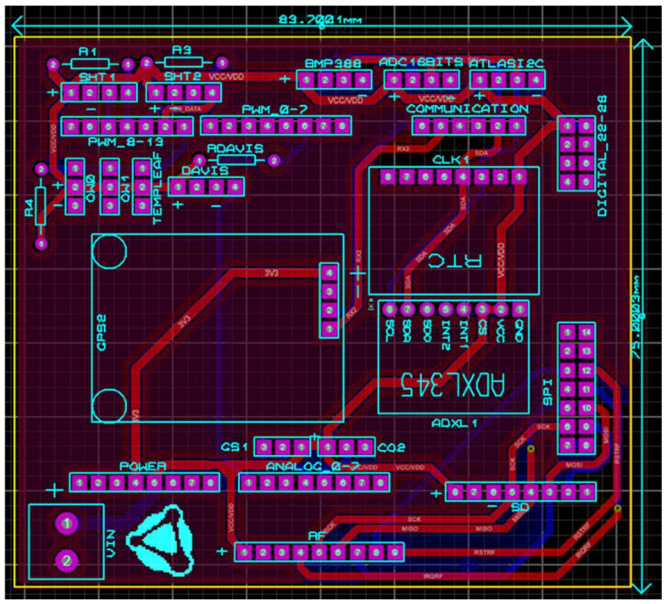

Figura 29 Vista superior del foot print de la PCB de los nodos sensor.

Fuente: elaboración propia.

3.2.3 Diseño de la PCB para el nodo base

El objetivo de esta placa de circuito impreso es realizar las conexiones entre los módulos de la placa base y la unidad de microcontrolador. A continuación, se muestra el diagrama esquemático de esta PCB.

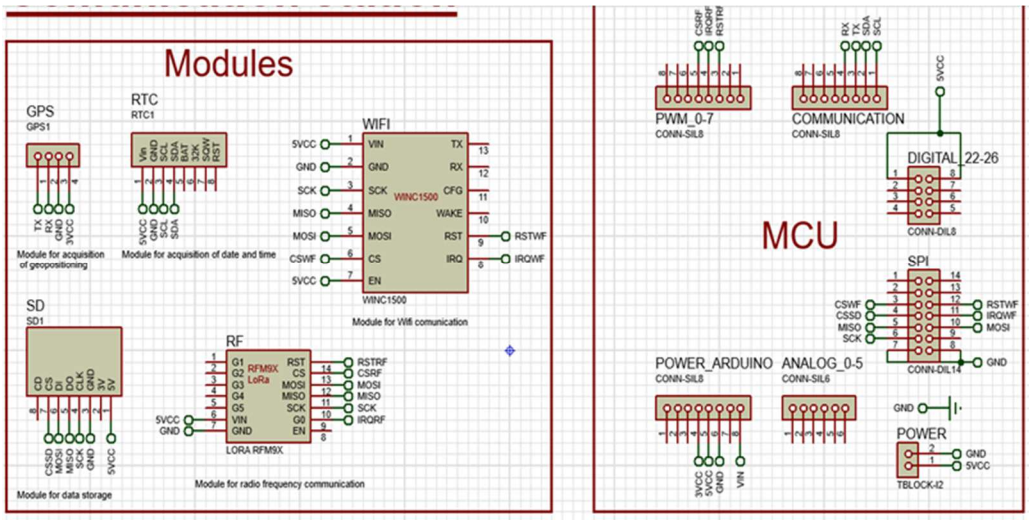

Figura 30 Módulos y su conexión con la unidad microcontrolador.

Fuente: elaboración propia.

Una vez teniendo el esquemático de la placa de circuito impreso se pasa al diseño el foot print. A continuación, se muestra la vista superior de la PCB diseñada.

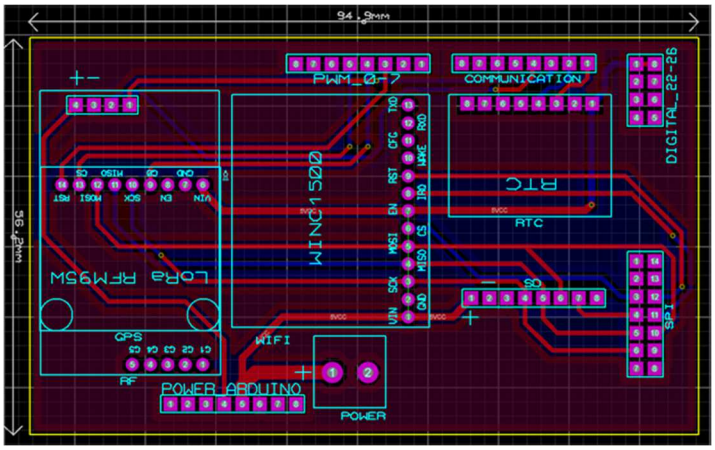

Figura 31 Vista superior del foot print de la PCB del nodo base.

Fuente: elaboración propia.

3.2.4 Maquila de las placas de circuito impreso

El siguiente paso es fabricar las placas de circuito impreso las cuales serán usadas para armar y configurar los nodos de la red de sensores inalámbricos, para ello es necesario mandarlas a maquilar. Para ello los softwares de diseño de placas electrónicas generan un set de archivos tanto de configuración como de instrucciones especiales para las maquinas que se encargan de fabricarlas llamados *GERBERS*. Estos archivos contienen comandos que debe de seguir el sistema de maquinado de la PCB para fabricarla, se podría decir que son instrucciones que se le dan a la máquina para que el resultado sea la placa de circuito impreso que se desea fabricar. A continuación, se muestran las placas de circuito impreso.

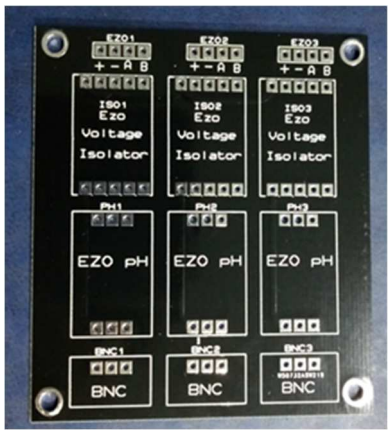

Figura 32 PCB pH y EC.

Fuente: elaboración propia.

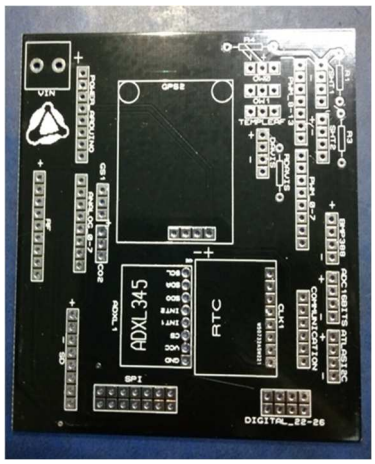

Figura 33 PCB nodos sensor

Fuente: elaboración propia.

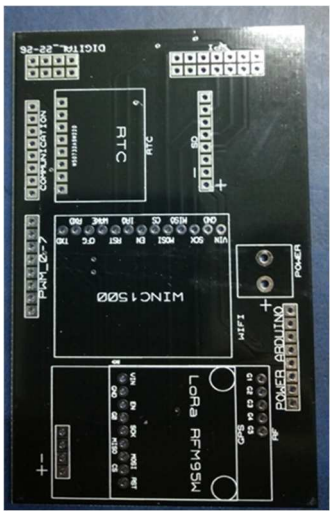

Figura 34 PCB nodo base

Fuente: elaboración propia.

Hasta este punto del proyecto se debe de contar con lo siguiente:

1. Sensores o traductores los cuales pueden ser integrados al nodo sensor.

2. Componentes de comunicación inalámbrica tanto entre nodos como al servidor de Agricos.

3. Módulos de software para la integración de los componentes en el sistema embebido (Drivers, librerías, etc.).

4. Placa de circuito impreso tanto de los nodos sensor como del nodo base.

La característica principal de la red de sensores inalámbricos diseñada en este proyecto es que puede ser configurada acorde a los requerimientos específicos del productor agrícola. Para probar esta característica se buscó un productor dispuesto a probar esta nueva tecnología y se inició el proceso de levantamiento de requerimientos para crear su red de sensores inalámbricos configurable.

3.3 LEVANTAMIENTO DE REQUERIMIENTOS ESPECÍFICOS DE UN PRODUCTOR AGRÍCOLA

Para conocer los requerimientos específicos de un productor agrícola se siguieron los siguientes pasos:

1. Visita al campo donde se desea instalar la red de sensores inalámbricos configurable.

2. Entrevista con el productor para conocer sus intereses acerca de las variables que desea monitorear y en qué puntos de su campo.

Descripción del campo: El campo donde se realizó la prueba se trata de un campo de chiles ubicado en el municipio de Tala, Jalisco. Su ubicación exacta es: 20ª39'03ªN 103ª43'43ªW, encontrándose a una altitud de 1298 metros sobre el nivel del mar.

Se trata de un campo comprendido por 4 áreas de cultivo con una metodología protegida. El campo cuenta con un granero en el cual tienen tendido eléctrico e internet. Una imagen del campo se muestra a continuación.

Figura 35 Campo de pruebas.

Fuente: elaboración propia.

En base a la entrevista con el productor se obtuvo la siguiente información:

1. Se requiere de un nodo sensor en cada sección de producción, al ser 4 secciones se requerirá una red de sensores inalámbricos configurable conformado por 4 nodos sensor y el nodo base.

2. Se quiere aprovechar el Wifi del granero para enviar los datos al servidor y así no pagar un servicio de telefonía móvil, por lo tanto, el nodo base deberá estar lo suficientemente cerca del granero.

3. Las variables que se desean monitorear en cada punto son:

- Nodo sensor 1
    - Dos transductores de conductividad eléctrica del suelo
    - Dos sensores de temperatura del suelo
    - Dos sensores de temperatura ambiente y humedad relativa
    - Un transductor de pH del suelo
    - Un transductor de radiación ultravioleta
    - Un transductor de contenido volumétrico de agua en el suelo

- Nodo sensor 2
    - Un transductor de velocidad y dirección del viento
    - Dos transductores de conductividad eléctrica del suelo
    - Dos sensores de temperatura del suelo
    - Dos sensores de temperatura ambiente y humada relativa
    - Un transductor de volumen de precipitaciones pluviales
    - Un transductor de pH del suelo
    - Un transductor de radiación solar global
    - Un transductor de radiación fotosintéticamente activa
    - Un transductor de contenido volumétrico de agua en el suelo

- Nodo sensor 3
    - Dos transductores de conductividad eléctrica del suelo

    - Dos sensores de temperatura del suelo
    - Dos sensores de temperatura ambiente y humedad relativa
    - Un transductor de pH del suelo
    - Un transductor de contenido volumétrico de agua en el suelo

- Nodo sensor 4
    - Dos transductores de conductividad eléctrica del suelo
    - Dos sensores de temperatura del suelo
    - Dos sensores de temperatura ambiente y humedad relativa
    - Un transductor de pH del suelo
    - Un sensor de presión atmosférica
    - Un transductor de contenido volumétrico de agua en el suelo

4. Debido a que en la zona de producción no se cuenta con tendido eléctrico los nodos sensor y base deberán de contar con su propio sistema de generación y almacenamiento de energía.

5. Los equipos instalados en campo deben de entorpecer lo menos posible las actividades de cultivo dentro de las áreas de producción.

La configuración de la red de sensores inalámbricos en campo quedara de la siguiente manera:

Figura 36 Configuración de la red inalámbrica de sensores.

Fuente: elaboración propia.

3.4 IMPLEMENTACIÓN DE LOS COMPONENTES EN LAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO

El montaje de todos los elementos que componen los nodos sensor y el nodo base se detalla en el presente apartado, además también se calcula la potencia instalada de cada elemento tomando en cuenta sus componentes, sensores y transductores.

Los nodos sensor se componen de tres atapas principales, los cuales son:

- Obtención de datos de las variables.
- Envió de datos al nodo base.
- Sistema fotovoltaico autónomo.

La primera placa de circuito impreso armada fue el circuito de condicionamiento de la señal de los transductores de pH y conductividad eléctrica del suelo. El modelo diseñado puede tener hasta 4 transductores en un mismo bus I2C de comunicación, a continuación, se muestra la PCB montada.

Figura 37 PCB de acondicionamiento de señal de los transductores de pH y conductividad eléctrica del suelo.

Fuente: elaboración propia.

Este módulo cuenta con:

- 3 circuitos de amplificación y DAC con interfaz I2C
- 2 circuitos de aislamiento de alimentación para señales digitales
- 3 conectores tipo BNC-3

La potencia instalada de este módulo se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4 Potencia instalada en el circuito de acondicionamiento.

Fuente: Elaboración propia.

Elemento	**Voltaje de alimentación**	**Potencia**	**Cantidad**
Aislador señales digitales	5V	90 mW	2
Circuito amplificación y DAC	5V	250 mW	3
	Potencia instalada	930 mW	

Además del módulo anterior el nodo sensor también se compone de los siguientes elementos:

- GPS
- Transceptor de radiofrecuencia
- Reloj de tiempo real
- Acelerómetro ADXL345
- ADC externo ADS1115
- MCU ATMega328P
- Sensor de temperatura interna BMP388

Tabla 5 Potencia instalada de los elementos del nodo sensor.

Fuente: Elaboración propia.

Elemento	Voltaje de alimentación	Potencia	Cantidad
Transceptor de RF	5V	600 mW	1
GPS	5V	125 mW	1
Antena activa GPS	5V	50 mW	1
Reloj de tiempo real	5V	7.5 mW	1
BMP388	5V	2.5 mW	1
ADXL345	5V	200 µW	1
ADS1115	5V	15 mW	1
MCU	5V	600 mW	1
Total	Potencia instalada	1,600 mW	

El montaje del circuito principal del nodo sensor se muestra en la siguiente imagen.

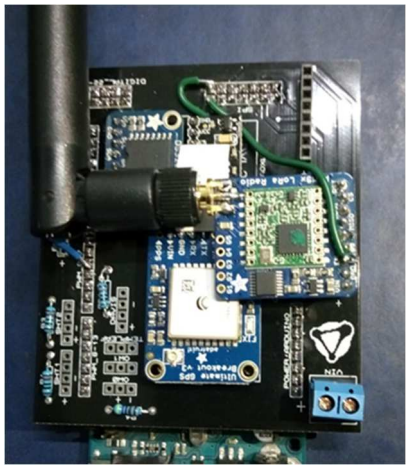

Figura 38 Circuito del nodo sensor.

Fuente: Elaboración propia.

Además de lo anterior cada nodo contara con un consumo específico debido a la implementación de sus sensores o transductores propios.

Nodo 1:

Tabla 6 Potencia total instalada característica del nodo sensor 1.

Fuente: Elaboración propia.

Elemento	Voltaje de alimentación	Potencia	Cantidad	Total
Dos transductores de conductividad eléctrica del suelo	5V	150 mW	2	300 mW
Dos sensores de temperatura del suelo	5V	15 mW	2	30 mW
Dos sensores de temperatura ambiente y humedad relativa	5V	1'500 mW	2	3'000 mW
Un transductor de pH del suelo	5V	150 mW	1	150 mW
Un transductor de radiación ultravioleta	5V	110 mW	1	110 mW
Un transductor de contenido volumétrico de agua en el suelo	5V	75 mW	1	75 mW
	Potencia instalada	3'665 mW		

Nodo 2:

Tabla 7 Potencia total instalada característica del nodo sensor 2.

Fuente: Elaboración propia.

Elemento	Voltaje de alimentación	Potencia	Cantidad	Total
Dos transductores de conductividad eléctrica del suelo	5V	150 mW	2	300 mW
Un transductor de velocidad y dirección del viento	5V	N/A	1	N/A
Un transductor de volumen de precipitaciones pluviales	5V	N/A	1	N/A
Dos sensores de temperatura del suelo	5V	15 mW	2	30 mW
Dos sensores de temperatura ambiente y humedad relativa	5V	1'500 mW	2	3'000 mW
Un transductor de pH del suelo	5V	150 mW	1	150 mW
Un transductor de radiación solar global	5V	110 mW	1	110 mW

Elemento	Voltaje de alimentación	Potencia	Cantidad	Total
Un transductor de radiación fotosintéticamente activa	5V	115 mW	1	115 mW
Un transductor de contenido volumétrico de agua en el suelo	5V	75 mW	1	75 mW
	Potencia instalada	3'780 mW		

Nodo 3:

Tabla 8 Potencia total instalada característica del nodo sensor 3.

Fuente: Elaboración propia.

Elemento	Voltaje de alimentación	Potencia	Cantidad	Total
Dos transductores de conductividad eléctrica del suelo	5V	150 mW	2	300 mW
Dos sensores de temperatura del suelo	5V	15 mW	2	30 mW
Dos sensores de temperatura ambiente y humedad relativa	5V	1'500 mW	2	3'000 mW
Un transductor de pH del suelo	5V	150 mW	1	150 mW
Un transductor de contenido volumétrico de agua en el suelo	5V	75 mW	1	75 mW
	Potencia instalada	3'555 mW		

Nodo 4:

Tabla 9 Potencia total instalada característica del nodo sensor 4.

Fuente: Elaboración propia.

Elemento	Voltaje de alimentación	Potencia	Cantidad	Total
Dos transductores de conductividad eléctrica del suelo	5V	150 mW	2	300 mW
Dos sensores de temperatura del suelo	5V	15 mW	2	30 mW
Dos sensores de temperatura ambiente y humedad relativa	5V	1'500 mW	2	3'000 mW
Sensor de presión atmosférica	5V	9.5 mW	1	9.5 mW
Un transductor de pH del suelo	5V	150 mW	1	150 mW
Un transductor de contenido volumétrico de agua en el suelo	5V	75 mW	1	75 mW
	Potencia instalada	3'564.5 mW		

El nodo base es el nodo o dispositivo que coordina el tránsito de información dentro de la red de comunicación inalámbrica de baja potencia, además este nodo envía al servicio en la nube la información recolectada por la red de sensores inalámbricos.

Tabla 10 Potencia total instalada característica del nodo base.

Fuente: Elaboración propia.

Elemento	Voltaje de alimentación	Potencia	Cantidad
Transceptor de RF	5V	600 mW	1
GPS	5V	125 mW	1
Antena activa GPS	5V	50 mW	1
RTC	5V	7.5 mW	1
MCU	5V	600 mW	1
Puerto microSD	5V	120 mW	1
Transceptor 2.4 GHz	5V	850 mW	1
	Potencia instalada	2,352.5 mW	

En esta sección se tomaron las potencias máximas de cada elemento, sensor y transductor, en la sección del algoritmo de recolección de información se presentará un método para el ahorro de energía tanto de los nodos sensor como del nodo base.

3.5 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO

En el presente apartado se tratan los temas relacionados con la obtención de la información suficiente para el correcto dimensionamiento del sistema fotovoltaico que sustentará energéticamente a los nodos.

3.5.1 Obtención del perfil de carga

El perfil de carga de los nodos pertenecientes a una red de sensores inalámbricos se trata de un conjunto de datos muy importante ya que a partir de este perfil se propone que se dimensione el sistema fotovoltaico autónomo que sustentara el consumo energético de los nodos. El perfil de carga es un gráfico del consumo energético en relación con el tiempo.

Para poder obtener los perfiles de carga tanto de los nodos sensor y del nodo base se necesita un elemento que contenga el perfil de carga y otro que almacene los datos recolectados, para este fin se creó un sistema de consta de tres elementos principales.

1. Microcontrolador.
2. Sensor de corriente en DC.
3. Elemento de almacenamiento de datos, en este caso un puerto MicroSD.

En la siguiente figura se muestra el esquemático del circuito de obtención del perfil de carga.

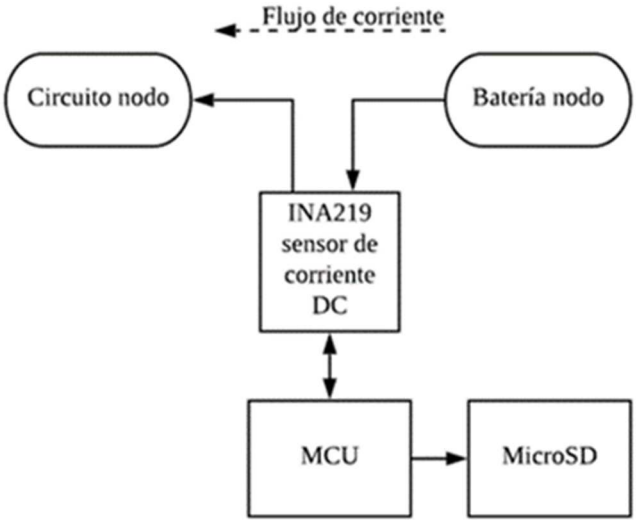

Figura 39 Circuito de obtención del perfil de carga de los nodos.

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura se muestra el punto dentro del nodo sensor donde se conecta el sensor de corriente.

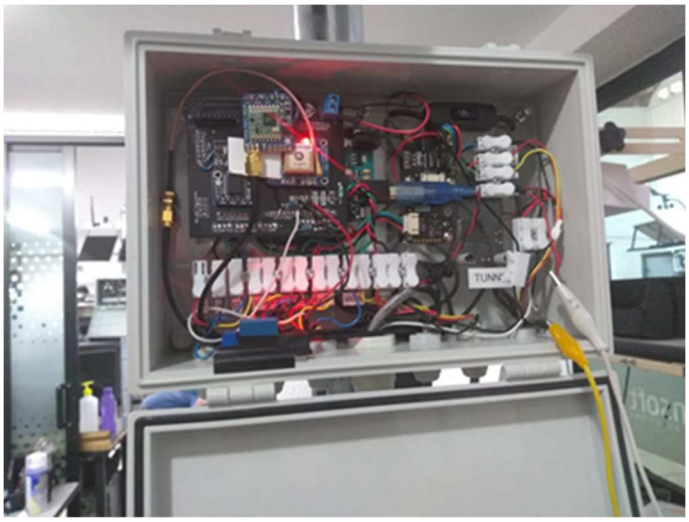

Figura 40 Conexión del nodo con el circuito de obtención de perfil de corriente.

Fuente: Elaboración propia.

El sistema de obtención del perfil de carga se colocó justo por debajo del gabinete del circuito del nodo. Tal como se muestra en la siguiente figura:

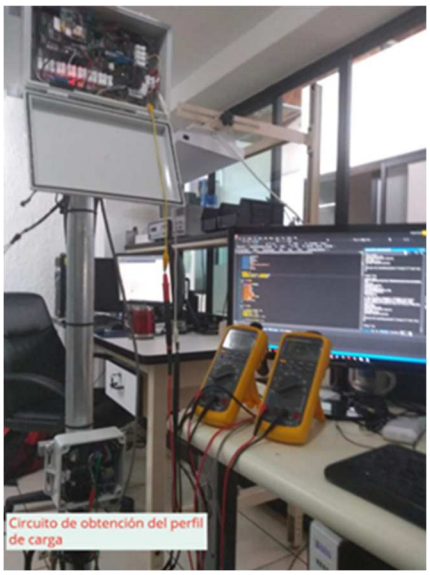

Figura 41Nodo sensor conectado al circuito de obtención del perfil de carga.

Fuente: Elaboración propia.

De igual manera, se colocaron instrumentos de medición de corriente para corroborar los datos recolectados por el sensor INA219; sin embargo, los datos que son insertados en el archivo .xls son los recolectados por el sensor de corriente.

Los primeros datos recolectados corresponden a la red de sensores inalámbricos que trabajan sin el algoritmo de eficiencia energética implementado. En este modo, sus transductores y transceptores no entran en estado de bajo consumo, ya que los nodos sensor tienen que estar siempre escuchando, en espera de una petición por parte del nodo base.

Para el nodo base el promedio de consumo de corriente sin el algoritmo es de 463.31 mA, un mínimo de 430 mA y un máximo de 520 mA. Su perfil de carga se muestra en la siguiente figura:

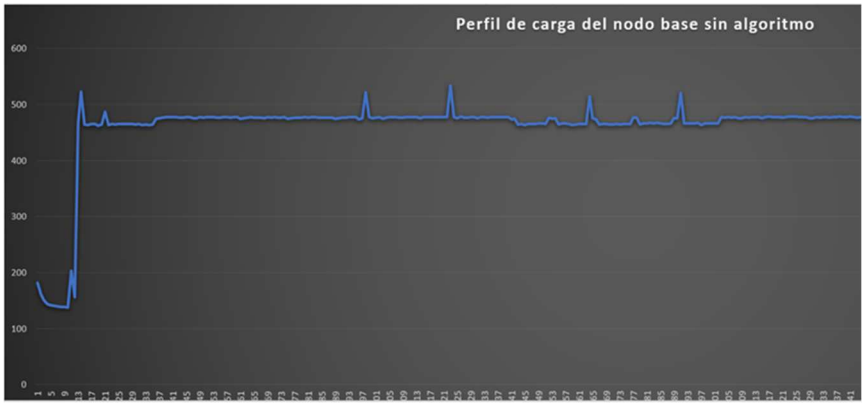

Figura 42 Perfil de carga del nodo base sin algoritmo.

Fuente: Elaboración propia.

Los picos de corriente de más de 500 mA se deben a las peticiones que realiza el módulo GPRS a la red celular, por lo general durante un envío de información. Las primeras 10 mediciones se tomaron durante la etapa de inicialización, es decir, los transceptores aun no eran activados. Esta es la razón de un consumo de aproximadamente 150 mA al inicio.

Ahora, observemos los datos obtenidos de los nodos sensor. En su caso, los nodos sensor sin el algoritmo implementado mostraron un consumo promedio de 395.19 mA, mínimos de 386 mA y máximos de 412.5 mA. Su perfil de carga se ilustra en la siguiente figura:

Figura 43 Perfil de carga del nodo sensor sin algoritmo.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se cuenta con los datos necesarios para evaluar la eficiencia del algoritmo, a través de su implementación en los nodos, es momento de poner en marcha la red de sensores inalámbricos y obtener los datos resultantes.

3.6 DISEÑO DEL ALGORITMO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Uno de los mayores retos al momento de diseñar una red de sensores inalámbricos es aplicar un correcto manejo de la eficiencia energética en cada uno de los nodos de la red. Como se indica en el apartado anterior, la mayoría de los componentes, transductores y sensores, que se integran en los nodos, cuentan con un estado de bajo consumo. Además, las redes de sensores inalámbricos cuentan con un intervalo de tiempo en el cual la información es recolectada y enviada al servicio en la nube.

El algoritmo propuesto se encargará de manejar los tiempos de los estados en cada uno de los elementos que conforman al nodo, con base en el tiempo de recolección de información. A continuación, se muestra una tabla donde se detallan los procesos del algoritmo y el nodo donde se lleva a cabo este proceso.

Tabla 11 procesos del algoritmo y el nodo donde se lleva a cabo.

Fuente: elaboración propia.

Proceso	Nodo donde se ejecuta	Descripción
Lectura de archivo de configuración	Nodo base	Se obtiene la información de configuración de la red
Reconocimiento de nodos	Nodo base y nodos sensor	El nodo base identifica todos los nodos sensor configurados en la red
Reconocimiento finalizado	Nodo base	Todos los nodos sensor han sido identificados y envía confirmación a la red.
Envío de minuto actual e intervalo de tiempo	Nodo base y nodos sensor	El nodo base envía los parámetros y los nodos sensor responden de recibido.
Configuración de los parámetros de sincronización	Nodos sensor	Los parámetros recibidos son aplicados y la red se sincroniza
Proceso	**Nodo donde se ejecuta**	**Descripción**
Inicio de rutina de recolección de información	Nodo base y nodos sensor	El nodo base inicia la rutina de recolección de información y los nodos sensor entran en este proceso
Activación del modo de bajo consumo	Nodo base y nodos sensor	Una vez que todos los nodos sensor han enviado sus datos al nodo base y este los ha enviado al servicio web, los nodos se ponen en modo de bajo consumo

El algoritmo implementado en el nodo base tiene como tarea coordinar los intervalos de tiempo indicados dentro de los archivos de configuración. Los procesos en los cuales se identifican los nodos sensor y se configura la red de sensores inalámbricos se detallan en un diagrama de flujo mostrado en la Figura 41 y se explican a continuación:

1. Lectura de parámetros de tarjeta MicroSD. En este proceso se ejecuta la lectura de la información contenida en los archivos de configuración de la red de sensores inalámbricos que el usuario ha ingresado. En estos archivos de configuración, se configuran tanto los parámetros de conexión a la API web que recibirá la información, el intervalo de tiempo de muestreo y los nodos sensor que pertenecen a la red que se está configurando.

   La información obtenida de este proceso se utilizará para buscar y reconocer cada uno de los nodos sensor, configurar el nodo base para conectarse al servicio en la nube y establecer el intervalo de tiempo de recolección de información.

2. Reconocimiento de los nodos sensor. En este proceso se utiliza el transceptor de radiofrecuencia para buscar los nodos sensor, ya que cada uno de ellos cuenta con un identificador único.

Este identificador se ingresa al archivo de configuración y el nodo base lo tomará para buscar dicho nodo dentro de su rango de comunicación. Se trata de una tarea iterativa donde el nodo base envía el identificador del nodo sensor y espera por una respuesta. Esta tarea se realizará con cada uno de los nodos que sean encontrados en el archivo de configuración. Si un nodo sensor no responde, se incrementa un contador con cada llamada a la que no responda, si el número de incidencias llega a 100, el nodo base omitirá este nodo y generara un error que será enviado al servicio en la nube.

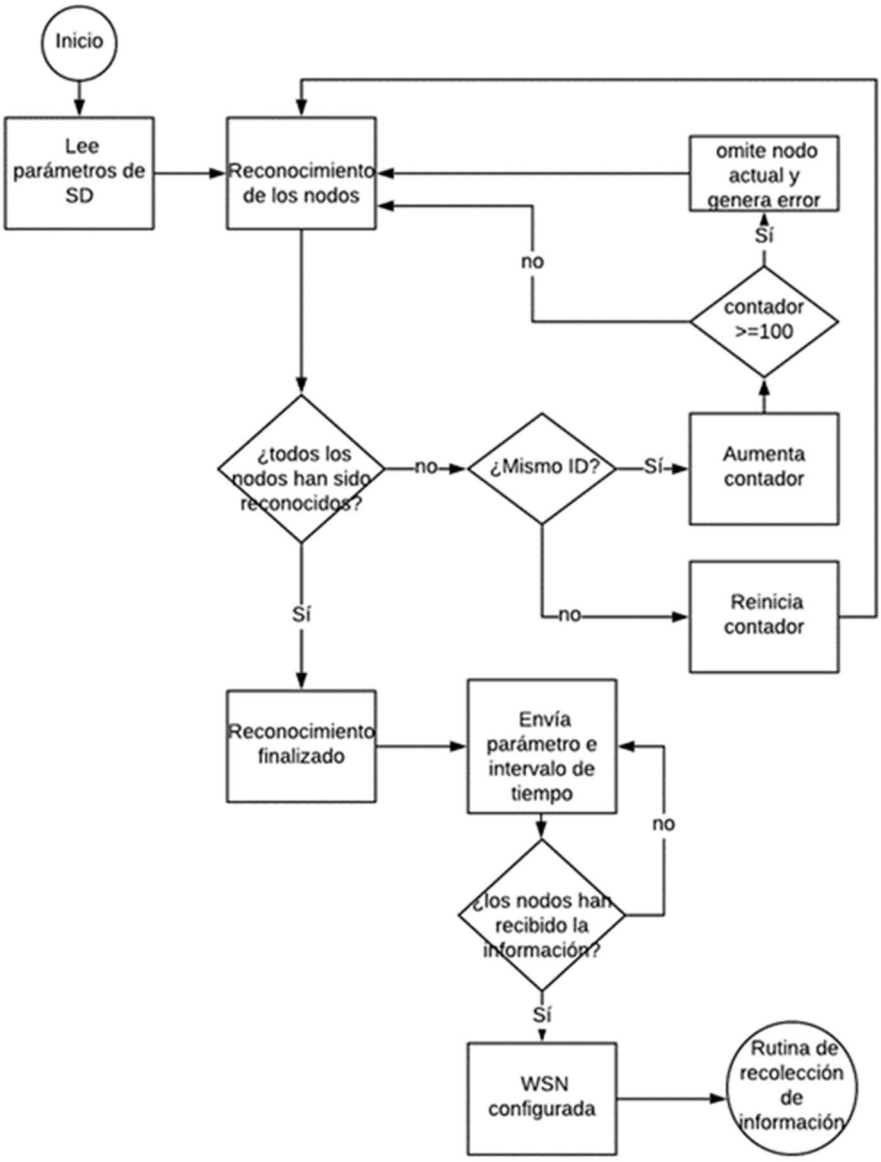

Figura 44 Diagrama de flujo de la configuración de la red de sensores inalámbricos.
Fuente: elaboración propia.

1. Reconocimiento finalizado. En este proceso el nodo base envía a la red un código indicando que el proceso de reconocimiento de los nodos sensor ha finalizado. Este código es utilizado por los nodos sensor para pasar a otro proceso, el cual será detallado cuando se revise el diagrama de flujo de los nodos sensor.

2. Envío de minuto actual e intervalo de tiempo. En este proceso el nodo base transmite dos parámetros: uno de ellos es el intervalo de tiempo y el otro es el

minuto, en el que se está ejecutando el presente proceso. De esta manera, los nodos sensor se sincronizan con el nodo base.

3. ¿Los nodos han recibido la información? En este proceso el nodo base tiene que recibir todas las confirmaciones de los nodos sensor. En caso de no hacerlo, el nodo base tiene que volver a enviar los parámetros del proceso anterior.

4. Después que la red de sensores inalámbricos ha sido configurada, el nodo base comienza la rutina de recolección de información.

La rutina de recolección de información inicia la petición a cada nodo sensor, una vez que el reloj de tiempo real del nodo base alcanza el intervalo de tiempo definido. En este punto, el nodo base se encuentra en modo de bajo consumo, por lo tanto, lo primero que se hace es activar los transceptores de comunicación y comenzar a realizar las peticiones de información a cada nodo sensor. El diagrama de flujo de la rutina de recolección de información se ilustra en la siguiente figura:

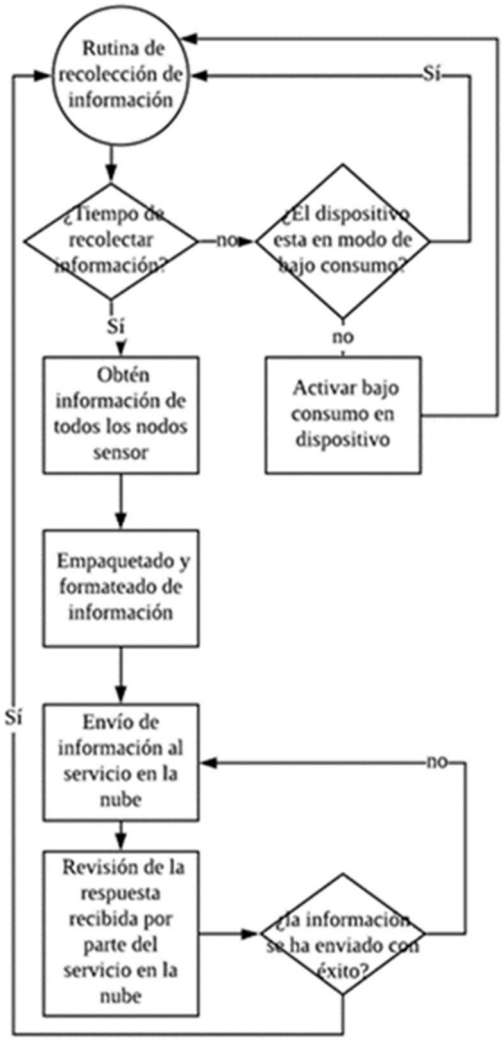

Figura 45 Diagrama de flujo de la rutina de recolección de información.

Fuente: Elaboración propia.

El algoritmo de reconocimiento del nodo base ejecutado en el nodo sensor se trata de un proceso de tres iteraciones. Dentro de estas iteraciones el nodo base se comunica con todos los nodos sensor en su red para revisar si:

1. Cada uno de los nodos sensor ya lo ha identificado como nodo base.

2. El nodo base le hace saber a los nodos sensor que todos ya han sido identificados.

3. El nodo base envía los parámetros de sincronización y los nodos sensor responden.

4. El nodo base inicia la rutina de recolección de información.

El diagrama de flujo del reconocimiento del nodo base se muestra en la siguiente figura:

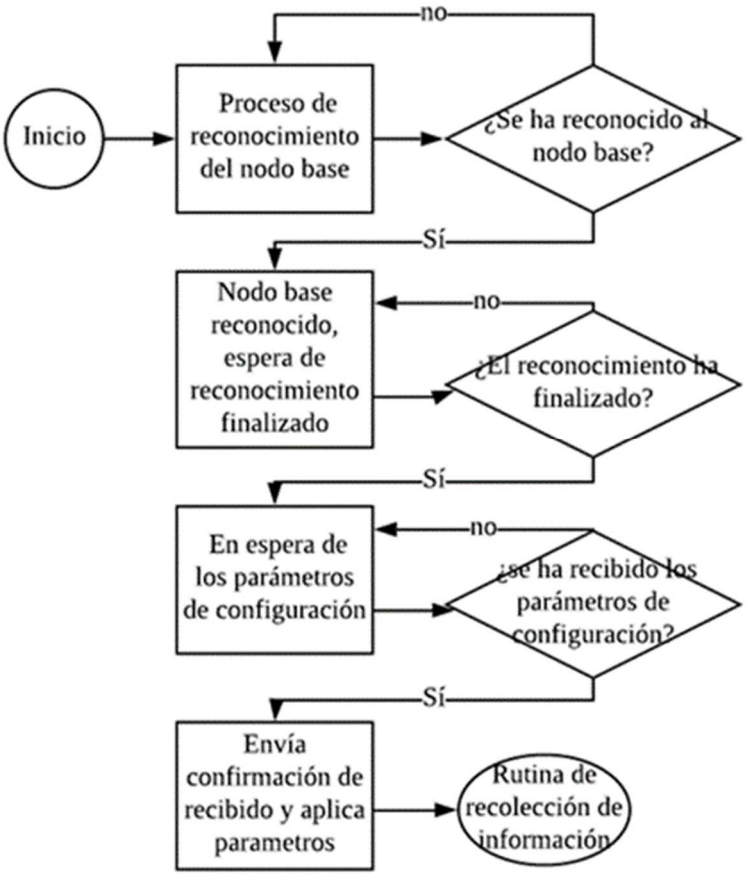

Figura 46 Diagrama de flujo del reconocimiento del nodo base.

Fuente: elaboración propia.

El diagrama de secuencia entre un nodo sensor y el nodo base, en la etapa de configuración de la red de sensores inalámbricos, detalla la interacción que se lleva a cabo entre estos dos objetos. Este diagrama se muestra en la siguiente figura:

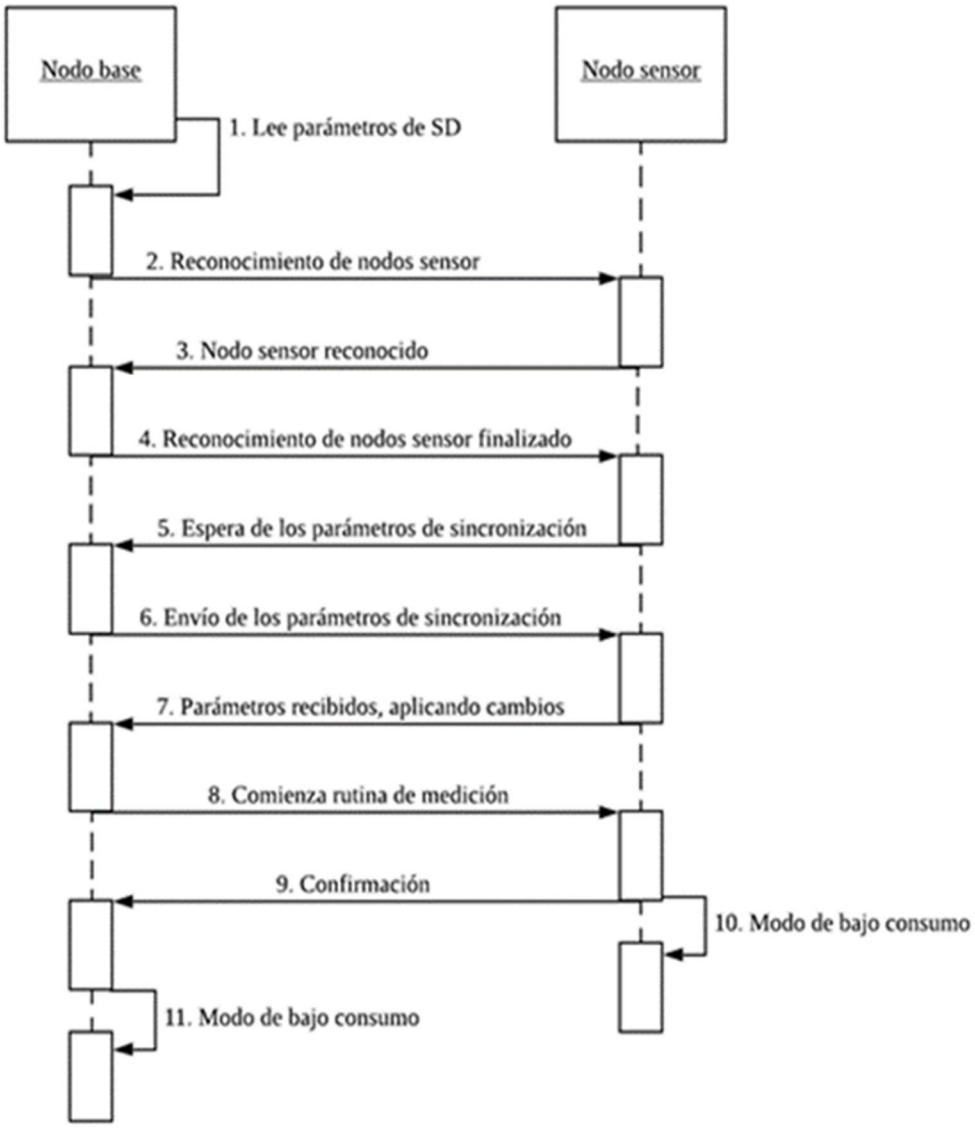

Figura 47 Diagrama de secuencia entre el nodo base y nodo sensor.

Fuente: Elaboración propia.

Una interacción similar se presenta en la etapa de recolección de información, donde el nodo base solicita a cada nodo sensor de la red la información y este le contesta con la información solicitada.

En la siguiente sección se analizan los resultados de la implementación del algoritmo de eficiencia energética en los nodos y la evaluación del desempeño de la red de sensores inalámbricos configurable en campo.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

En la presente sección se presentan, analizan y se discuten los resultados obtenidos al:

- Implementar el algoritmo de eficiencia energética en los nodos
- Configuración de la red de sensores inalámbricos
- Desempeño en campo de la red de sensores inalámbricos

4.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LOS NODOS

Se codifico el algoritmo y se implementó en los nodos sensor y nodo base de la red de sensores inalámbricos. Hecho esto, se evaluó que el comportamiento o las tareas de cada uno de los nodos no se vieran afectadas por la implementación del algoritmo, es decir, se valoró el comportamiento de la red de sensores inalámbricos para identificar cualquier anomalía en su desempeño, debido a la implementación del algoritmo del manejo de la eficiencia energética.

El primer perfil de carga obtenido se trata del nodo base, el cual presenta un consumo promedio de 187.26 mA, mínimo de 50 mA y máximo de 490 mA. Su perfil de carga se muestra en la siguiente figura:

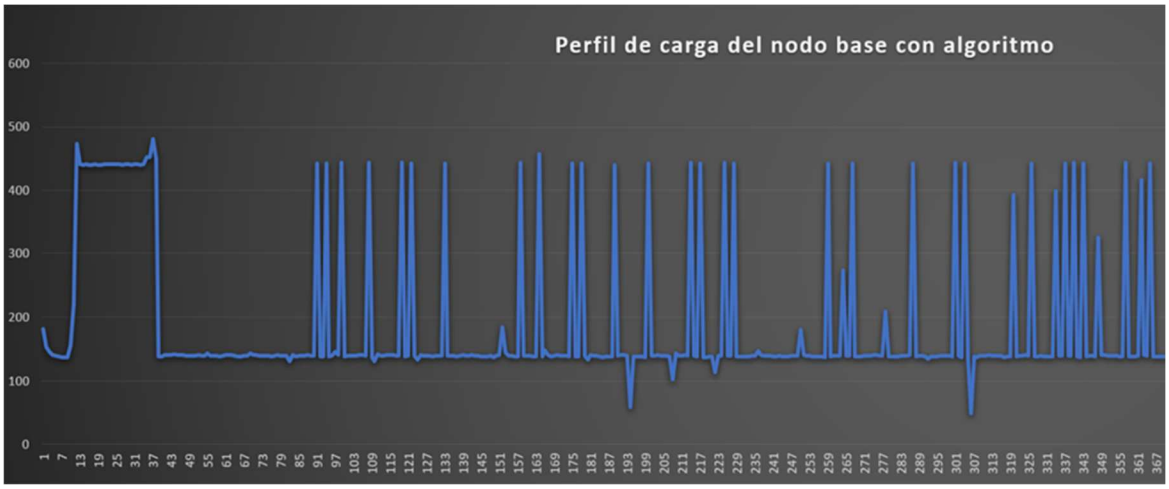

Figura 48 Perfil de carga del nodo base con algoritmo.

Fuente: Elaboración propia.

El ahorro energético en este nodo es muy elevado, debido a que la totalidad de sus componentes se ponen en bajo consumo cuando no son utilizados. Sin embargo, cuando se realiza un envío de información al servicio web los picos de corriente pueden alcanzar hasta 500 mA.

El pico de corriente que se presenta al inicio de la medición corresponde a la etapa de configuración de la red de sensores inalámbricos, en la cual los elementos del nodo base están activos hasta que todos los nodos sensor han sido correctamente identificados.

Por su parte, los nodos sensor arrojaron los siguientes datos durante la obtención de su perfil de carga el cual se muestra en la siguiente figura:

Figura 49 Perfil de carga del nodo sensor con algoritmo.

Fuente: Elaboración propia.

Los datos recolectados muestran un consumo energético promedio de 313.38 mA, mínimos de 230 mA y máximos de 413 mA. De igual forma que en el perfil de carga del nodo base, el nodo sensor presenta un pico de corriente al inicio. Este pico de corriente se debe al protocolo de configuración de la red de sensores inalámbricos y, en este caso, cuando el nodo sensor ha sido identificado con éxito, aplica las técnicas implementadas en el algoritmo de eficiencia energética para hibernar los componentes que no se necesitan.

En la siguiente tabla se muestra una comparación con los datos recolectados con y sin el algoritmo de eficiencia energética implementado.

Tabla 12 Comparación de los perfiles de carga con y sin el algoritmo de eficiencia energética

Fuente: Elaboración propia.

	Nodo sin algoritmo		**Nodo con algoritmo**	
	Base	Sensor	Base	Sensor
Máximos	520 mA	412 mA	490 mA	413 mA
Mínimos	430 mA	386 mA	50 mA	230 mA
Promedio	463.33 mA	395.19 mA	187.26 mA	313.38 mA
Ahorro promedio			**276 mA**	**81.81 mA**

4.2 IMPLEMENTACIÓN DE LA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS EN CAMPO

Las pruebas de los dispositivos desarrollados durante el presente proyecto se realizaron en un campo de cultivo en el municipio de Tala en el estado de jalisco, la red de sensores inalámbricos de se distribuye de la manera que se muestra en la siguiente figura:

Figura 50 Ubicación de los nodos en el campo de pruebas.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en las siguientes imágenes se muestra evidencia fotográfica de la instalación de los equipos en campo.

Figura 51 Instalación de la red de sensores inalámbricos en campo.

Fuente: Elaboración propia.

4.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS CONFIGURABLE EN CAMPO

Cada uno de los nodos sensor cuenta con su interfaz gráfica de usuario para visualización de datos, y estos tienen que estar ligados al campo donde fueron instalados, en la siguiente figura se muestra la visualización de un campo en la interfaz de usuario.

Figura 52 Visualización del campo en la interfaz de usuario.

Fuente: Panel inicial. (2019, May 13). Recuperado de https://agricos.mx/.

Dentro del campo se despliegan los dispositivos o nodos instalados en el campo como se muestra en la siguiente figura:

Figura 53 Visualización de los nodos en campo en la interfaz de usuario.

Fuente: Panel inicial. (2019, May 13). Recuperado de https://agricos.mx/.

El usuario configuro el nodo 1 como Túnel, el nodo 2 como campo abierto, el nodo 3 como invernadero y el nodo 4 como casa malla.

Puedes seleccionar el nodo para ver la información que recolecta, por ejemplo, del nodo que se encuentra en casa malla, el cual es un ambiente de cultivo, muestra la siguiente información:

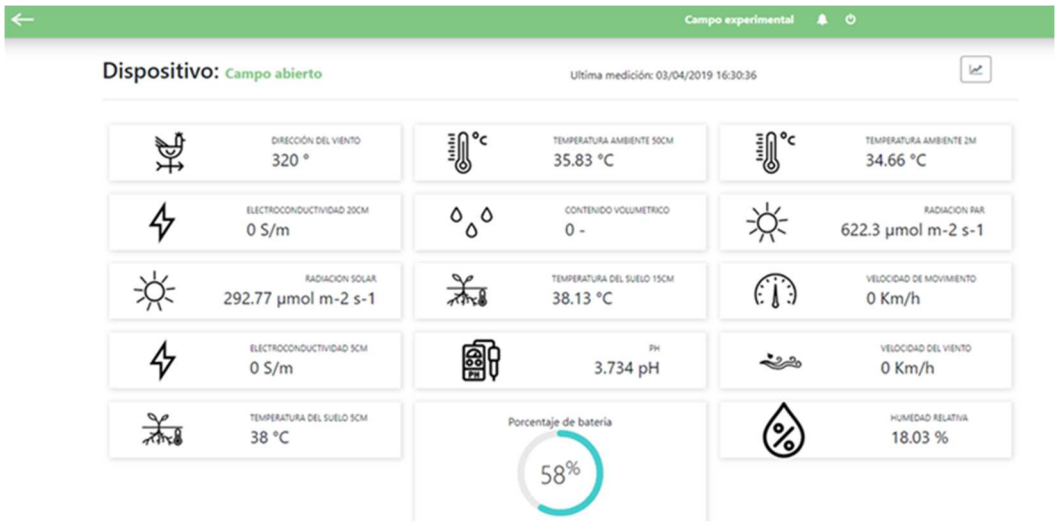

Figura 54 Datos recolectados por el nodo 2 perteneciente a la red de sensores inalámbricos.

Fuente: Panel inicial. (2019, May 13). Recuperado de https://agricos.mx/.

Figura 55 Posición geográfica del nodo en el campo.

Fuente: Panel inicial. (2019, May 13). Recuperado de https://agricos.mx/.

CONCLUSIONES

Una de las partes fundamentales de las redes de sensores inalámbricos es la fiabilidad de sus nodos. Para que los nodos pertenecientes a una red de sensores inalámbricos sean fiables, no solo necesitan contar con un software que maneje errores de enrutamiento y corrupción de datos, es también necesario contar con un sistema de generación energética confiable que proporcione la energía necesaria para que los nodos operen las 24 horas del día.

Sin embargo, contar con un sistema de generación energética confiable no es suficiente, también hay que contar con un manejo eficiente de la energía que consumen los nodos de la red inalámbrica de sensores.

El algoritmo que ejecuta el protocolo de recolección de información desarrollado utiliza el intervalo de tiempo de envío de información para establecer el modo de bajo consumo. Es por esta razón que los relojes de tiempo real de los nodos juegan un papel tan importante, ya que sus datos son utilizados como disparadores de eventos de tiempo para establecer los modos de operación de la red de sensores inalámbricos.

El objetivo de desarrollar el algoritmo de gestión energética para la red de sensores inalámbricos desarrollada a fin de su aplicación en la agricultura de precisión es la de contar con dispositivos de recolección de información fiables en campo, los cuales aprovecharán al máximo la energía generada y almacenada por el sistema fotovoltaico autónomo dimensionado para cada nodo.

Cabe señalar que una red de sensores inalámbricos depende de la capacidad de operación de sus nodos en el ambiente donde es desplegada. Por lo tanto, los nodos deben de ser aptos para operar en campos de cultivo, donde la frecuencia de interacción del dispositivo con los usuarios será muy baja. De esta manera, la red de sensores inalámbricos debe de ser capaz de operar las 24 horas del día sin ningún tipo de interacción con personal calificado. Esto con la intención de cumplir con una de las premisas de la agricultura de precisión, que es la de recolectar datos para conocer la variabilidad espacial y temporal de los campos de cultivo.

En la Tabla 7 se muestra un ahorro energético promedio en los nodos sensor de 81.81 mA, que significa un ahorro de 1.963 Ah/día. Por su parte, el nodo base con una reducción en su consumo de 276 mA presenta un ahorro de 6.625 Ah/día. El porcentaje de ahorro en el nodo base es mucho mayor al del nodo sensor, esto se debe a que el nodo base cuenta sólo con transceptores inalámbricos, los cuales funcionan únicamente durante el proceso de recolección y envío de información y es en estos momentos donde el algoritmo de gestión energética centra sus esfuerzos.

Por su parte la información recolectada por la red de sensores inalámbricos configurable puede ser usada para la toma de decisiones en el momento dependiendo de las condiciones actuales encontradas en el campo.

Uno de los ejemplos en los cuales la obtención oportuna de información de las condiciones actuales en campo puede mejorar la forma en que las actividades son ejecutadas es la siguiente.

Dentro de la red de sensores inalámbrica desplegada en campo se obtienen variables de conductividad eléctrica del suelo y contenido volumétrico de agua. Una de las cuestiones importantes para la obtención de la conductividad eléctrica en el suelo es el monitoreo de la concentración de sales en el sustrato provocados por los sistemas de fertiirrigación.

Una de las maneras en que se controla la salinidad en sistemas de fertiirrigación es realizando "lavados" los cuales suministran solo agua al sustrato para drenar los sales fuera del área radicular, a continuación, se muestran datos del resultado de esta acción en el campo de prueba, los datos corresponden al día 27 de julio del 2019.

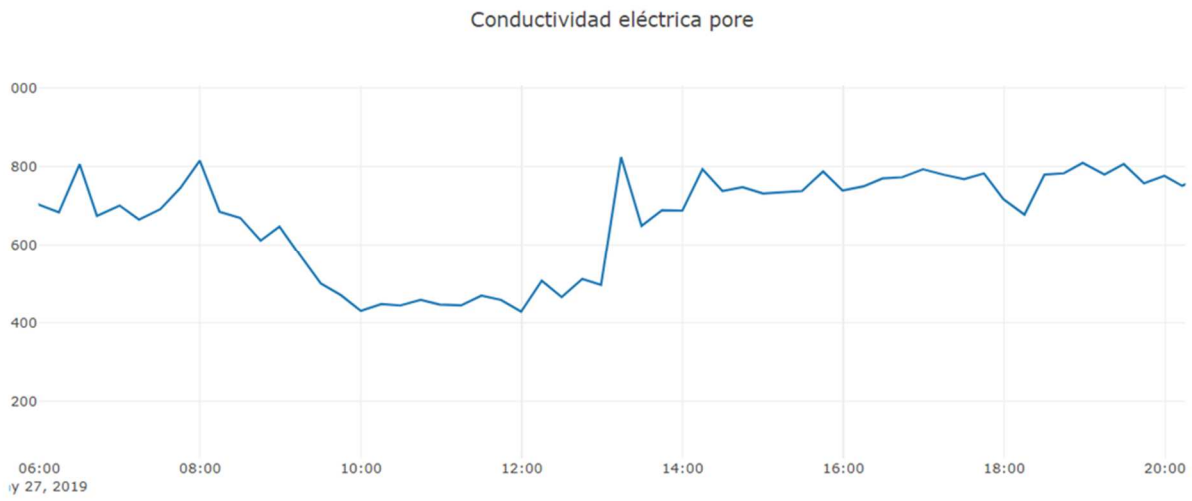

Figura 56 Datos recolectados de la conductividad eléctrica del suelo.
Fuente: Históricos. (2019, May 13). Recuperado de https://agricos.mx/.

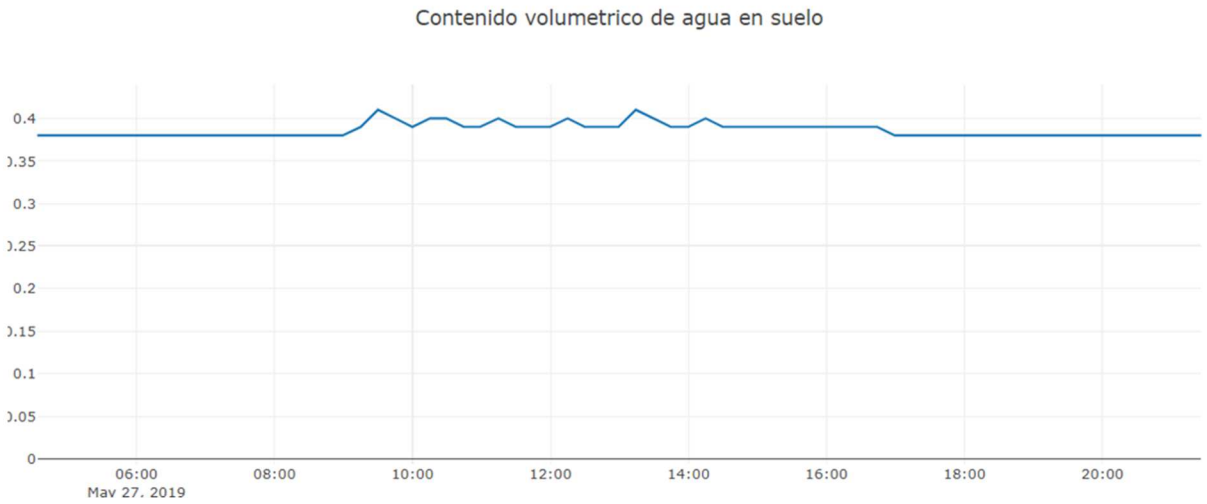

Figura 57 Datos recolectados del contenido volumétrico de agua en el suelo.
Fuente: Históricos. (2019, May 13). Recuperado de https://agricos.mx/.

En la serie de tiempo de la figura 58 se observa un gradiente descendente desde las 8 horas. y se mantiene desde esta hora hasta las 13 horas. Aproximadamente, los picos observados en la gráfica del contenido volumétrico de agua en el sustrato se deben a eventos de riego, pero al ser un sistema de fertiirrigación la solución que se deposita en el sustrato puede ir cargada de fertilizante o solo puede ser agua, ahora obsérvese que desde las 9 horas. Hasta las 13 horas. Existen tres eventos de riego los cuales van disminuyendo la conductividad eléctrica en el suelo a esto se le conoce como el

proceso de lavado, el cual es básicamente un proceso en el cual solo se proporciona agua a la planta para drenar las sales restantes en el sustrato debido a procesos de fertilización pasados, sin embargo, los más interesante pasa a continuación en un evento de riego que sucede aproximadamente a las 13.15 horas.

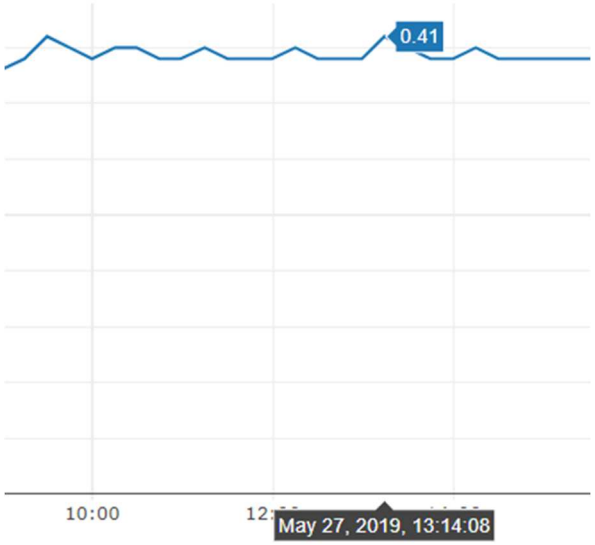

Figura 58 . Evento de fertiirrigación.

Fuente: Históricos. (2019, May 13). Recuperado de https://agricos.mx/.

El comportamiento en la conductividad eléctrica del suelo ante este evento es el siguiente:

Figura 59 Evento de fertiirrigación.

Fuente: Históricos. (2019, May 13). Recuperado de https://agricos.mx/.

De estar en aproximadamente 500 µS/cm paso en un evento de fertiirrigación a tener una magnitud de 823.96 µS/cm, esto se debe a que la solución que se depositó en el sustrato en ese evento de riego en específico contenía fertilizante el cual elevo la conductividad eléctrica del suelo, era momento de comenzar a alimentar la planta.

El contar con dispositivos autónomos que monitoreen las variables de interés para un productor las 24 horas proporciona información de suma importancia para la gestión de la toma de decisiones, es por esto por lo que un sistema como la red de sensores inalámbricos configurable será necesaria para la aplicación integra de la agricultura de precisión.

Finalmente, la principal contribución del presente proyecto a la tecnificación del campo agrícola, en especial al ámbito de la recolección remota de información, es el diseño de un sistema que podrá ser configurado según las necesidades reales del productor agrícola, además de aprovechar las bandas radioeléctricas no licenciadas para crear una red de sensores inalámbricos en campo y de esta manera recolectar información en varios puntos con solo un nodo de acceso a internet, optimizando la inversión económica realizada a la recolección de datos para su uso en la aplicación de la agricultura del precisión.

RECOMENDACIONES

Una de las partes fundamentales de las redes de sensores inalámbricos es la fiabilidad de sus nodos. Para que los nodos pertenecientes a una red de sensores inalámbricos sean fiables, no solo necesitan contar con un software que maneje errores de enrutamiento y corrupción de datos, es también necesario contar con un sistema de generación energética confiable que proporcione la energía necesaria para que la red de sensores inalámbricos configurable (la cual fue resultado del presente trabajo), pueda ser aplicada para la recolección de información necesaria para la oportuna toma de decisiones y para la corrección de las acciones que ya se realizan dentro de las tareas de cultivo. Sin embargo, durante el diseño y la implementación del prototipo se identificaron las siguientes oportunidades de mejora:

1. Desarrollo de una placa base que integre un mayor número de periféricos, esto para que se tenga la capacidad de configurar más sensores.

2. Agregar un elemento de comunicación satelital. Esto para los lugares donde no se tenga una red Wifi y señal celular.

3. Mejorar la usabilidad de la interfaz de configuración de la red de sensores inalámbricos. Actualmente esta configuración se realiza mediante la modificación de archivos de texto contenidos dentro de una memoria microSD, sin embargo, una mejora propuesta por los mismos usuarios del prototipo fue crear una interfaz gráfica de usuario en lugar de la modificación de texto para la configuración de la red.

4. La creación de nuevos módulos para agregar nuevos sensores, como por ejemplo algunas de las variables que a los productores les interesan y no se integran en este primer prototipo son:

    - Potencial hídrico en suelos
    - Temperatura de la planta
    - Humedad sobre las hojas
    - Déficit de presión de vapor

- Cantidad de radiación dentro de las longitudes de onda del infrarrojo cercano.

Las futuras mejoras realizadas sobre el presente proyecto tendrán la tendencia de mejorar la usabilidad tanto de los dispositivos (red de sensores inalámbricos configurable) como del sistema web (Agricos), además, de aumentar las capacidades de configuración y de adaptación al gran número de circunstancias encontradas dentro de los campos de cultivo.

APORTACIÓN DE LA TESIS

La aportación más importante del presente proyecto es la de aumentar la capacidad de generación de información de un sistema auxiliar para el manejo de las labores y toma de decisiones agrícolas, cuyo nombre es Agricos®. Mediante la incorporación de una red de sensores inalámbricos configurable al sistema de monitoreo de las condiciones de crecimiento del cultivo de Agricos®, se aumentó la capacidad de generación de información por medio del sistema, lo cual es sumamente importante para la ayuda en la toma de decisiones. De igual manera, esto a su vez también abrió las puertas para que Agricos® entrara a un mercado muy interesante en el campo agrícola, que es el de la obtención remota de información. Por lo tanto, el presente proyecto además de haber aumentado las capacidades de generación de información del sistema Agricos®, la cual juega un papel importante en la toma de decisiones por parte de los productores agrícolas, también le permitió a este sistema la entrada al mercado de la comercialización de sistemas de monitoreo remoto de las variables tanto climatológicas como de suelo en los campos agrícolas. El contar con un sistema automatizado el cual monitoree en todo momento las variables físicas que influyen en el crecimiento y desarrollo de un determinado cultivo, permitirá una mejor toma de decisiones en torno a las actividades agrícolas enfocadas a aumentar la productividad de un campo de cultivo.

APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS

De acuerdo con la SAGARPA (Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación), los sectores agrícola y pecuario son de los más dinámicos que se encuentran en el país, estos sectores representan cerca del 10% del PIB (Producto interno bruto). Aproximadamente 13% del territorio nacional se utiliza como campo agrícola, produciendo cerca de 200 productos en diferentes estaciones y temporadas (21). Conociendo esto, es sumamente importante sacar provecho del sector de las tecnologías de la información para mejorar la toma de decisiones en los campos agrícolas mexicanos. La incorporación en las tareas agrícolas de sistemas provenientes del sector de las tecnologías de la información le permitirá al productor agrícola: gestionar y planificar de una mejor manera las tareas y toma de decisiones relacionadas con su producción, de esta manera será capaz de aumentar la calidad y cantidad de producto que se genera en su campo agrícola.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. *Precision agriculture and food security.* **Gebbers, Robin y Adamchuk, Viacheslav.** [ed.] AAAS. 5697, 2010, Science, Vol. 327, págs. 828-831.

2. **Leiva, F.R.** *La agricultura de precisión: una producción más sostenible y competitiva con visión futurista.* Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia. 2003. pág. 7.

3. **FAO.** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. *FAO.com.* [En línea] 26 de enero de 2019. [Citado el: 16 de octubre de 2019.] http://www.fao.org/climate-smart-agriculture/es/.

4. **North Dakota State University.** NDAWN center. [En línea] [Citado el: 25 de 8 de 2019.] https://ndawn.ndsu.nodak.edu/help-corn-growing-degree-days.html.

5. *Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit.* **Shamshiri, Redmond Ramin, Jones, James W. y Thorp, Kelly R.** [ed.] De Gruyter. 1, 2018, International Agrophysics, Vol. 32, págs. 287-302.

6. **NASA.** NASA. *NASA.com.* [En línea] [Citado el: 24 de 8 de 2019.] https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/four-decades-and-counting-new-nasa-instrument-continues-measuring-solar-energy-input.

7. *Solar radiation effect on crop production.* **Campillo, Carlos, Fortes, Rafael y Prieto, María del Henar Prieto.** s.l. : IntechOpen, 2012, pág. 13.

8. **Torres, Ariana P. y Lopez, Roberto G.** *Commercial greenhouse production.* Department of Horticulture and Landscape Architecture,, Purdue University. 2018. pág. 16.

9. *Efecto de la radiación ultravioleta-b en plantas.* **Carrasco, Libertad.** 3, Chile : Universidad de Tarapacá. Facultad de Ciencias Agronómicas, 2009, Idesia, Vol. 27, págs. 59-76.

10. **Prasad, R. y Power, J.F.** *Soil fertility management for sustainable agriculture.* s.l. : Lewis Publishers ; CRC, 1997.

11. *Variable sampling interval for energy-efficient heterogeneous precision agriculture using Wireless Sensor Networks.* **Yousef, Hamouda y Mohammed, Msallam.** I, Gaza, Palestine : Elsevier B.V., 2020, Journal of King Saud University - Computer and Information Science, Vol. 32, págs. 88-98.

12. **Kaizar, Amin, Von Laszewski, Gregor y Mikler, Armin R.** *Toward an Architecture for Ad Hoc Grids.* Mathematics and Computer Science Division, Argonne National Laboratory. 2003. pág. 13.

13. *A robust mutual authentication protocol for WSN with multiple base-stations.* **Amin, Ruhul, Islam, SK Hafizu y Biswas, G.P.** 1, s.l. : Elsevier B.V., 2018, Ad Hoc Networks, Vols. 75-76, págs. 1-18.

14. *An analysis of energy efficiency in Wireless Sensor Networks (WSNs) applied in smart agriculture.* **Banđur, Đoko, y otros.** [ed.] Elsevier B.V. 156, 2019, Computers and Electronics in Agriculture, Vol. I, págs. 500-507.

15. *A PV model-based Design of a MPPT controller for energy harvested wireless sensor nodes.* **Frezzetti, A., Manfredi, S. y Pagano, M.** 6, s.l. : Elsevier B.V., 2013, IFAC Proceedings Volumes, Vol. 46, págs. 101-106.

16. *Survivable path routing in WSN for IoT applications.* **Elappila, Manu, Chinara, Suchismita y Parhi, Dayal Ramakrushna.** 1, s.l. : Elsevier B.V., 2018, Pervasive and Mobile Computing, Vol. 43, págs. 49-63.

17. *Wireless sensor networks for agriculture: the state-of-the-art in practice and future challenges.* **Tamoghna, Ojha, Sudip, Misra y Narendra, Singh Raghuwanshi.** I, India : Elsevier B.V., 2015, Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 118, págs. 66-84.

18. **Zyren, Jim y Petrick, Al.** *Tutorial on basic link budget analysis.* Intersil. 1998. pág. 8.

19. **Aguilera, Jorge, Hontoria, Leocadio y Muñoz, Francisco José.** *Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos.* Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática, Escuela Politécnica Superior de Jaén. 2011. pág. 62.

20. **NASA.** The Atmospheric Science Data Center (ASDC). *NASA.com.* [En línea] NASA. [Citado el: 13 de abril de 2019.] https://eosweb.larc.nasa.gov/.

21. **Bayer.** Seminis. *Seminis.com.mx.* [En línea] Bayer. [Citado el: 14 de 6 de 2020.] https://www.seminis.mx/el-gran-potencial-de-la-industria-agricola-mexicana/.