

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SISTEMA DE CONTROL CLIMÁTICO DE BAJO COSTO PARA  
INVERNADERO BASADO EN FPGA**

**TESIS**

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

PRESENTA

Ing. CARLOS DUARTE GALVÁN  
EXPEDIENTE 198793

DIRIGIDO POR:

Dr. JESÚS ROBERTO MILLÁN ALMARAZ

C.U. QUERÉTARO, QRO. JUNIO DE 2011



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en instrumentación y control automático

Sistema de control climático de bajo costo para invernadero basado en FPGA

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias

**Presenta:**

Ing. Carlos Duarte Galván

**Dirigido por:**

Dr. Jesús Roberto Millán Almaraz

**SINODALES**

Dr. Jesús Roberto Millán Almaraz  
Presidente

  
\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Irineo Torres Pacheco  
Secretario

  
\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Ramón Gerardo Guevara González  
Vocal

  
\_\_\_\_\_  
Firma

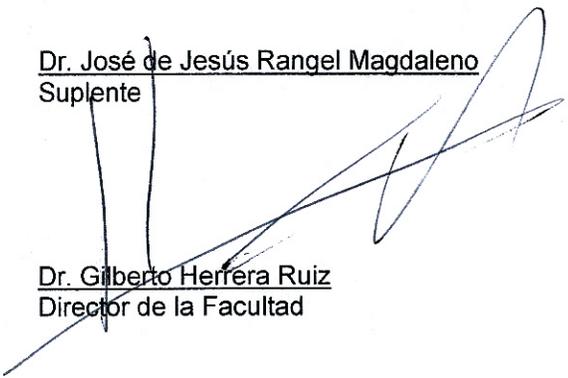
Dr. René de Jesús Romero Troncoso  
Suplente

  
\_\_\_\_\_  
Firma

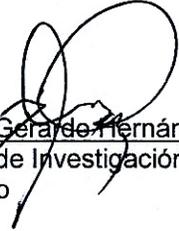
Dr. José de Jesús Rangel Magdaleno  
Suplente

  
\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Gilberto Herrera Ruiz  
Director de la Facultad



Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval  
Director de Investigación y  
Posgrado



Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Junio de 2011  
México

## RESUMEN

Actualmente la agricultura está cambiando de acuerdo a los requerimientos de la nueva sociedad, asegurar la reserva de alimentos a través de prácticas como el ahorro del agua, reducción del uso de sustancia químicas, manejo apropiado del espacio de cultivo y además garantizando cultivos ricos en nutrientes son las nuevas tendencias. Los invernaderos han mostrado ser una alternativa viable para alcanzar las metas anteriormente mencionadas. Sin embargo, el uso de invernaderos en la agricultura protegida conlleva varios problemas, los más importantes están relacionados con las condiciones climáticas generadas en el interior del invernadero, donde controlar la temperatura y humedad son los principales problemas a resolver por la ingeniería. El presente trabajo se enfoca en proponer un nuevo esquema para el control de invernaderos, donde el uso de comunicaciones inalámbricas y una fusión de plataformas tecnológicas incluyen microcontroladores y arreglos de compuertas programables en campo (FPGA's) faciliten las herramientas necesarias para modular la administración de este sistema. Se propone cambiar el concepto de tablero central de control por entidades inalámbricas capaces de monitorear las variables de interés y, a través de etapas de potencia activar o desactivar los dispositivos mecatronicos implementados en el invernadero. Debido a esta necesidad, se desarrollaron diversos módulos de procesamiento, comunicación e instrumentación y control. A lo largo del invernadero se distribuyen en puntos de interés unidades remotas integradas por módulos de procesamiento basado en microcontroladores capaces de medir una variedad de sensores primarios para estimar variables como temperatura, humedad relativa, radiación y concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Estos módulos de procesamiento envían esta información a un coordinador (FPGA) que es el responsable de administrar la red de sensores inalámbrica (WSN), adquirir y guardar los datos y tomar las debidas acciones de control. Estas acciones de control serán transmitidas de manera remota a módulos destinados a controlar los actuadores del invernadero. Adicionalmente se dispone de una interfaz grafica de usuario donde se muestran las lecturas de los diferentes sensores.

**Palabras clave:** (invernadero, controlador climático, teoría de control, agricultura protegida, sistema de control climático para invernadero).

## SUMMARY

Nowadays agriculture is changing according to the requirements of new society, ensuring food supply through practices such as save water, eliminating the use of agrochemicals substances, reducing the needed planted surface and also guarantee high rich in nutrients are the new tendencies. Greenhouses have shown to be a reliable solution to achieve these goals. However, application of greenhouses in protected agriculture leads serious problems, most important are related to the inside greenhouse climate conditions where the control of temperature and relative humidity are the main objectives of engineering. The present work focuses in propose a new control scheme for greenhouse applications, where Wireless communications combined with a fusion of technological platforms like microcontrollers an Field Programmable Gates Arrays (FPGA's) provide the necessary tools to modular the system management. It is proposed to change the concept of central control panel for wireless entities capable of monitoring the variables of interest and, through power amplifiers turn on or off the mechatronic devices available in the greenhouse. Due to this requirement, different processing, communication and instrumentation modules where designed. This microcontroller based modules where distributed along the greenhouse, connected to instrumentation modules capable to read a variety of primary sensor to measured important variable how temperature, relative humidity, radiation and carbon dioxide concentration (CO<sub>2</sub>). Microcontroller-based Processing modules send the information to their coordinator (FPGA-based processing module) which manages the Wireless Sensor Network (WSN), acquired and save data and take the necessary control actions. These control action will be transmitted remotely to the modules responsible to control de greenhouse actuators. Additionally a Graphic Unit Interface was designed to show the different sensors readings.

**Key words:** (Greenhouse, microclimate controller, control theory, protected agriculture, greenhouse climate control system).

**Para Sabina y Abel.**  
**Universidad Autónoma de Querétaro**

## AGRADECIMIENTOS

Son tantas las personas a las que tengo que agradecer, que consumiría varias páginas y haría esta tesis más larga y tediosa de leer de lo que ya es. Agradezco a la Universidad por permitirme conocer a tantas personas.

Los agradecimientos siguientes no los ofrezco en respuesta al apoyo profesional o laboral que recibí, los ofrezco por razones que para mí son más importantes. Los ofrezco a las personas que me permitieron formar parte de su vida y que ahora los puedo llamar AMIGOS. Agradezco a Montserrat Campos, Roberto Millán, Miguel Ríos, Alejandro Vidales, Luis Contreras, JAJA, al Doctor Irineo, al Doctor Ramón y al Doctor Troncoso, a Moi, Ismael y al Chuy.

Sabina y Abel, a ustedes no encuentro como agradecerles porque sería ingratitud de mi parte intentar pagar tanto que me han dado con algo tan insignificante como una tesis. Aun así. Papá, gracias por haberme enseñado a trabajar y a vivir con dignidad. Mamá, gracias porque fuiste la primer mejor noticia de mi vida.

## **CONTENIDO**

RESUMEN .....	3
SUMMARY .....	5
AGRADECIMIENTOS.....	7
I.5 Objetivos .....	13
I.5.1 Objetivo General.....	13
I.5.2 Objetivos particulares.....	13
I.6 Hipótesis .....	13
REVISIÓN DE LITERATURA.....	14
II.1 Agricultura Protegida .....	14
II.2 Monitoreo de variables ambientales .....	15
II.3 Automatización y control .....	15
II.4 Plataformas tecnológicas para automatización.....	16
II.4.1 Microcontroladores .....	16
II.4.2 Procesador digital de señales (DSP) .....	17
II.4.3 Arreglo de compuertas programables en campo (FPGA's) .....	18
II.5 Plataformas de software para el desarrollo de interfaces gráficas de usuario.....	19
II.6 Redes inalámbricas de sensores .....	20
II.7 Sistemas de control climático aplicados en invernaderos.....	21
II.7.1 Sistemas de control climático basados en control clásico .....	22
II.7.2 Controladores basados en inteligencia artificial (IA).....	24
II.7.3 Controladores basados en técnicas avanzadas .....	27
II.7.4 Controladores híbridos .....	32
II.8 Plataformas tecnológicas aplicadas en invernaderos .....	33
METODOLOGÍA.....	35

III.1 Banco de pruebas.....	35
III.1.1 Instalación del techo del invernadero. ....	36
III.1.2 Reparación de motores y transmisiones de ventanas cenitales y laterales.....	37
III.1.3 Instalación del sistema de riego. ....	38
III.1.4 Instalación del muro húmedo.....	38
III.1.5 Reparación de los accesos al invernadero.....	40
III.1.6 Instalación de la red eléctrica .....	40
III.2 Medición de humedad y temperatura.....	40
III.3 Comunicación Inalámbrica.....	41
III.4 Sistema de monitoreo y control inalámbrico .....	42
III.4.1 PMOD_PIC.....	44
III.4.2 ICMOD_MONITOR.....	46
III.4.3 CMOD_USB_XBee.....	47
III.4.4 ICMOD_CONTROL .....	48
III.4.2 Descripción del coordinador de la red de monitoreo y control.....	50
III.4.3 Almacenamiento de datos e interfaz gráfica de usuario .....	52
Resultados y Discusión .....	52
IV.1 Resultados de mediciones de sensores primarios.....	52
IV.2 Respuesta de la red inalámbrica de monitoreo .....	54
IV.3 Resultados del sistema de automatización, control de actuadores y mecanismos del invernadero.....	55
IV.4 Conclusiones .....	57
Referencias Bibliográficas.....	59
Apendice .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## INTRODUCCIÓN

La agricultura (del latín agri, 'campo o tierra de labranza' y cultura, 'cultivo, crianza') es el conjunto de técnicas y conocimientos para cultivar la tierra. Engloba los diferentes trabajos de tratamiento del suelo y cultivo de vegetales (RAE, 2007). Los avances de la ciencia y la tecnología en las primeras décadas del siglo XXI han impulsado todas las ramas del saber humano. La agricultura no es ni será ajena a estos acontecimientos (Bastida, 2006), dado que a través del tiempo ha evolucionado desde el cultivo en cielo abierto hasta los modernos invernaderos de hoy en día.

Las estadísticas de la FAO revelan que en los albores del nuevo milenio 2 570 millones de personas dependen de la agricultura, la caza, la pesca o la silvicultura para su subsistencia, incluidas las que se dedican activamente a esas tareas y sus familiares a cargo sin trabajo. Representan el 42 por ciento de la humanidad. En los países industrializados, tan sólo las exportaciones agrícolas ascendieron aproximadamente a 290 000 millones de dólares en 2001. Históricamente, muy pocos países han experimentado un rápido crecimiento económico y una reducción de la pobreza que no hayan estado precedidos o acompañados del crecimiento agrícola (FAO, 2005). La agricultura es de vital importancia en la economía de las naciones, además de que las plantas y los procesos que las rigen gobiernan la vida sobre este planeta (Millán et al., 2009).

Pero quizás la aportación más significativa de la agricultura sea que, para más de 850 millones de personas desnutridas, la mayoría de ellas en las zonas rurales, constituye un medio para salir del hambre. Sólo cuentan con un acceso seguro a los alimentos si los producen ellos mismos o tienen dinero para comprarlos. El sector que ofrece más posibilidades de ganar dinero en las zonas rurales es un sector floreciente de la alimentación y la agricultura (FAO, 2005).

Es importante mencionar que México produce 1.5 millones de toneladas de jitomate en 80,000 hectáreas de cultivo, Holanda produce más o menos la misma cantidad en 2000 hectáreas pero totalmente bajo condiciones de invernadero, por ello podemos observar el gran desperdicio de tierra e insumos como el agua que hace México y la importancia de modernizar nuestros sistemas de producción.

El panorama de la agricultura protegida en México es prometedor, cada vez son más las hectáreas que se destinan a la producción intensiva de hortalizas bajo condiciones de invernadero. Las estadísticas muestran que hay un notable crecimiento en la superficie que se cultiva bajo invernaderos en México, como ejemplo puede mencionarse que en 2004 había en el país 2306 hectáreas sembradas en invernadero, mientras que en 2008 hay aproximadamente 4000 hectáreas (AMPHI 2008). Uno de los obstáculos para la introducción de esta técnica es el nivel de inversión requerida, un invernadero Holandés cuesta aproximadamente 100 dólares el metro cuadrado y un Canadiense 50 dólares, esto incluye el invernadero y un control de riego y temperatura (LEIDLO, 2000). Este tipo de inversiones se encuentran fuera del alcance de muchos de nuestros productores, por lo que el desarrollo de un invernadero a costos más favorables es deseable. La tecnología de invernaderos disponible en México fue desarrollada para áreas donde el clima es diferente al nuestro; los invernaderos Holandeses por ejemplo están diseñados para soportar cargas elevadas producto de nevadas (esto lleva a pagar costos extras en la estructura del invernadero), también están diseñados para permitir al máximo la penetración de luz y evitar la pérdida de calor al interior del invernadero. En nuestro país los requerimientos están más dirigidos a evitar, en ocasiones, el exceso de luz y en mantener temperaturas más bajas dentro del invernadero que en el exterior. Es razonable que estas diferencias nos lleven a un diseño totalmente diferente del invernadero.

Así mismo, varias empresas Mexicanas con invernaderos han encontrado otro tipo de obstáculos al importar invernaderos extranjeros, tales como la necesidad de contratar técnicos extranjeros para el manejo de sus invernaderos,

ya que los altos costos de inversión no permiten que haya errores en el manejo de la producción. Es un hecho que el manejo de éstas tecnologías y el monto de las inversiones involucra un conocimiento profundo de la técnica. En consecuencia, el desarrollo de tecnología y por ende la formación de recursos humanos es de vital importancia para la región.

Como se puede observar en el cuadro 1 (INEGI, 2000; LEIDLO, 2000) México se encuentra rezagado en la productividad por metro cuadrado. Es por ello una necesidad el desarrollar tecnología de bajo costo en el país que permita a los pequeños productores el adentrarse en esta industria.

México (cielo abierto)	2 kg/m <sup>2</sup>
México (invernadero)	20 kg/m <sup>2</sup>
España (invernadero)	40 kg/m <sup>2</sup>
Holanda (invernadero)	78 kg/m <sup>2</sup>

Cuadro 1. Estadísticas de producción de tomate bajo invernadero

La alta productividad y calidad de los productos de los invernaderos modernos solo puede ser alcanzada a través del apropiado control del microclima y de los nutrientes que se aplican a las plantas. Entonces no es sorpresa que preste atención en resolver el difícil problema de controlar el microclima del invernadero. Una gran cantidad de técnicas de control han sido desarrolladas con este propósito, algunas de las cuales son particularmente efectivas. Se han hecho muchos esfuerzos en aplicar técnicas teóricas de control para el invernadero, sin embargo, estos esfuerzos han tenido un éxito bastante limitado debido a las aproximaciones que se tienen que considerar al momento de diseñar los modelos dinámicos del invernadero (Van Straten, 1999).

## **I.5 Objetivos**

### **I.5.1 Objetivo General**

Desarrollar un sistema de control climático estable, eficiente, flexible y sustentable que propicie el óptimo desarrollo del cultivo.

### **I.5.2 Objetivos particulares**

- I. Desarrollar un sistema de control climático basado en la integración de FPGA's, microcontroladores en una red inalámbrica de control y monitoreo para invernaderos.
- II. Implementar el sistema de control climático desarrollado en un invernadero con un cultivo en crecimiento.
- III. Comparar los resultados obtenidos del sistema de control climático desarrollado con los sistemas de control climático utilizados en invernaderos.

## **I.6 Hipótesis**

Un sistema de control climático basado en una teoría de control adecuada, implementado en una plataforma FPGA permite mantener un microclima estable dentro del invernadero con un margen de error mínimo que satisfaga las necesidades climáticas requeridas de un cultivo a un costo accesible.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### II.1 Agricultura Protegida

Los invernaderos son estructuras empleadas para proteger cultivos. Éstos permiten modificar y controlar de forma más eficiente los principales factores ambientales que intervienen en el desarrollo y crecimiento de las especies vegetales. En el interior de un invernadero se producen micro climas artificiales ideales para aumentar los rendimientos agrícolas, sin importar las condiciones ambientales externas (Bastida, 2006).

El invernadero ha sido usado de diferentes maneras durante siglos para proteger plantas de climas extremos o para cultivar ciertas especies en lugares donde no se pueden desarrollar a cielo abierto. Esto se ha alcanzado creando mejores condiciones de crecimiento y desarrollo; tradicionalmente manteniendo un microclima interior apropiado. La agricultura protegida proporciona además otras ventajas como el uso apropiado de recursos a través del control del suministro de agua y fertilizantes. Proporciona también protección contra vientos fuertes, lluvias, granizadas, insectos, etc. Estas características tan particulares de operación y comportamiento de los invernaderos los han hecho factibles para su aplicación en diversas regiones Europa, del Mediterráneo y en países desérticos. Sin embargo, un ambiente protegido, puede compararse con una espada de doble filo, ya que al proporcionar las condiciones adecuadas para el desarrollo de los cultivos, también ofrece las características de clima que algunos patógenos necesitan para proliferar.

Desde los años 50's se han realizado estudios cuantitativos para tratar de mejorar la viabilidad comercial de los cultivos bajo invernadero. En los años 70's el interés en este campo se vio impulsado por los altos costos de los combustibles, lo que resultó en un considerable incremento de costos. Por estas razones, ha iniciado una era de investigación para optimizar el cultivo bajo invernadero, ya sea cambiando los materiales de la cubierta, su forma, los sistemas de control, actuadores o en general la estructura del invernadero (Critten et al., 2002).

## II.2 Monitoreo de variables ambientales

Las principales variables ambientales que se monitorean en el clima de un invernadero son la temperatura del aire ( $T_a$ ), concentración de  $\text{CO}_2$  ambiental ( $C_i$ ), humedad absoluta ( $AH$ ) que se define como la cantidad de humedad presente en un kilogramo de aire y el índice de contenido de saturación de humedad ( $SMC$ ) indica la cantidad máxima de humedad que puede contener el aire a una determinada temperatura sin que ocurra condensación (Kamp, 1996). El vapor de agua es invisible y se encuentra en perfecto estado gaseoso, sin embargo cuando se tiene mayor humedad en el aire de la que indica el  $SMC$  a una temperatura dada, se produce niebla, la cual a diferencia del vapor de agua esta es visible y está conformada por pequeñas gotitas de agua (Bakker, 2001; Kamp, 1989). La humedad relativa ( $RH$ ) es la relación entre  $AH$  y  $SMC$  expresada de manera porcentual que nos indica el porcentaje de humedad que el aire contiene antes de llegar al punto de saturación.

## II.3 Automatización y control

La automatización consiste en incorporar a un proceso, un conjunto de elementos y dispositivos tecnológicos que aseguren su control y buen comportamiento. Sus objetivos es la reducción de costes de fabricación, calidad constante en los medios de producción y liberar al ser humano de las tareas tediosas, peligrosas e insalubres (García-Moreno, 1999).

Un proceso automatizado asegura los parámetros apropiados para hacer mediciones, análisis de operaciones, mayor rentabilidad, cálculos en acciones de control, el personal de la planta se mantiene informado sobre el proceso así como sus capacidades y conocimientos son explotados, además la detección de fallas se realiza con mayor facilidad.

El control automático ha desempeñado una función vital en el avance de la ingeniería y la ciencia. Se ha vuelto una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de manufactura. Por ejemplo, el control automático es esencial en el control numérico de las máquinas-herramienta de las industrias de manufactura, en el diseño de sistemas de pilotos automáticos en la industria aeroespacial, y en el diseño de automóviles y camiones en la industria automotriz. También es esencial en las operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo en las industrias de proceso.

Debido a que los avances en la teoría y la práctica del control automático aportan los medios para obtener un desempeño óptimo de los sistemas dinámicos, mejorar la productividad, aligerar la carga de muchas operaciones manuales repetitivas y rutinarias, así como de otras actividades, casi todos los ingenieros y científicos deben tener un buen conocimiento de este campo (Ogata K., 2000).

## **II.4 Plataformas tecnológicas para automatización**

Se presentan las plataformas tecnológicas más utilizadas dentro de la automatización, como lo son los microcontroladores y microprocesadores, arreglos de compuertas programables en campo (FPGA's) y procesadores digitales de señales (DSP), se describen su funcionamiento así como algunas de las aplicaciones en industria y vida cotidiana.

### **II.4.1 Microcontroladores**

Los microcontroladores son circuitos embebidos en una amplia gama de equipos y dispositivos que se encuentran en el hogar, industria, comunicaciones, y otras áreas que afectan nuestra vida cotidiana. Un sistema con microcontrolador

debe disponer de una memoria donde se almacena el programa que gobierna el funcionamiento del mismo que, una vez programado y configurado, sólo sirve para realizar la tarea asignada. Dispositivo de bajo consumo de energía, con moderado poder de procesamiento, encapsulado pequeño y diversos periféricos integrados (Balch, 2003).

#### **II.4.2 Procesador digital de señales (DSP)**

En 1972 aparece el primer microprocesador de propósito general y en 1980 el primer microprocesador especializado en el tratamiento de señal (DSP), diseñado para realizar eficientemente el cálculo reiterado de la combinación producto-acumulación (operación básica de la convolución). Al convertir la manipulación de las señales en una cuestión de cálculo numérico realizada en un computador, el DSP pudo incorporar a su patrimonio todos los conocimientos matemáticos o de cualquier otra índole susceptibles de ser programados en un computador.

Un DSP, que cuenta con un simple ciclo de multiplicación, es muy adecuado para aplicaciones donde se requiere de velocidad para ejecutar cálculos y para la optimización de algoritmos en procesamiento digital de señales.

El DSP ha facilitado, por ejemplo, que hoy pueda disponerse de servicios tales como la telefonía celular, las comunicaciones de datos vía red telefónica o la televisión digital, de sistemas de conversión de texto a voz, o efectos musicales especiales que pueden convertir un salón en una catedral gótica o en el *Palau de la música*.

### **II.4.3 Arreglo de compuertas programables en campo (FPGA's)**

Un FPGA (Field Programmable Gate Array) es un arreglo bidimensional de bloques lógicos y flip-flops con interconexión electrónicamente programable entre ellos (Sulaiman et. al., 2009).

Los FPGA's se basan en una cantidad muy grande de celdas lógicas, muy elementales, y una mucho mayor interconectividad que sus contrapartes. Permite un mucho menor consumo de potencia y un mayor nivel de integración. Este tipo de dispositivo puede contar con unidades que van desde las 50,000 hasta los 10'000,000 de compuertas lógicas equivalentes (Romero-Troncoso, 2007).

Recientemente, los FPGA se han vuelto una solución alternativa para el diseño de sistemas digitales, donde previamente se encontraban dominados por sistemas de microprocesadores de propósito general. Los FPGA basado en controladores ofrecen ventajas como alta velocidad en procesamiento, funcionalidad compleja y bajo consumo de energía. Estas características son atractivas en el punto de vista para el diseño de sistemas embebidos. Actualmente se han reportado el uso de FPGA en sistemas con retroalimentación en control digital, como rodamientos magnéticos, inversores por modulación por ancho de pulso (PWM), motores de inducción, convertidores de AC/DC y controladores para variadores de velocidad. La implementación de controladores basados en FPGA no se ha enfocado en un uso óptimo de recursos en hardware. Estos diseños requieren un gran número de multiplicadores y sumadores, y no utilizan eficientemente las características de la memoria del FPGA.

Las ventajas de un FPGA son la inmunidad a la obsolescencia, por lo que si la tarjeta se deja de fabricar, el código puede ser traspasado a otra tarjeta o familia haciendo cambios mínimos, por ejemplo en la asignación de pines y flanco de interruptores. Se pueden programar inalámbricamente, son reconfigurables, todo está integrado en un solo circuito (System On a Chip), su tamaño e reducido, en el orden de milímetros, son de bajo costo, entre otros.

Las principales “desventajas” de un FPGA es su alto conocimiento y el tiempo desarrollo. Alto conocimiento si el usuario comienza a familiarizarse con esta tecnología, debe contar con conocimientos de lógica combinacional y secuencial, el cual no representa complejidad. El tiempo de desarrollo de un núcleo en específico se lleva un tiempo el cual después se repone, ya que el código puede ser llamado posteriormente para diferentes aplicaciones.

## **II.5 Plataformas de software para el desarrollo de interfaces gráficas de usuario**

Algunas de las plataformas que se han utilizado para el desarrollo de interfaces gráficas de usuario son la API de Windows, Guide de MatLab, Java, Visual Basic entre otras. Cada una son similares, sin embargo, debido al nivel de abstracción y lenguaje, el procesamiento para ejecutar las instrucciones es afectado dependiendo de la aplicación.

Los programadores escriben instrucciones en diversos lenguajes de programación, algunos de los cuales comprende directamente la computadora, mientras que otros requieren pasos intermedios de traducción. En la actualidad se utilizan cientos de lenguaje de computación. (Deitel, 2008) los divide en tres tipos generales:

- Lenguaje Máquina
- Lenguajes Ensambladores
- Lenguajes de alto nivel

Cualquier computadora puede entender de manera directa sólo su propio lenguaje máquina; que es su lenguaje natural, y como tal, está definido por el diseño del hardware de dicha computadora. Por lo general, los lenguajes máquina

consisten en cadenas de números que finalmente se reducen a 1s y 0s que instruyen a las computadoras para realizar sus operaciones más elementales, una a la vez.

Los programadores empezaron a utilizar abreviaturas del inglés para representar las operaciones elementales lo que formó la base de los lenguajes ensambladores. Estos se desarrollaron para convertir los primeros lenguajes ensamblador a lenguaje máquina, a velocidad del microprocesador de la computadora.

Para agilizar el proceso de programación se desarrollaron los lenguajes de alto nivel, en donde podían escribirse instrucciones individuales para realizar tareas de mayor complejidad. Los programas traductores, denominados compiladores, convierten a lenguaje máquina, los programas que están en lenguaje de alto nivel (Deitel, 2008).

Las presiones de salida al mercado y la proliferación de dispositivos incompatibles hacen que el diseño de software sea una tarea difícil para los desarrolladores de dispositivos de bajo consumo. Los desarrolladores de sistemas embebidos han adoptado a Java en los últimos años porque el lenguaje se abstrae del hardware subyacente, mejorando la portabilidad. Java es una buena opción para el desarrollo de sistemas embebidos por su capacidad para superar problemas en C y C++ como lo son protocolos de comunicación y portabilidad.

## **II.6 Redes inalámbricas de sensores**

La comunicación inalámbrica por radiofrecuencia y la diversificación de módulos de desarrollo han permitido implementar unidades remotas de monitoreo y control dentro de redes con alta densidad de terminales. Las ventajas de esta tecnología radican en poder controlar dispositivos a distancia o bien adquirir datos de unidades distribuidas a lo largo de grandes superficies. Ejemplo

de estas redes son usadas en sistemas para monitorear el clima en una región, la calidad de aire, el nivel de ruido en una ciudad, espacios disponibles en estacionamientos inteligentes y últimamente en agricultura de precisión para monitorear variables de interés que influyan en la producción. En los ejemplos anteriores, el uso de redes inalámbricas facilita la instalación de diversos puntos de monitoreo y control, sin la necesidad de instalar complejas y caras redes de conductores eléctricos para conectar los nodos, además de que propicia el ahorro de energía.

Los dispositivos disponibles para implementar redes inalámbricas de sensores se han popularizado y hoy muchas empresas los producen (Digi International, Texas Instruments, Microchip entre otros). Existen módulos de comunicación con alcances de decenas de kilómetros y capaces de integrar redes de decenas de miles de nodos.

## **II.7 Sistemas de control climático aplicados en invernaderos**

Muchos esfuerzos se han hecho en materia de control climático para agricultura protegida, el objetivo principal de ellos es tratar de encontrar un modelo exacto que represente la dinámica del invernadero y un control eficaz y flexible que se ajuste las variables del microclima de interés con el objetivo de proporcionar la condiciones apropiadas de clima para el crecimiento de los cultivos. Atendiendo esta problemática muchos investigadores alrededor del mundo han analizado, probado y propuesto muchos sistemas de control climático para las variables manipuladas temperatura, humedad relativa, enriquecimiento de CO<sub>2</sub>, radiación y muchas otras necesarias para generar las condiciones fundamentales para el éxito de la agricultura protegida.

### **II.7.1 Sistemas de control climático basados en control clásico**

Comúnmente llamado control clásico, es la primera teoría discutidas en este artículo. El componente más representativo de esta teoría es el controlador proporcional, integral y derivado (PID).

Aunque el PID es el controlador más famoso aplicado en la industria y ha encontrado una amplia aceptación para los usos agrícolas, no es la única solución para este tipo de problemas. Incluso, a veces no es una buena elección debido a la ausencia de un modelo fiable para él. Teniendo en cuenta esta problemática, se han propuesto sistemas de control de clima basado en la operación ON / OFF, que gestiona de forma inteligente los tiempos en que los actuadores están encendidos y prevé cambios climáticos basados en los datos registrados (Ali y Abdalla, 1993). La técnica mencionada fue estudiado previamente por Hooper y Davis (1988), quienes implementaron un controlador basado en un algoritmo que modifica los valores de consigna de calefacción del invernadero en función de las temperaturas alcanzadas anteriormente, esta técnica mostró un buen rendimiento para gestionar las desviaciones en los puntos de ajuste a través de cambios suaves. Hooper a su vez (1988) presenta un control climático integral que mezcla varios controladores, un controlador PI aplicado en calefacción y ventilación y control ON / OFF aplicado para el riego, el pH, conductividad eléctrica y la gestión de los nutrientes. Sin embargo, se ha reportado que un controlador pseudo derivativo con retroalimentación (PDF-Pseudo-Derivative-Feedback) presenta un mejor comportamiento que un un controlador proporcional-integral (PI) para uso agrícola, debido al controlador PDF tiene una mejor capacidad para manejar las cargas que el control PI. El sistema PDF fue excepcionalmente mejor que los PI en sistemas sin retardo y mucho mejor para los sistemas con retardo de tiempo (Setiawan et al., 2000).

Otros controladores aplicados en el manejo del microclima del invernadero ofrecen características adicionales, como ahorro en los consumos de energía. Un diseño de algoritmos informáticos para distribuir las demandas de energía de los

invernaderos a través de la reducción de picos que presentan los actuadores en las transiciones día-a-noche y noche-a-día fue propuesto con este propósito (Nielsen, 1995). Otros autores propone sistemas más complejos (Arvanitis et al., 2000; Davis y Hooper, 2002), estos métodos funciona teniendo en cuenta que los parámetros del microclima varían de acuerdo con las condiciones de funcionamiento y aplican un sistema de asignación de polo que estima los parámetros desconocidos del invernadero a partir de datos secuenciales de la temperatura y la capacidad de calefacción del sistema que se actualizan de forma recursiva para obtener un control más suave.

Simigirs y Rerras (1996) reportaron un controlador basado en un modelo de estructura lineal para rastrear y predecir el comportamiento del microclima como un sistema multi-entrada, multi-salida (MIMO- Multiple-input, Multiple-output). El método considera las perturbaciones como las entradas incontrolables. Los controladores de sistemas de clima han mejorado hasta el punto de considerar las perturbaciones externas y tienen la capacidad de compensarlos, se reportan resultados de controladores “feed-forward” que demuestra su viabilidad y buen comportamiento para controlar el calentamiento del invernadero (Jewett and Short, 1992; Takakura et. al., 1994). Los sistemas de tiempo real se han introducido en las aplicaciones agricultura (Millán et. al., 2010) mejorando los sistemas hasta el punto en que solo en necesaria la intervención del agricultor para ajustar las restricciones de operación del controlador (Chalabi et. al., 1996).

Es fácil darse cuenta de los esfuerzos realizados en el ámbito del control de microclima del invernadero, sin embargo, los resultados muestran que las teorías clásicas de control no son las más adecuados para atacar el problema. La razón es que los modelos del invernadero son muy complejos y altamente no lineales. Debido a esto, nuevas técnicas han aparecido para atender este problema. Los sistemas de control que no requieren un conocimiento previo o la planta del sistema, basado en sistemas informáticos, automatización, robótica y las redes de sensores inalámbricos se han integrado en la agricultura protegida con el objetivo de garantizar un mejor control (Sigrimis et. al., 2002; Gonda and Cugnasca, 2006).

## **II.7.2 Controladores basados en inteligencia artificial (IA)**

Fundamental para el éxito de la agroindustria moderna es el manejo apropiado de la producción, alta productividad y calidad de los productos. Para lograr esto es necesario emplear enfoques nuevos y mejorados para el control del microclima ya que las técnicas tradicionales ya no pueden satisfacer estas demandas. Sin embargo, a pesar de los avances en la teoría de sistemas y control, el control del invernadero sigue realizándose a través de técnicas convencionales. Estas técnicas pueden ofrecer soluciones que en el mejor de los casos solo pueden considerarse comprometedoras (Sigrimis Robert et al., 2000).

Hace años, la aplicación de nuevas y avanzadas técnicas de control estaba limitada por la baja capacidad de cómputo existente. Controladores basados en sistemas difusos (SD), redes neuronales artificiales (RNA) o algoritmos genéticos (AG) eran inconcebibles para implementarse en las plataformas de última tecnología debido a la complejidad de estas técnicas. Las nuevas técnicas no convencionales basadas en software y la inteligencia computacional finalmente encontraron su camino hacia la agricultura y varios de sus formalismos computacionales, tales como redes neuronales artificiales y sistemas basados en conocimiento han sido implementados con éxito significativo.

El campo relativamente nuevo de la computación evolutiva ha evolucionado en los últimos años debido al desarrollo de los sistemas de cómputo de gran capacidad y bajo costo. Todos estos acontecimientos prometen soluciones que no eran más que un sueño hace sólo unos años. Debido a los sistemas basados en inteligencia artificial se ha logrado solucionar el principal problema del control clásico que es la identificación del sistema, el cual es comúnmente no lineal (Caponetto et al., 2002).

Las soluciones clásicas propuestas se basan generalmente en la linealización del comportamiento del proceso en torno a los puntos de operación.

Variaciones de esta técnica realizan la linealización no sólo en torno a los puntos de funcionamiento, sino también en todo el espacio de entrada-salida que permite la obtención de varios modelos lineales locales. La mayor dificultad con esta técnica es la transición del modelo. De hecho, muchas técnicas de modelado y de identificación basados en la lógica difusa a menudo se utilizan para este tipo de sistemas (Trabelsi et al., 2007). Algunos controladores basan su funcionamiento en el paradigma anterior, como la propuesta por Castañeda-Miranda (2006), quien implementó un sistema difuso en un FPGA para controlar la temperatura del microclima del invernadero o por Kurata y Eguchi (1990) que aplicó esta teoría en el manejo del cultivo para la agricultura protegida.

Otros sistemas que se clasifican en las técnicas de IA son sistemas basados en el conocimiento (Knowledge-Based Systems), como el propuesto por Gautier y Guay (1990) que gestiona el control del clima y la producción. Este sistema es compatible con la optimización dinámica y una supervisión continua del invernadero, el prototipo propuesto se diseñó usando la programación orientada a objetos para obtener un buen rendimiento en el área del problema. Estos sistemas expertos han demostrado ser una alternativa fiable en aplicaciones de control de invernaderos (Jacobson et. al., 1989). Un sistema que soporta varios tipos de controladores de proceso digital, así como la creación y despliegue de estrategias de control basado en el conocimiento, con el objetivo de poder intervenir en una serie de ámbitos como la protección de cultivos, control de clima, nutrición de los cultivos, la planificación operativa y estratégica fue desarrollado basándose en sistemas expertos para atender las diferentes necesidades de la producción bajo invernadero (Gauthier, 1992). Este plan recibió mejoras como lo son cambiar el conocimiento empírico del agricultor por la información obtenida de una base de datos que describe el comportamiento del invernadero a lo largo de dos años (Seginer et al., 1996).

Sin embargo, sistemas basados en el conocimiento y sistemas difusos no son los únicos paradigmas aplicados en la agricultura protegida Rodríguez y Giacomelli (2009) hacen uso de la lógica difusa combinada con las redes

neuronales para proponer una estrategia de control para la agricultura bajo condiciones de invernadero, teniendo en cuenta los modelos de crecimiento de los cultivos. Aquí podemos explicar que una desventaja de las RNA es el tiempo necesario para entrenarlos. Esta problemática fue resuelta utilizando datos obtenidos de un invernadero durante dos meses para entrenar la RNA con anticipación (Linker et. al., 1998).

Controladores más avanzados fueron presentados en un estudio que aplicó un razonamiento cualitativo y computación evolutiva en el diseño de agentes de control de un invernadero (Goggos y King, 2000). La lógica difusa se aplicó para medir que tan conveniente podría ser el agente de control propuesto para satisfacer las necesidades del sistema, después, se emplea un algoritmo genético que trata de optimizar los parámetros del agente de control propuesto. Esta fusión de diferentes técnicas de control inteligente, fue aplicada en un ambiente de control para sistemas de producción vegetal, el autor utiliza un sistema de decisión basado en RNA y AG para optimizar el crecimiento de plantas en condiciones de hidroponía y también identificar la respuesta de crecimiento de las plantas a la concentración de nutrientes (Hashimoto et al., 2002).

Los sistemas difusos han logrado importantes resultados en materia de control climático para la agricultura protegida, por otra parte es necesaria información fiable del comportamiento del sistema, y no suficiente con estos requisitos, una abstracción correcta para crear reglas basadas en el conocimiento heurístico y empírico del productor es necesaria.

Las redes neuronales artificiales han demostrado su fuerza y flexibilidad para adaptarse a los datos no lineales. Su principal desventaja es que su formación adecuada requiere grandes conjuntos multidimensionales de datos para reducir el riesgo de extrapolación e incertidumbre sobre la respuesta. Por lo tanto, minimizar la dimensión del problema (tanto de entrada como vectores de estado) se vuelve de suma importancia (Seginer, 1997).

Los algoritmos genéticos como lógica difusa y redes neuronales ofrece la capacidad de controlar el sistema con un buen rendimiento sin la necesidad de basar su funcionamiento en la identificación de plantas del sistema. A pesar que los algoritmos genéticos representa una solución en el control de sistemas no lineales, los requisitos computacionales han mantenido su aplicación *in situ* imposible hasta en los últimos años. Se concluye con la afirmación que utilizar un sistema basado en inteligencia artificial se justifica en los problemas de control donde la planta del sistema es altamente no lineal, cuando el modelo no es fiable o simplemente no ha sido identificado.

### **II.7.3 Controladores basados en técnicas avanzadas**

La agricultura de precisión ha sido dirigida por restricciones ambientales y económicas, cambiando de un contexto tradicional a un campo completamente diferente donde la electrónica y computadoras han sido aplicadas con el objetivo de incrementar producción y calidad (Hamrita et al., 2009). Para alcanzar los requerimientos de la nueva agricultura, aplicar maquinaria de precisión, sensores y actuadores se ha vuelto indispensable (De Baerdemaeker et al., 2002). Sin embargo, la introducción de toda esta maquinaria en la agricultura no es suficiente para garantizar las condiciones apropiadas del microclima dentro del invernadero, teorías de control avanzadas son aplicadas para garantizar la correcta operación de los actuadores y simultáneamente tratando de garantizar los importantes ahorros energéticos.

En esta sección, serán discutidos controladores climáticos que basan su operación en algoritmos complejos. Análisis de controladores predictivos (MPC-Model Predictive Control), controladores en tiempo real, control robusto y no lineal, sistemas “feed-forward” incluso herramientas de apoyo en toma de decisiones que garanticen integración de temperatura eficiente son presentados.

La necesidad de garantizar el rendimiento y la calidad de los cultivos de invernadero ha exigido un control estricto sobre el clima de las plantas, anteriormente el único objetivo de los controladores era el de ajustar determinada variable a un punto de ajuste con un determinado error que pudiera ser considerado aceptable. Sin embargo, con los incrementos en costos energéticos, el diseño de controladores que además consideren los requerimientos energéticos se han vuelto necesarios. Atendiendo esta problemática, han sido presentados controladores en tiempo real que generen ajustes óptimos para la calefacción han (Chalabi et. al., 1996), este método modifica los puntos de operación de los actuadores sobre un determinado periodo para generar ahorros energéticos, estas acciones de control se justifican en estudios que demuestran que para determinados cultivos es suficiente mantener una temperatura promedio sobre un periodo de tiempo largo (Hurd y Graves, 1983), (De Koning, 1990). El algoritmo se basa en un modelo de necesidades energéticas del invernadero y en un método numérico de optimización, donde el problema de control se convierte en un problema de programación no lineal resuelto por programación cuadrática secuencial.

Debido a que la no linealidad es un importante problema al controlar el microclima generado al interior de un invernadero, algunos investigadores han optado por simplificar el problema (Ioslovich et. al., 1996) basándose en un modelo simple del crecimiento del cultivo, el objetivo del control es considerar los costos energéticos empelados en calentamiento y ventilación.

Cuando es necesario controlar un sistema no lineal donde la planta es desconocida, el uso de controladores feedback-feedforward es un alternativa prometedor, este tipo de controladores consideran eventos inesperados en el modelo de control tratando de reducir el error a cero sin importar las perturbaciones que se presenten. Este tipo de controladores ha sido utilizado para diseñar controladores no lineales que manejen la relación que existe entre temperatura y humedad (Albright et al., 2002). Este tipo de controladores fue usado más tarde en un sistema de linealización y desacople del microclima del

invernadero, con el objetivo de controlar la ventilación y la nebulización usadas en el control de temperatura y humedad (Pasgianos et al., 2003). Este controlador considera perturbaciones externas y además considera las capacidades y punto de saturación de los actuadores.

Los controladores, que además de reducir el error a cero, buscan un ahorro en el consumo de energía se citan en esta sección por considerarse sistemas de control avanzados, sin embargo para lograr lo antes mencionado es necesario tener conocimiento de los procesos fisiológicos de los cultivos e incluir estas restricciones en el diseño de los sistemas. Por ejemplo, investigaciones hortícolas reportan que la mayoría de las plantas responden mayormente a promedios de temperatura en periodos de tiempo largos que ha temperaturas específicas para el día y la noche (Langhans et. al., 1980; Miller et al., 1985). Basándose en estos resultados, se han propuesto controladores climáticos que ajusten los puntos de operación dentro de un rango de temperaturas admisibles, logrando con esto conseguir ahorros de energía. Estos resultados fueron usados en el diseño de herramientas que conjugaran la relación entre la fotosíntesis y la experiencia del agricultor sobre el crecimiento de las plantas. El método se basa en variar los ajustes en temperatura usando información previa con el objetivo de alcanzar promedios aceptables en periodos definidos por el usuario. El sistema propuesto posee la ventaja de no requerir información meteorológica y el agricultor solo necesita ajustar los valores mínimos y máximos de temperatura admisibles (Sigrimis et. al., 2000).

Estos sistemas de control fueron utilizados para diseñar estrategias de control aplicadas a calefacción, enfriamiento y dehumidificación del invernadero, incluso en la regulación del Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), iluminación e irrigación (Gauthier et al., 1995). A su vez se han realizado consideraciones sobre la variación de los procesos de la planta a lo largo del día y del estado vegetativo de la misma, para proponer sistemas de integración de temperatura. La base de operación de estos sistemas es identificar los diferentes procesos que llevan a cabo las plantas y separarlos en procesos de respuesta rápida o lenta, y proponer

rangos de operación según los procesos que se necesite controlar, incrementando con esto el potencial de ahorro de energía (Körner y Challa, 2003a).

Un enfoque diferente fue propuesto en una herramienta de apoyo en la toma de decisiones que ayuda a elegir en que semana del cultivo aplicar determinado régimen de temperatura. Este trabajo analiza el clima del invernadero y el crecimiento de los cultivos en respuesta a seis diferentes regímenes de integración de temperatura con grados de libertad variables (Körner y Van Straten, 2008), el modelo del cultivo, la integración de temperatura, control dinámico de humedad y regímenes negativos para la diferencia entre los promedios de temperatura del día y la noche (DIF- difference between average day temperature and average night temperatura) también fueron considerados en este trabajo.

El modelo de control predictivo (MPC- Model Predictive control) es una teoría de control avanzada recientemente aplicada en el campo de la agricultura protegida con la finalidad de predecir el comportamiento de las variables del microclima del invernadero. Empleado este concepto de control, se ha desarrollado algoritmos computacionales que consideren información meteorológica para proponer nuevos problemas óptimos de control con cada actualización de dicha información (Gutman et. al., 1993). Una contribución a este esquema fue considerar la información sobre el crecimiento de los cultivos, facilitando el diseño de estrategias de control a través de consideraciones económicamente viables (Van Straten et. al., 2000). Este método realiza un selección de procesos por su tiempo de respuesta, donde los procesos rápidos como la fotosíntesis, evapotranspiración son controlados por un controlador MPC mientras que los procesos lentos son dejados al criterio del agricultor.

Se han hecho comparativas entre los controladores MPC y los PID convencionales encontrando un ahorro de energía al emplear los primeros, además de que resuelven muchos de los problemas presentes en los sistemas PID (El Ghomari et al., 2005). Debido a las ventajas presentadas por los

controladores MPC, se han propuesto diferentes estrategias para sintonizar estos controladores; como lo es el uso de la partícula de Swarm para diseñar un controlador MPC sujeto a nuevas restricciones. El modelo emplea información del clima dentro y fuera del invernadero, así como las señales de control de entrada y las salidas de los controladores. El principio de operación consiste en asegurar ajustes de control a través del mínimo esfuerzo. El resultado muestra un mejor desempeño que los algoritmos genéticos y los métodos cuadráticos programables en la sintonización de los controladores MPC (Coelho et al., 2005).

El control robusto también ha encontrado un campo de aplicación en la agricultura de precisión, ya que facilita el control ante parámetros inesperados, perturbaciones y errores de modelado, básicamente ha sido aplicado para manejar la fuerte relación entre temperatura e higrometría (Bennis et. al., 2008). Diferentes métodos han sido aplicados en la búsqueda por encontrar una solución óptima para controlar el microclima del invernadero, yendo desde la búsqueda de control secuencias (SCS- Sequential Control Search) o el principio máximo de Pontryagin's (PMP- Pontryagin's maximum principle) (Seginer y McClendon, 1992) hasta sistemas que consideran el modelo del cultivo y además como el cultivo afecta el comportamiento del clima a sus [Jones et al., 1990]. Posteriormente, se considero que los requerimientos del cultivo varían con el estado vegetativo del mismo, y eso ha sido empleado en el diseño de regímenes de control de temperatura y humedad (Bautista et al., 2010; Körner y Challa, 2003b).

Debido a que ahorrar energía es un importante objetivo en la nueva agricultura, la implementación de sensores inteligentes que sean capaces de adquirir información relevante de los cultivos se ha vuelto una necesidad (Millan-Almaraz et al., 2010). En su afán por mejorar la producción bajo invernadero, grandes esfuerzos se han realizado en el campo de teoría de control, pero además se ha puesto importante atención en crear estrategias que garanticen mediciones fiables a través de técnicas de filtraje o de procesamiento de señales que garanticen el rendimiento de los sistemas desarrollados (Ibrahim y Sørensen, 2010). Estos esfuerzos aunados al desarrollo de controladores que manejen

incertidumbre y que predigan el comportamiento de los procesos, el trabajo por entender los procesos de las plantas y como estos modifican sus alrededores y el esfuerzo de canalizar todo este conocimiento en el desarrollo de sistemas a través del ahorro de energía fue el tema discutido en esta sección. Sin embargo, la limitada información (la cual mucha es información empírica o heurística) sobre cómo y porque ocurren los procesos fisiológicos de las plantas limitan mucho el desarrollo de este tipo de técnicas.

#### **II.7.4 Controladores híbridos**

Cada técnica de control ofrece soluciones para determinado problema, desafortunadamente no se ha encontrado una técnica en particular que pueda manejar las diferentes características y limitaciones que presentan el complejo y no lineal microclima del invernadero. Atendiendo esta problemática han aparecido controladores híbridos que combinan las características de diferentes esquemas de control.

La combinación de teoría clásica de control con paradigmas de inteligencia artificial, e incluso la consideración de los procesos fisiológicos de la planta en el desarrollo de sistemas de control eficientes y ahorradores de energía han sido alcanzados. Resultados obtenidos al combinar la linealización por retroalimentación con modelos de control predictivos han sido prometedores, modelos híbridos han mostrado ser una alternativa viable en el manejo de sistemas no lineales, transformando el problema del invernadero (no lineal) en un problema optimizado de comportamiento lineal (Pino et. al., 2005).

Los controladores predictivos (MPC) han recibido atención e importantes mejoras, modelos híbridos los han combinados con algoritmos genético (AG) facilitando la incorporación de los consumos de energía y agua en los parámetros del modelo no lineal (Blasco et al., 2007). De igual forma los algoritmos genéticos en su forma “Annealing” (AAG) han sido aplicados en la calibración de

controladores PID, donde los AAGs juegan un papel fundamental en la identificación de parámetros mostrando ventajas sobre los AGs tradicionales tales como convergencia prematura y la necesidad de baja capacidad de cómputo para su implementación (Fan y Zuo-hua, 2006). A su vez, la combinación de redes neuronales con sistemas Feed-Forward han sido empleadas para ajustar la salida de los actuadores a valores deseados (Fourati y Chtourou, 2007).

A lo largo de este capítulo, se ha prestado atención en resaltar que no solo el controlador es necesario para garantizar las apropiadas condiciones climáticas dentro del invernadero, fundamental para lograr este propósito es diseñar sistemas integrales, fiables en cada uno de sus componentes. Se ha desarrollado sistemas para detectar las fallas en el sistema de monitoreo del invernadero, actuadores y detección de estrés hídrico en las plantas. Aplicando un híbrido de modelos físicos y redes neuronales con detección robusta de fallas, se demostró que las fallas pueden ser detectadas e identificadas de forma eficiente, alcanzando con esto una reducción considerable de pérdidas energéticas y de producción causadas por estos problemas (Linker et al., 2000).

Se puede observar una tendencia en combinar las ventajas de las diferentes teorías de control, los modelos híbridos comienzan a parecer como resultado de las mejoras que ofrecen en el control de procesos. Sin embargo la capacidad de cómputo requerida para aplicarlos *in-situ* requiere que se preste especial atención en el desarrollo de las plataformas tecnológicas necesarias para implementarlos.

## **II.8 Plataformas tecnológicas aplicadas en invernaderos**

Cuando se busca resolver un problema, la plataforma tecnológica es de gran importancia, el campo de la agricultura impone retos a dichas plataformas que deben de considerarse en el diseño para poder garantizar la robustez del sistema. Debido a esto una plataforma que garantice la operación ininterrumpida,

capaz de responder a los cambios del proceso y que además sea de bajo costo es necesaria para propiciar el éxito de los nuevos entornos de producción (Fang y Zhen-Xiao, 2008).

La primer y más popular plataforma elegida para aplicaciones dentro de los invernaderos fue la computadora personal (PC). La aplicación de la PC abrió posibilidades para implementar algoritmos complejos de control que resultaban imposibles en el pasado (Fang Xiao Zhen-Xiao, 2008). Fue posible además integrar nuevos módulos, sensores y comunicaciones (Ali y Abdalla, 1993). Diferentes configuraciones y redes de computadoras han sido propuestas para alcanzar un control de procesos más eficiente (Hooper, 1988). Las facilidades de comunicación son una ventaja muy grande presentada por las PCs, conexiones vía modem han logrado conectar equipos dentro y fuera del invernadero, normalmente una unidad se ubica fuera del invernadero para reportar el comportamiento del invernadero, alarmas, ajustes, adquisición y transferencia de datos así como envío de información meteorológica y acciones de control a una computadora ubicada dentro del invernadero dedicada para la lectura de sensores y control sobre los actuadores (Chalabi et al., 1996).

De igual manera han sido empleadas computadoras de control climático y data-loggers específicos de compañías que se dedican a control de invernaderos (Nielsen, 1995; Linker et. al., 1998). Estos sistemas ofrecen soluciones a los problemas que acarrea la práctica de agricultura protegida. Sin embargo, las PCs no son la plataforma más apropiada para aplicaciones de campo, caracterizadas por ser ambientes ruidosos con altos niveles de humedad y cambios constantes en la temperatura. Debido a esto las PCs son susceptibles a fallos, paros durante la operación y otro tipo de daños. Si además consideramos el costo de emplear una red de computadoras o usar dispositivos de propietarios, es obvio que se necesita buscar una nueva plataforma que garantice robustez y sustentabilidad. Sistemas basados en microcontroladores o procesadores digitales de señales (digital signal processors DSP) han sido desarrollados con resultados prometedores, sin embargo su limitada capacidad de computo dificultan la

aplicación de algoritmos avanzados de control, incluso en algunas ocasiones estos algoritmos son muy demandantes para las mismas PCs (Coelho et al., 2005).

El desarrollo de sistemas embebidos para aplicaciones particulares ha demostrado ser una solución eficaz en aplicaciones industriales. Este antecedente ha migrado al campo de los invernaderos. El diseño de plataformas que consideran las condiciones del lugar donde serán ubicadas y las necesidades de hardware garantizan robustez en la operación a un bajo costo. En los últimos años los FPGAs han demostrado ser una solución de alto rendimiento y bajo costo para aplicaciones en sistemas embebidos para invernaderos (Castañeda-Miranda et al., 2006).

## **METODOLOGÍA**

### **III.1 Banco de pruebas**

Fundamental para el desarrollo del proyecto es el banco de pruebas donde se desarrollara el experimento, atendiendo esta necesidad se usó el invernadero de la facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro Campus Santiago de Querétaro. El invernadero es de tipo dos aguas, está compuesto por 4 naves, las dimensiones son de 26x36 metros. En la figura 1 se puede ver un diseño tridimensional del banco de pruebas para el experimento.

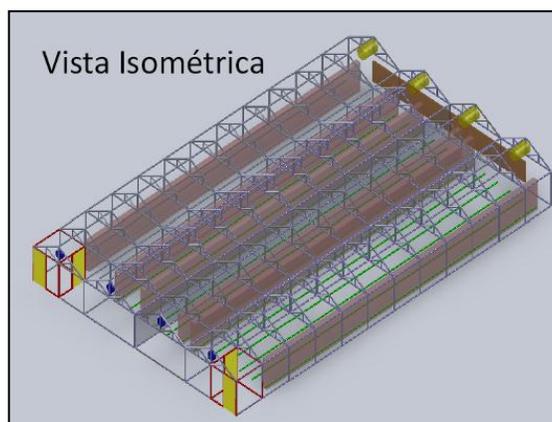


Fig. 1 Banco de pruebas para el proyecto (Invernadero FI-UAQ).

Antes de iniciar el experimento fue necesario reacondicionar el invernadero ya que es estado en el que se encontraba no era el más apropiado. Las labores de reacondicionamiento se detallan a continuación.

### III.1.1 Instalación del techo del invernadero.

La primera actividad que se realizó fue quitar todos los plásticos que forman el techo del invernadero, esto debido a que se encontraban en su mayoría rotos a causa de los fuertes vientos y a la falta de mantenimiento.

Debido a que uno de los principales problemas estructurales del invernadero son los daños que sufren los plásticos del techo a causa de fuertes vientos o lluvias, se ideó instalar una malla de alambre galvanizado que sirviera de soporte para los plásticos, de esta manera la fuerza ejercida por viento y lluvia se distribuiría de manera equitativa sobre el alambrado y no solo en los sujetadores fijados a la estructura del invernadero. Para la instalación de esta malla se empleó alambre galvanizado de 2.5 mm de diámetro y se dispuso a lo largo y ancho de cada nave formando una cuadrícula de 50x50cm.

Una vez terminada la instalación de este soporte de malla de alambre, se procedió a instalar los plásticos que cubren el invernadero y lo aíslan del medio formando el mencionado microclima y lo protegen de condiciones ambientales adversas (granizadas, lluvias, fuertes vientos, etc.).



Fig. 2 Estado inicial del invernadero.



Fig. 3 Techo reconstruido.

Finalmente se instaló sobre los plásticos del techo, malla sombra al 50% con el propósito de reducir las altas temperaturas que se alcanzan dentro del invernadero.



Fig. 4 Techo del invernadero terminado, soporte de malla de alambre + plásticos + malla sombra.

### **III.1.2 Reparación de motores y transmisiones de ventanas cenitales y laterales.**

Terminada las reparaciones en el techo (cambio de los plásticos en su totalidad) y de los muros del invernadero, se revisó el estado de los actuadores con que contaba el invernadero, se dio mantenimiento y reparación a 6 motores marca weg trifásicos 460/230 voltios a 1/1.9 Amperes respectivamente así como a sus transmisiones y las flechas que en conjunto se encargan de manipular las cuatro ventanas laterales y dos ventanas cenitales.



Fig. 5 Sistema de ventanas (cenitales y laterales) del invernadero.

### III.1.3 Instalación del sistema de riego.

Debido a que parte del experimento es probar los dispositivos diseñados en un invernadero con un cultivo en desarrollo, se tuvo que rediseñar el sistema de riego para ajustarse a las necesidades de otros proyectos que están corriendo de forma simultánea en el mismo lugar. Para esto se instalaron cuatro bombas hidráulicas con capacidad de 1 HP a 220/110 voltios y 7/4 amperes respectivamente que bombean agua de una cisterna ubicada bajo el suelo a un lado del invernadero. Se le dio mantenimiento a esta cisterna y se le conectó a la red de agua potable de la escuela para tener agua siempre disponible para el riego. El sistema implementado inyecta diferentes sustancias nutritivas a cada línea de riego. Estas sustancias están contenidas en 4 tinacos de 750 litros y se conectan a la línea de entrada de cada bomba, succionando la sustancia nutritiva cuando la bomba se enciende.



Fig. 6 Sistema de riego propuesto.



Fig. 7 Tanques con mezclas nutritivas.

### III.1.4 Instalación del muro húmedo

El sistema que se empleó para el control de temperatura y humedad será un muro húmedo construido con paneles de celulosa. Para esto se adquirieron 300 paneles de celulosa de 6 x 12 x 72 pulgadas. Se instaló una base de acero (PTR de 1.5 pulgadas) que dará soporte a los paneles y servirá para recircular el

agua que utilizara el muro húmedo. Finalmente se instalo una bomba de 1 HP con un filtro para evitar llevar solutos a los paneles del muro húmedo. Se instalo un sistema de distribución de agua con tubería de PVC de ½ pulgada en la parte superior de los paneles y un desagüe que regresa el agua que no se utiliza a la cisterna de donde es bombeada.



Fig. 8 Bomba para irrigación del muro húmedo



Fig. 9 Muro húmedo de paneles evaporativos.

El principio de operación del muro húmedo se base en aprovechar el proceso de evaporación del agua, el aire es succionado a través de un medio húmedo poroso, donde el calor sensible evapora un poco de agua reduciendo la temperatura del aire entre un 60% y 95% dependiendo del la resequedad del mismo y el medio enfriador. Este sistema fue elegido por los reportes que existen de su eficiencia, además de no requerir de mucha energía para funcionar, solo se necesita una bomba de 1.5 HP 220/110 voltios a 7/4 amperes respectivamente. Y debido a las condiciones climáticas del estado de Querétaro y gran parte del territorio mexicano (semidesértico con altas temperatura y humedades relativas muy bajas) lo hacen el método más apropiado para reducir la temperatura dentro del invernadero y a la vez incrementar la humedad relativa.

### **III.1.5 Reparación de los accesos al invernadero**

Otra de las actividades que se realizaron para habilitar el invernadero y dejarlo en condiciones operables es el mantenimiento del acceso existente y la instalación un acceso más (esto debido a las necesidades de otros experimentos que se realizan de manera conjunta). Esto con la finalidad de garantizar la inocuidad de nuestro cultivo y el sistema en su totalidad.

### **III.1.6 Instalación de la red eléctrica**

Uno de los principales problemas del invernadero en cuestión es la falta de una instalación eléctrica apropiada que se apegue a las normas y que sea capaz de proporcionar la corriente necesaria para operar los diferentes actuadores que se requieren activar (bombas, motores, extractores, etc.). Es por esto que se instalaron dos centros de carga dentro del invernadero, fueron ubicados en dos de las esquinas del invernadero. Cada centro de carga tiene una capacidad para un interruptor termo magnético trifásico de 50 Amperes y tres de 25 Amperes. Ambos centros de carga se conectaron directamente a la línea de alimentación de posgrado de la facultad de ingeniería a través de un centro de carga ubicado en uno de los cubículos que colinda con el invernadero.

### **III.2 Medición de humedad y temperatura**

Los dispositivos básicos para la medición de temperatura son sensores digitales Sensirion SHT75. Estos sensores integran elementos sensores para cuantificar la temperatura y humedad más un sistema de procesamiento de señales en un encapsulado compacto para proveer una salida digital totalmente calibrada. Este sensor digital implementa un sensor capacitivo para medir la humedad relativa mientras que para medir temperatura emplea un sensor “band-

gap". Ambos sensores están conectados a un convertidor analógico digital de 14 bits. El cual proporciona lecturas para humedad y temperatura de 12 y 14 bits respectivamente. Finalmente hay que agregar que cada sensor es calibrado individualmente, posee una gran estabilidad térmica y ultra bajo consumo de potencia. El protocolo de comunicaciones para comunicarte con este sensor es una variante del I2C. Esta variación imposibilita el uso de los módulos I2C incluidos en microcontroladores, por lo que es necesario realizar una rutina para la comunicación o emplear un FPGA si se requiere leer varios sensores de manera simultánea.

La ventaja principal del empleo de estos sensores digitales son los ahorros en espacio y recursos al no requerir etapas de instrumentación y filtraje analógico. Sin embargo su desventaja es que requieren encapsulados para protegerlos de ambientes demandantes, donde el polvo o la precipitación puede dañarlos permanentemente.

### **III.3 Comunicación Inalámbrica**

Parte fundamental del proyecto es la comunicación, en este caso será inalámbrica a través de módulos de RF ZigBee, estos módulos operan en el estándar IEEE 802.15.4 a 2.4 GHz proporcionando un rango de hasta 42 millas según el modulo. Este tipo de dispositivos están diseñados para trabajar en la banda ISM (industrial, scientific and medic), industrial-científico-medico para garantizar integridad en las comunicaciones y evitar interferencia con otras bandas de frecuencia.

### **III.4 Sistema de monitoreo y control inalámbrico**

Los invernaderos comerciales ocupan comúnmente grandes extensiones de terreno, lo que hace complicado y costosa la comunicación con los dispositivos sensores y actuadores finales. La forma comercial en que se atiende esta problemática es a través de un centro de control que se encarga de concentrar las lecturas de los sensores, el controlador y la etapa de potencia en un solo modulo. Esto conlleva algunos inconvenientes cuando se requiere cambiar la posición de algún sensor o actuador, ya que la distribución del cableado a lo largo del invernadero es algo complicada, sin mencionar los costos de instalación de dichos dispositivos.

Atendiendo esta problemática, en el presente proyecto de tesis se implemento un sistema de comunicación inalámbrico donde un coordinador fue ubicado en el acceso del invernadero y varios dispositivos de monitoreo y control están distribuidos en puntos de interés. Se proponen dos sistemas distintos como puntos finales de la red inalámbrica, un tipo será el encargado de monitorear variables de interés tales como temperatura y humedad relativa mientras que el otro será el responsable de activar o desactivar los actuadores responsables de modificar las condiciones del microclima del invernadero. Estos dispositivos finales se dividieron en tres etapas, donde el modulo de procesamiento está basado en un microcontrolador Microchip Pic18f2550, el modulo de comunicación soporta comunicación USB 2.0 y transmisión inalámbrica de datos ZigBee (Radio frecuencia) y los módulos de instrumentación y control pueden ser de monitoreo o tarjetas de control basadas en relevadores o dispositivos de estado sólido de alta potencia (TRIAC'S).

Es importante resaltar que se diseñaron de manera modular para poder intercambiar los diferentes módulos según nuestras necesidades (ver figura 10). Y la distribución de puertos y recursos del modulo de procesamiento se distribuyo para atender la mayoría de las necesidades que se pudieran presentar.

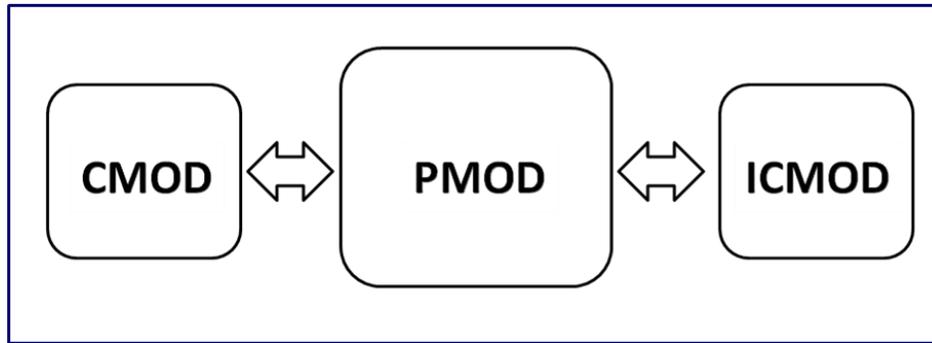


Fig. 10 Módulos que integran el sistema propuesto.

Por otra parte el coordinador está integrado por un FPGA ALTERA Cyclone III EP3C16F484C6N que viene integrado en un kit de desarrollo. La justificación del uso de un FPGA como coordinador se debe a su capacidad de operación en paralelo, lo cual lo hace la opción más apropiada para aplicaciones de esta índole, porque recordemos que los procesos que se realizan en el invernadero no se limitan a controlar el clima, existen otros procesos de mucha importancia como controlar el sistema de riego o administrar el acceso al invernadero. El FPGA es una plataforma tecnológica que permite la integración de estos diversos protocolos de control y comunicación en el mismo dispositivo operando de forma paralela e independiente unas de las otras.

La plataforma FPGA será acoplada a su vez a un modulo de comunicación (CMOD\_USB\_XBEE) para enlazarse con los distintos nodos a lo largo del invernadero. El coordinador es el responsable de solicitar de manera constante las lecturas de los diferentes sensores, recopilarlos en RAM y transmitirlos para su almacenamiento, también es el responsable de tomar las debidas acciones de control. Para esto una vez identificada la acción de control necesaria, se comunicara de forma remota con el modulo responsable de encender los actuadores y este a través de una etapa de potencia (ICMOD) activara o desactivara los sistemas mecatronicos de control.

De manera inmediata, la principal ventaja del sistema desarrollado es la facilidad para cambiar la posición de un punto de monitoreo o actuador sin que

esto conlleva mayor problema, debido a que los módulos son inalámbricos y no dependen de la red eléctrica para funcionar, solo en el caso de los actuadores, si se requiere modificar su posición o agregar nuevos dispositivos, será necesario conectar las etapas de potencia a las líneas de electricidad.

### **III.4.1 PMOD\_PIC**

Como se describió anteriormente, los módulos finales de monitoreo y control distribuidos en el invernadero están integrados por tres diferentes etapas, una etapa de comunicación (CMOD), una etapa de procesamiento (PMOD) y una etapa de instrumentación y control (ICMOD). La etapa de procesamiento está compuesta por un microcontrolador Microchip PIC18f2550 en encapsulado SOIC (small-outline integrated circuit) de ultra bajo consumo de potencia (Nano Watt Technology). En la figura 16 se observa cómo se distribuyeron sus componentes y recursos en el modulo desarrollado. Esta distribución se hizo pensando en estandarización y modularidad, atendiendo y separando las dos principales necesidades del proyecto que son, comunicación e instrumentación y control. Es por eso que del lado izquierdo del modulo conectamos solamente el modulo del microcontrolador responsable de la comunicación UART y algunos pines digitales (GPIO1) de propósito general para futuras aplicaciones.

La etapa de conexión a los módulos de instrumentación y control es más compleja, se integró con los módulos de comunicación SPI e I2C debido a que la mayoría de los dispositivos comerciales manejan estas interfaces de comunicación (relojes en tiempo real, sensores digitales, convertidores analógico digital y digital a analógico, etc.), también en este bus se agregaron los módulos de conversión analógico a digital que tiene el microcontrolador y serán útiles para la lectura de sensores analógicos (ADC) , módulos generadores de ancho de pulso (PWM), interrupciones externas y pines de propósito general (GPIO2) también se dispusieron de este lado del modulo de procesamiento.

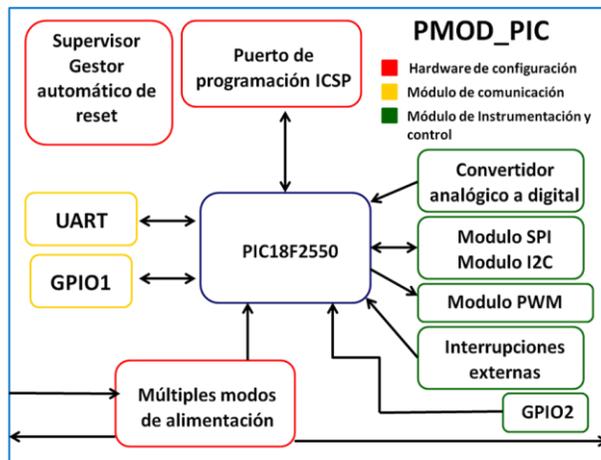


Fig. 11 Módulo de procesamiento basado en microcontrolador.

Parte importante del módulo desarrollado es la integración de un circuito de reset automático Dallas Semiconductor DS1818R el cual es un dispositivo supervisor avanzado que se encarga de reiniciar un microcontrolador o procesador después de una falla de energía, este sistema mantendrá al microcontrolador en *reset* durante 150 ms asegurando su reinicio.

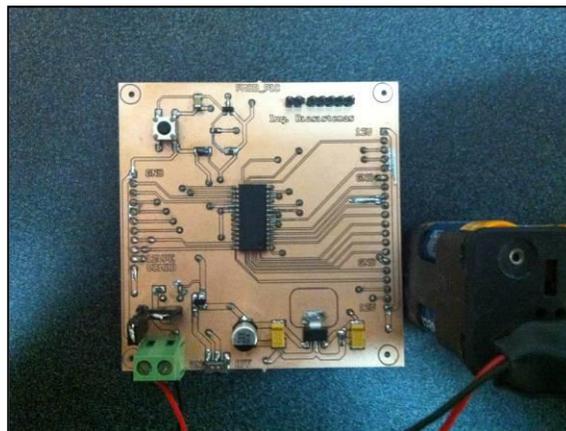


Fig. 12 Unidad remota PMOD\_PIC18f2550.

El módulo de procesamiento también contiene un conector para programación serial en circuito (ICSP in circuit serial programming) y su propio regulador de voltaje a 3.3 voltios 0.5 amperes. El circuito se alimenta directamente

enviando rieles de voltaje y tierras hacia los ICMOD y CMOD o bien puede ser alimentado desde el CMOD o algún dispositivo externo como una foto celda. Finalmente se incluyeron los desacoplos especificados por el fabricante para garantizar la correcta operación del microcontrolador.

### **III.4.2 ICMOD\_MONITOR**

Otro modulo importante desarrollado para este proyecto es el ICMOD encargado de la medición de las variables de interés, este modulo compatible pin a pin con el modulo de procesamiento (PMOD) se alimenta del riel de voltaje de 12 volts proveniente del PMOD\_PIC18f2550 e integra diversos sensores digitales y analógicos. Los sensores digitales que utiliza son el Sensirion SHT75 para temperatura y humedad en 14 y 12 bits respectivamente y tiene como interfaz de comunicación una variación del protocolo I2C. Al estar calibrados de manera individual y estar compensados en temperatura proveen lecturas de gran precisión y exactitud.

El modulo integra también un sensor analógico de voltaje pensado para mediciones donde el medio sea más demandante (agua, tierra, etc.) y donde el Sensirion no pueda operar. Este sensor es un RTD Honeywell Pt1000 que tienen un rango de medición de -200 °C a 540 °C, pero configurados para un rango de 0 a 65°C con una precisión de +/- 0.3 °C que resulta adecuada para los rangos de temperatura de los invernaderos. Se desarrollo un sistema de acondicionamiento de señal para convertir la variación de resistencia eléctrica del RTD en un formato estándar de 0 a 5 voltios mas una etapa de filtrado analógico que discrimine el ruido que pueda introducir el medio.

El tercer dispositivo es un sensor cuántico OSRAM SFH-5711 con un rango de 0 a 100,000 lux y una precisión de +/- 0.04% de su valor medido (OSRAM 2007), el cual provee una salida logarítmica de 0 a 50 µA la cual es convertida al estándar de 0 a 5 voltios por una etapa de acondicionamiento de señal. Estos

rangos de medición resultan adecuados para medir iluminación desde cuartos completamente oscuros hasta la luz del sol. Al igual que en el sensor RTD la señal proveniente de este sensor pasa por una etapa de acondicionamiento de señal diseñada con amplificadores Texas Instruments de alto desempeño, especiales para aplicaciones de alta resolución.

La medición de CO<sub>2</sub> se realizó a través de un sensor infrarrojo no dispersivo (NDIR-Non Dispersive Infrared) CO<sub>2</sub> Engine K30 de la compañía SenseAir el cual puede medir de 0 a 5000 ppm con una precisión de  $\pm 30\text{ppm} \pm 3\%$ . El dispositivo puede operarse de manera digital a través de la comunicación UART o bien haciendo lecturas de valores analógicos de voltaje en dos rangos distintos, de 0 a 5 voltios ó 0 a 10 voltios para el rango completo de 0 a 5000 ppm con un comportamiento lineal.

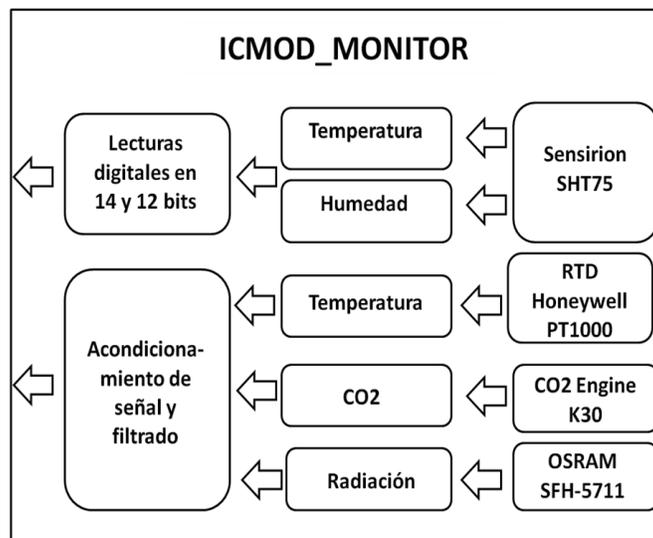


Fig. 13 Módulo de instrumentación y control para medición de variables temperatura, humedad, radiación y CO<sub>2</sub>.

### III.4.3 CMOD\_USB\_XBee

El módulo de comunicación diseñado soporta comunicación por dos protocolos distintos, uno de ellos es USB 2.0 y el otro es mediante radio frecuencia

empleando un modulo XBee de la compañía Digi International al que se accede por UART. Para la comunicación USb 2.0 se emplea un FTDI FT232RL que se encarga de manejar los dos protocolos (USB y UART) y puede operar a velocidades de 3 Mbaudios por segundo, lo que lo hace ideal para transmisiones muy grandes de datos. También se puede realizar la comunicación a través del modulo de radio frecuencia XBee, el cual tiene un alcance teórico de 120 metros, aunque en la práctica no se pudieron utilizar por encima de los 40 metros de separación entre ellos. Este modulo recibe alimentación de voltaje de un riel de 12 volts proveniente del PMOD y a través de un regulador de voltaje de 3.3 voltios 0.5 amperes alimenta al XBee mientras que el FTDI se energiza con el voltaje proveniente del conector USB.

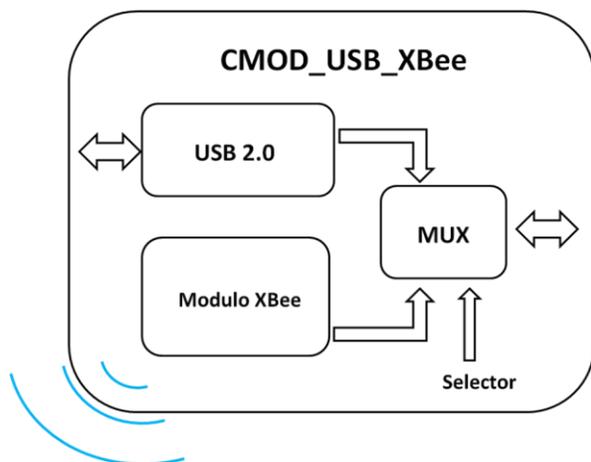


Fig. 14 Diagrama a bloques de modulo de comunicación CMOD



Fig. 15 CMOD\_USB\_XBee

### III.4.4 ICMOD\_CONTROL

Como etapa de control se desarrollaron dos tarjetas, una de ellas es la que energiza y determina el sentido de giro de los motores encargados de abrir y

cerrar las ventanas cenitales y laterales del invernadero en cuestión, la principal ventaja de esta topología es la capacidad de controlar más de un motor con la misma línea de alimentación (ver figura 21). Este modulo se encarga de hacer el intercambio de fases de corriente alterna para modificar el giro del motor.

También se diseño otro modulo para encender o apagar la bomba del muro húmedo del invernadero (ver figura 22).

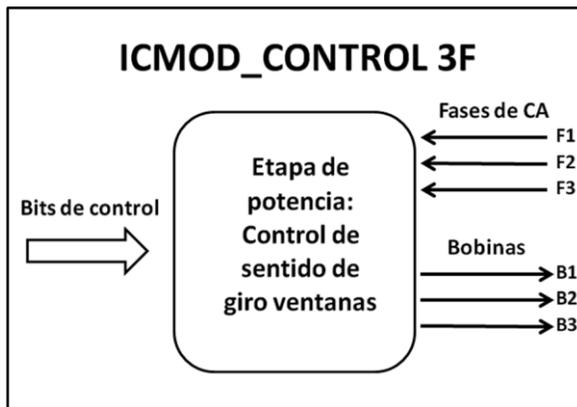


Fig. 16 Diagrama esquemático del ICMOD para control de motores

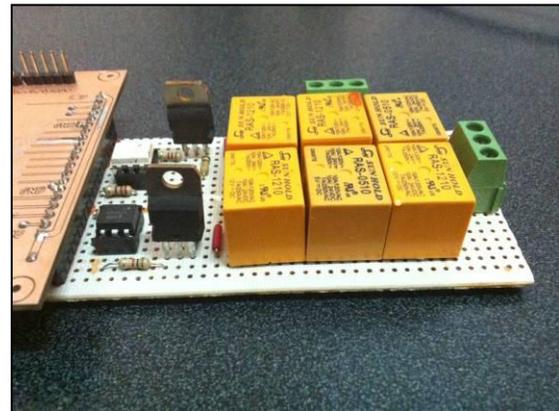


Fig. 17 ICMOD para arranque e inversión giro de motores.

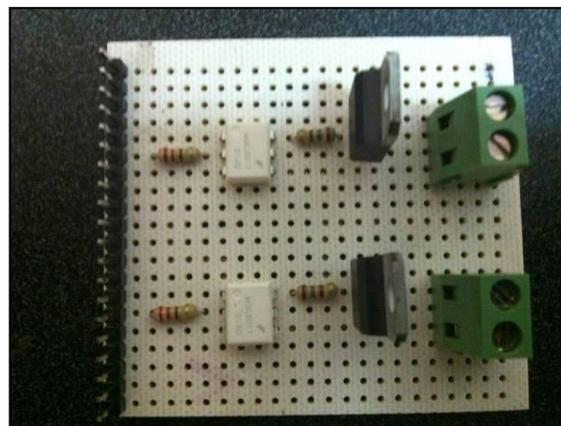


Fig. 18 ICMOD para arrancador de la bomba del muro húmedo.

### III.4.2 Descripción del coordinador de la red de monitoreo y control

La metodología propuesta para diseñar el coordinador de la red inalámbrica de sensores (WSN por sus siglas en inglés Wireless Sensor Network) se puede observar en la figura 22. Donde el núcleo encargado de administrar la red transmite de forma constante las direcciones para identificación de los nodos o módulos inalámbricos así como los comandos para la lectura de datos. Una vez que adquiere las muestras de todos los sensores, de los diferentes nodos de monitoreo, los almacena en RAM los transmite a una entidad que realiza un procesamiento en tiempo real para calcular las variables de interés que finalmente serán transmitidas a través de un módulo USB a una PC para sus despliegue en pantalla a través de una GUI y almacenamiento de datos.

El módulo de control recibirá las lecturas del bloque DSP y a través del coordinador enviara de forma remota las respectivas acciones de control sobre los módulos inalámbricos responsables de manipular los actuadores distribuidos en el invernadero.

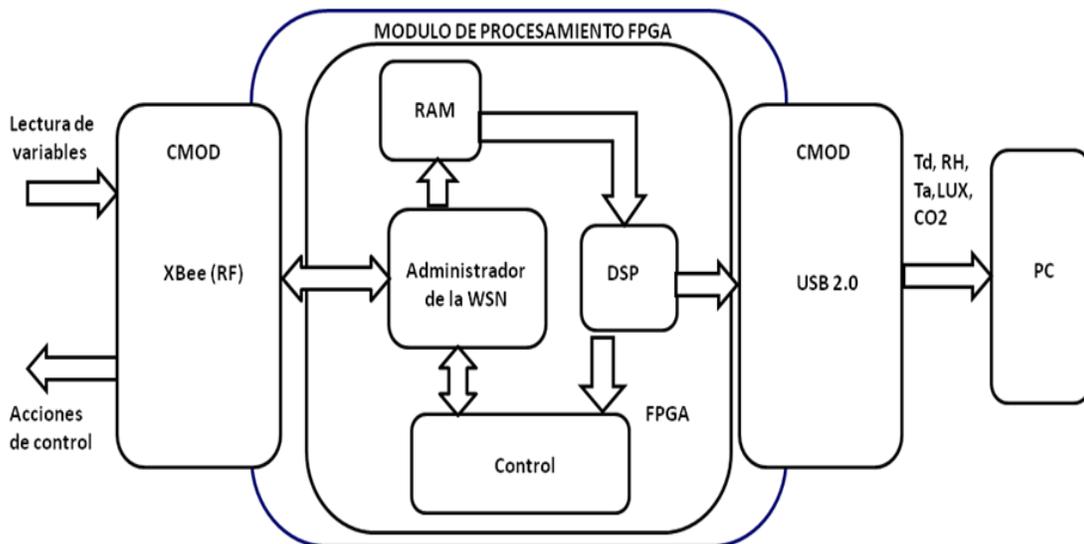


Fig. 19 Coordinador FPGA.

Se entiende entonces que el núcleo que administra la red, se encuentra solicitando constantemente datos de las terminales de monitoreo y mantiene ocupado el radio mientras lo hace, en el momento que una acción de control sea requerida, el FPGA gracias a su versatilidad es capaz de emplear otro radio para enviar acciones correctivas a las terminales remotas de control sin necesidad de detener el monitoreo de las variables de interés. Este paralelismo presenta muchas ventajas en este tipo de aplicación y lo hace superior contra otras plataformas de procesamiento (microcontroladores y DSP, los cuales normalmente cuentan con recursos, periféricos y módulos de comunicación limitados).

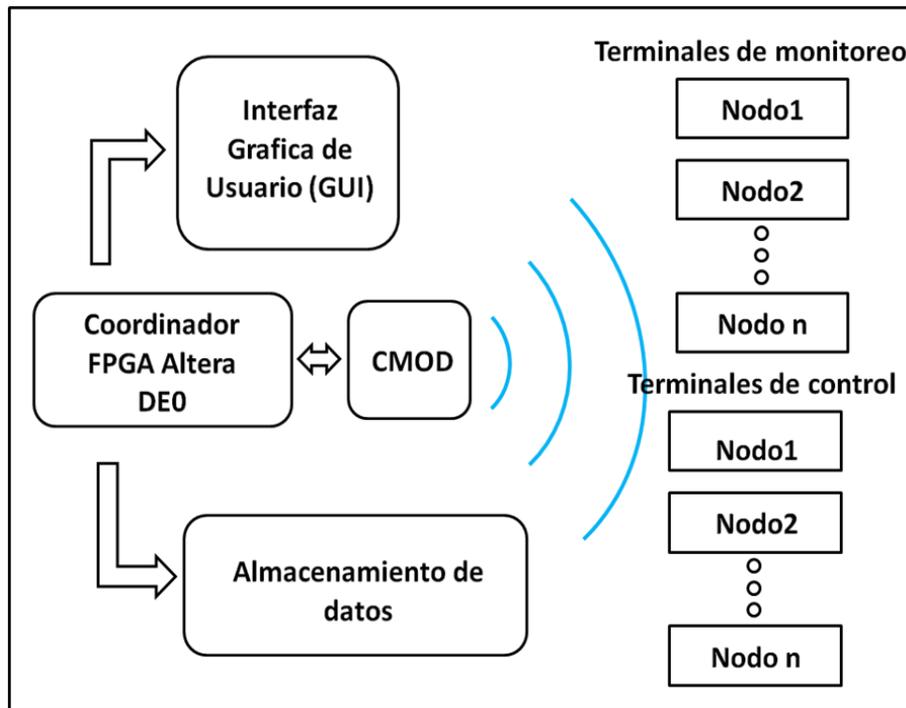


Fig. 20 Arquitectura de la WSN propuesta.

### **III.4.3 Almacenamiento de datos e interfaz grafica de usuario**

Como parte final del proceso, se desarrollo una interfaz grafica de usuario que permita visualizar las lecturas de los sensores en los diferentes nodos de monitoreo. Esta interfaz fue desarrollada con el software Builder C++, la cual básicamente es un programa que lanza una interrupción (hilo informático) para siempre estar esperando datos en el buffer de entrada y asignarlo a su respectiva tabla, a su vez los datos se están guardando en un archivo con extensión txt. La interfaz grafica, permite observar de forma simultánea las mediciones de las distintas variables en los diferentes nodos de monitoreo.

## **Resultados y Discusión**

### **IV.1 Resultados de mediciones de sensores primarios**

Contrario a lo que normalmente se considera un problema, la relación que existe entre temperatura y humedad puede ser favorable para cuestiones de control de acuerdo a la región geográfica, el uso de paneles evaporativos es una alternativa económica de incrementar la humedad en el invernadero reduciendo a la vez la temperatura. En la figuras 21 podemos observar mediciones de temperatura y humedad dentro y fuera del invernadero de las 7 horas a las 21 horas con un tiempo de muestreo de 10 segundos entre cada muestra. Se aprecia claramente la relación inversa que existe entre la humedad relativa y la temperatura, observamos además que la temperatura dentro del invernadero se mantiene por encima de la exterior casi todo el tiempo con diferencias positivas de hasta 5 grados. Mientras que la humedad relativa se mantiene por debajo de la exterior hasta en un 10%. Se observo en la práctica que el muro húmedo, incluso sin el uso de extractores altera positivamente las condiciones dentro del invernadero hasta una distancia del 30% de este último.

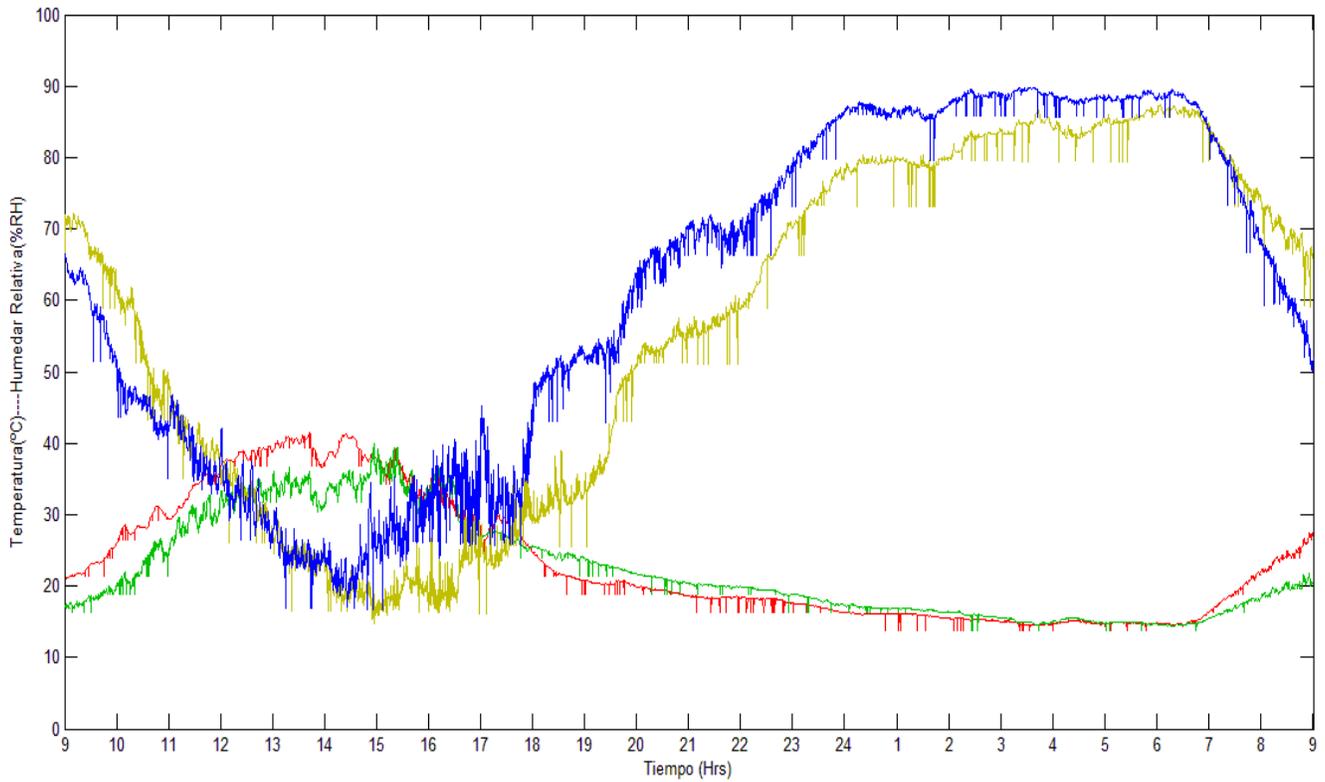


Fig. 21 Graficas de humedad y temperatura durante 24 hrs

Los nodos inalámbricos de monitoreo fueron colocados dentro del invernadero (ver figura 22) en un punto medio de este, mientras que el nodo encargado de monitorear el clima exterior se colocó a un lado de invernadero (figura 23). En condiciones de ruido ambiental y altas temperaturas, la comunicación se mantuvo estable hasta distancias de 40 metros.



Fig. 22 Unidad de monitoreo



Fig. 23 Unidad de referencia

## IV.2 Respuesta de la red inalámbrica de monitoreo

La modularización del sistema presenta diversas ventajas sobre el método de control, monitoreo y comunicación centralizado convencional. El uso de entidades remotas simplifica la administración del invernadero ya que cada módulo está programado para realizar una tarea en específico, las entidades de monitoreo están programadas para leer determinado número de sensores y transmitir las lecturas cuando el coordinador se las solicite. Dentro de los módulos se realizan los procesamientos necesarios para obtener resultados más exactos de las variables de interés así como los arreglos necesarios a dichos datos para poder transmitirlos a través de la red inalámbrica.

Cada módulo de control por su cuenta, está programado para operar y mantenerse operando según lo requiera el sistema. Por ejemplo, las terminales que controlan las ventanas del invernadero están programadas para subir y bajar las ventas por tiempos (calculado con anterioridad) así como para indicar al coordinador la posición de la misma, es por esto que el coordinador solo necesita enviar el comando de subir o bajar e inmediatamente puede ocupar la red en otras

actividades como monitoreo o control de otro actuador. Esta configuración reduce considerablemente la complejidad del sistema de control.

Con el uso de estos módulos obtenemos además la ventaja de poder prescindir de muchas líneas de red eléctrica que normalmente se emplean para alimentar los actuadores (ventiladores, bombas, motores, etc.). Por el contrario, se modifico la red eléctrica para que la misma línea eléctrica pudiera alimentar varios actuadores a través de los módulos de control de cada nodo, de esta manera a través de un encendido secuencial de los diferentes actuadores, podemos ahorrar gastos de instalación eléctrica a la vez que garantizamos la integridad de la misma.

### **IV.3 Resultados del sistema de automatización, control de actuadores y mecanismos del invernadero**

De las pruebas realizadas a las plataformas desarrolladas se puede concluir que se llego al diseño de tarjetas genéricas con alto grado de estandarización, los módulos de procesamiento (PMOD\_PIC) nos permiten emplear la mayoría de los recursos del microcontrolador según nuestra necesidad. Distribuyéndolos en el buses facilitando con ello el empleo de los diferentes protocolos de comunicación (UART, SPI, I2C), manejo de entradas y salidas analógicas o digitales.

La integración de sistemas supervisores (gestores de reset) garantizan la integridad del sistema al reiniciar los sistemas y asegurarse de su inicialización tras una falla de energía o inicio de operación. De forma análoga, este circuito de supervisión evita que el modulo opere de forma inapropiada debido a irregularidades en la alimentación (bajos voltajes, paros repentinos).

Se observo una transmisión de información integra a través de la red inalámbrica. Siguiendo todas las especificaciones del fabricante (valores de los desacoplos, consejos en el diseño del PCB, etc.) se pudieron alcanzar rangos de

operación de hasta 40 metros. A pesar de no ser un rango muy amplio (como los rangos que proporcionan las redes GPRS, Wi-Fi, Wi-Max, etc), es el suficiente para integrar el sistema en el invernadero.

Importante es resaltar que la incorporación de sensores digitales (*mems Microelectromechanical Systems*, SHT75) en las plataformas de instrumentación desarrolladas nos ahorro la necesidad de realizar sistemas de acondicionamiento de señal, acoplamiento y filtrado para los sensores de humedad y temperatura. Tras realizar diversas mediciones comprobamos que las medidas que arrojaban los diferentes mem's tenían una desviación mínima. Con ello obtuvimos medidas de alta resolución con sensores altamente calibrados y fiables.

Por otro lado, el diseño y desarrollo de las etapas de potencia que se elaboraron, reduce la necesidad de comprar costosos equipos (normalmente a base de relevadores) arrancadores, inversores de giro, etc. La propuesta de cambiar (en las aplicaciones que se pudiese) el uso de relevadores mecánicos por dispositivos de estado sólido nos presento ventajas tales como: velocidades más altas de conmutación, la posibilidad de controlar la cantidad de energía que se le suministra a los actuadores (a través de disparadores por ángulo de disparo) y principalmente, evitar que los relevadores se mantengan en conducción debido a que el mecanismo se quede pegado por sobre corriente o desgaste, recordemos que los motores y bombas que se emplean dentro del invernadero son de capacidades de uno y 1 y 1 ½ caballo de fuerza (HP) por lo que representa un riesgo que operen de forma inapropiada, en las figuras siguiente observamos los nodos que se distribuyeron en el invernadero para control de mecanismos.



Fig. 24 Nodo 1 de control de motores



Fig. 25 Nodo 2 de control de motores



Fig. 26 Nodo 3 de control de motores



Fig. 27 Nodo 4 de control de bombas

#### **IV.4 Conclusiones**

Las tendencias de control climático para invernadero dejan un marcado patrón. En un inicio, los sistemas de control se basaban en algoritmos sencillos donde solamente se encendían o apagaban los actuadores del invernadero. Con la evolución de los equipos de procesamiento como las computadoras, se fueron empleando sistemas cada vez más complejos que permitían avanzados algoritmos de control que manipulaban las variables dentro del invernadero con desviaciones mínimas. Comunicaciones y almacenamiento de datos también fueron fácilmente integrables a estos sistemas. En la actualidad, los controladores del microclima del invernadero basan su principio de operación más en las características de crecimiento de la planta, o como se comporta esta a lo largo del cultivo. Logrando con ello reducir costos de consumo energético a través de la aplicación del conocimiento empírico que el agricultor ha adquirido a través del tiempo.

Citado lo anterior, nos encontramos en la era de los sistemas expertos para control de clima. Donde es cada vez mas importante conocer cómo se desarrollan los procesos fisiológicos de las plantas para proporcionales las condiciones que realmente necesitan, cuando lo necesitan.

En este trabajo, la integración de comunicaciones inalámbricas nos permitió proponer una arquitectura diferente de control de invernaderos. Donde se reemplazo el centro principal de control, el cual realizaba mediciones de sensores, acciones de control y almacenamiento de datos en la misma entidad. Por un conjunto de dispositivos distribuidos por el invernadero donde cada uno estaba programado para realizar una tarea específica. Y donde todos responden a los comandos de un coordinador (FPGA) el cual es el encargado de medir y tomar las debidas acciones de control.

## Referencias Bibliograficas

Albright, L., K. Arvanitis and A. Drysdale. 2002. Environmental control for plants on earth and in space. *Control Systems Magazine, IEEE*, 21(5), 28–47.

Ali, I. and A. Abdalla. 1993. A microcomputer-based system for all-year-round temperature control in greenhouses in dry arid lands. *Computers and Electronics in Agriculture*, 8(3), 195–210.

Arvanitis, K., P. Paraskevopoulos, and A. Vernardos. 2000. Multirate adaptive temperature control of greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26(3), 303–320.

Baptista, F., B. Bailey, J. Meneses, and L. Navas. 2010. Greenhouses climate modelling. Tests, adaptation and validation of a dynamic climate model. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(2), 285–298.

Bennis, N., J. Duplaix, G. Enéa, M. Haloua, and H. Youlal. 2008. Greenhouse climate modeling and robust control. *Computers and electronics in agriculture*, 61(2), 96–107.

Blasco, X., M. Martínez, J. Herrero, C. Ramos, and J. Sanchis. 2007. Model-based predictive control of greenhouse climate for reducing energy and water consumption. *Computers and electronics in agriculture*, 55(1), 49–70.

Caponetto, R., L. Fortuna, G. Nunnari, L. Occhipinti, and M. Xibilia. 2002. Soft computing for greenhouse climate control. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, 8(6), 753–760.

Castañeda-Miranda, R., E. Ventura-Ramos, R.R. Peniche-Vera, G. Herrera-Ruiz. 2006. Fuzzy greenhouse climate control system based on a field programmable gate array. *Biosystems engineering*, 94(2), 165–177.

Chalabi, Z., B. Bailey, and D. Wilkinson. 1996. A real-time optimal control algorithm for greenhouse heating. *Computers and electronics in agriculture*, 15(1), 1–13.

Coelho, J., P. De Moura Oliveira, and J. Cunha. 2005. Greenhouse air temperature predictive control using the particle swarm optimisation algorithm. *Computers and electronics in agriculture*, 49(3), 330–344.

Davis, P. and A. Hooper. 2002. Improvement of greenhouse heating control. In *Control Theory and Applications, IEE Proceedings D*, volume 138, IET, 249–255.

De Baerdemaeker, J., A. Munack, H. Ramon, and H. Speckmann. 2002. Mechatronic systems, communication, and control in precision agriculture. *Control Systems Magazine, IEEE*, 21(5), 48–70.

- De Koning, A. 1990. Long-term temperature integration of tomato. Growth and development under alternating temperature regimes. *Scientia Horticulturae*, 45(1-2), 117–127.
- El Ghoumari, M., H. Tantau, and J. Serrano. 2005. Non-linear constrained MPC: Real-time implementation of greenhouse air temperature control. *Computers and electronics in agriculture*, 49(3), 345–356.
- Fan, X. and T. Zuo-Hua. 2006. Application of a Genetic Simulated Annealing Algorithm in the Greenhouse System. *Computer*, 12.
- Fang, L. and L. Zhen-Xiao. 2008: Research on the Control Mode of Agriculture Greenhouse Control System in China. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 10, 223–226.
- Fourati, F. and M. Chtourou. 2007: A greenhouse control with feed-forward and recurrent neural networks. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(8), 1016–1028.
- Gauthier, L., D. de Halleux, A. Boisvert, M. Trigui, and A. Zehrouni. 1995. A Control Strategy for the Operation of a Reversible Heat-pump in Greenhouses. *Applied Engineering in Agriculture*, 11(6), 873–879.
- Gauthier, L. and R. Guay. 1990. An object-oriented design for a greenhouse climate control system. *Transactions of the ASAE*, 33(3), 999–1004.
- Goggos, V. and R. King. 2000. Qualitative-evolutionary design of greenhouse environment control agents. *Computers and electronics in Agriculture*, 26(3), 271–282.
- Gutman, P., P. Lindberg, I. Ioslovich, and I. Seginer. 1993. A non-linear optimal greenhouse control problem solved by linear programming. *Journal of agricultural engineering research*, 55(4), 335–351.
- Guzmán-Cruz, R., R. Castañeda-Miranda, J. García-Escalante, I. López-Cruz, A. Lara-Herrera, and J. De La Rosa. 2009. Calibration of a greenhouse climate model using evolutionary algorithms. *Biosystems Engineering*, 104(1), 135–142.
- Hamrita, T., J. Durrence, and G. Vellidis. 2009. Precision farming practices. *Industry Applications Magazine, IEEE*, 15(2), 34–42.
- Hashimoto, Y., H. Murase, T. Morimoto, and T. Torii. 2002. Intelligent systems for agriculture in Japan. *Control Systems Magazine, IEEE*, 21(5), 71–85.
- Hooper, A. 1988. Computer control of the environment in greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 3(1), 11–27.

- Hooper, A. and P. Davis. 1988. An algorithm for temperature compensation in a heated greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2(4), 251–262.
- Hurd, R. and C. Graves., 1983. The influence of different temperature patterns having the same integral on the earliness and yield of tomatoes. In III International Symposium on Energy in Protected Cultivation 148, ISHS, 547–554.
- Ibrahim, I. and C. Sørensen. 2010. A more energy efficient controller for the greenhouses climate control system. *Applied Engineering in Agriculture*, 25(3), 491–498.
- Ioslovich, I., P. Gutman, and R. Linker. 2009. Hamilton-Jacobi-Bellman formalism for optimal climate control of greenhouse crop. *Automatica*, 45(5), 1227–1231.
- Ioslovich, I., P. Gutman, and I. Seginer. 1996: A non-linear optimal greenhouse control problem with heating and ventilation. *Optimal Control Applications and Methods*, 17(3), 157–169.
- Jacobson, B., P. Jones, J. Jones, and J. Paramore. 1989. Real-time greenhouse monitoring and control with an expert system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 3(4), 273–285.
- Körner, O. and H. Challa. 2003a. Design for an improved temperature integration concept in greenhouse cultivation. *Computers and electronics in agriculture*, 39(1), 39–59.
- Körner, O. and H. Challa. 2003b. Process-based humidity control regime for greenhouse crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 39(3), 173–192.
- Körner, O. and G. Van Straten. 2008. Decision support for dynamic greenhouse climate control strategies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 60(1), 18–30.
- Kurata, K. and N. Eguchi. 1990. Machine learning of fuzzy rules for crop management in protected cultivation. *Transactions of the ASAE*, 33(4), 1360–1368.
- Langhans, R., M. Wolfe, and L. Albright. 1980. Use of average night temperatures for plant growth for potential energy savings. In *Symposium on More Profitable Use of Energy in Protected Cultivation* 115, ISHS, 31–38.
- Linker, R., P. Gutman, and I. Seginer. 2000. Robust model-based failure detection and identification in greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26(3), 255–270.
- Linker, R., I. Seginer, and P. Gutman. 1998. Optimal CO<sub>2</sub> control in a greenhouse modeled with neural networks. *Computers and electronics in agriculture*, 19(3), 289–310.

- Millan-Almaraz, J.R., R. Romero-Troncoso, R. Guevara-Gonzalez, L. contreras-medina, R. Carrillo-Serrano, R. Osornio-Rios, C. Duarte-Galvan, M. Rios-Alcaraz, and I. Torres-Pacheco. 2010. FPGA-based Fused Smart Sensor for Real-Time Plant-Transpiration Dynamic Estimation. *Sensors*, 10(9), 8316–8331.
- Miller, W., L. Albright, and R. Langhans. 1985. Plant growth under averaged day/night temperatures. In *Symposium Greenhouse Climate and its Control* 174, ISHS, 313–320.
- Nielsen, O. 1995. Climate computer algorithms for peak shaving of greenhouse heating demand. *Computers and electronics in agriculture*, 13(4), 315–335.
- Pasgianos, G., K. Arvanitis, P. Polycarpou, and N. Sigrimis. 2003. A nonlinear feedback technique for greenhouse environmental control. *Computers and electronics in agriculture*, 40(1-3), 153–177.
- Pinon, S., E. Camacho, B. Kuchen, and M. Peña. 2005. Constrained predictive control of a greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture*, 49(3), 317–329.
- Proctor, F. and J. Weir., *Electricity in Horticulture.* In *Proceedings of IEE*, volume 120.
- Seginer, I. 1997. Some artificial neural network applications to greenhouse environmental control. *Computers and Electronics in Agriculture*, 18(2-3), 167–186.
- Seginer, I., Y. Hwang, T. Boulard, and J. Jones. 1996. Mimicking and expert greenhouse grower with a neural-net policy. *Transactions of the ASAE*, 39(1), 299–306.
- Seginer, I. and R. McClendon. 1992. Methods for optimal control of the greenhouse environment. *Transactions of the ASAE (USA)*.
- Setiawan, A., L. Albright, and R. Phelan. 2000. Application of pseudo-derivative-feedback algorithm in greenhouse air temperature control. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26(3), 283–302.
- Sigrimis, N., A. Anastasiou, and N. Rerras. 2000. Energy saving in greenhouses using temperature integration: A simulation survey. *Computers and electronics in agriculture*, 26(3), 321–341.
- Sigrimis, N., P. Antsaklis, and P. Groumpos. 2002. Advances in control of agriculture and the environment. *Control Systems Magazine, IEEE*, 21(5), 8–12.
- Sigrimis Robert, E. 2000. Advances in greenhouse environment control. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26(3), 217–219.

Trabelsi, A., F. Lafont, M. Kamoun, and G. Enea. 2007. Fuzzy identification of a greenhouse. *Applied Soft Computing*, 7(3), 1092–1101.

Van Straten, G., H. Challa, and F. Buwalda. 2000. Towards user accepted optimal control of greenhouse climate. *Computers and electronics in agriculture*, 26(3), 221–238.

Vazquez-Cruz, M., I. Torres-Pacheco, R. Miranda-Lopez, O. Cornejo-Perez, A. Roque, R. Osornio-Ríos, and R. Guevara-Gonzalez. 2010. Potential of mathematical modeling in fruit quality. *African Journal of Biotechnology*, 9(3), 260–267.

# Apéndice

## Figura A.1 Modulo de procesamiento basado en microcontrolador

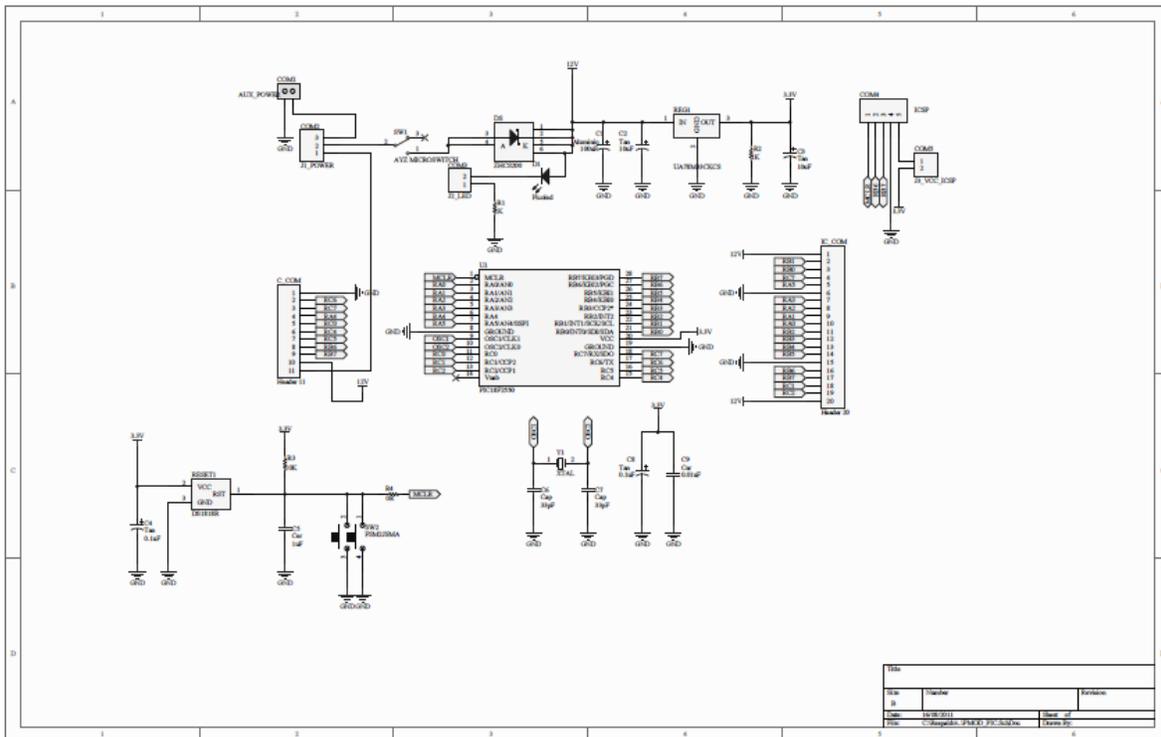
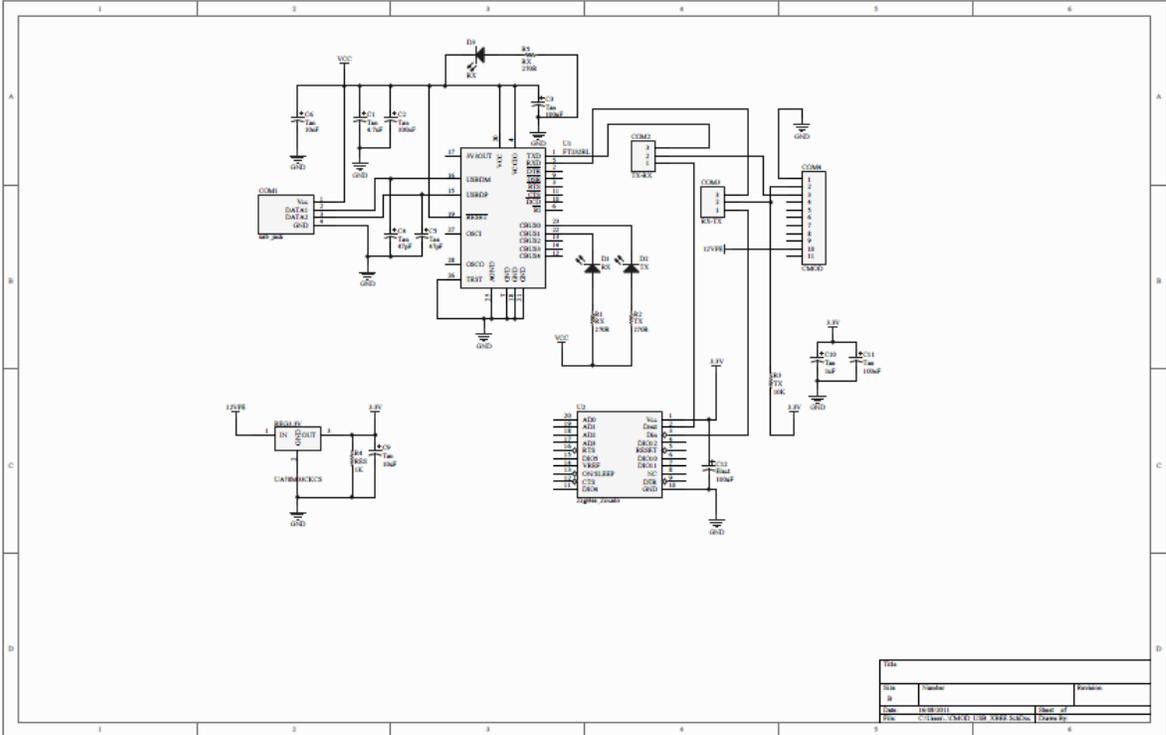
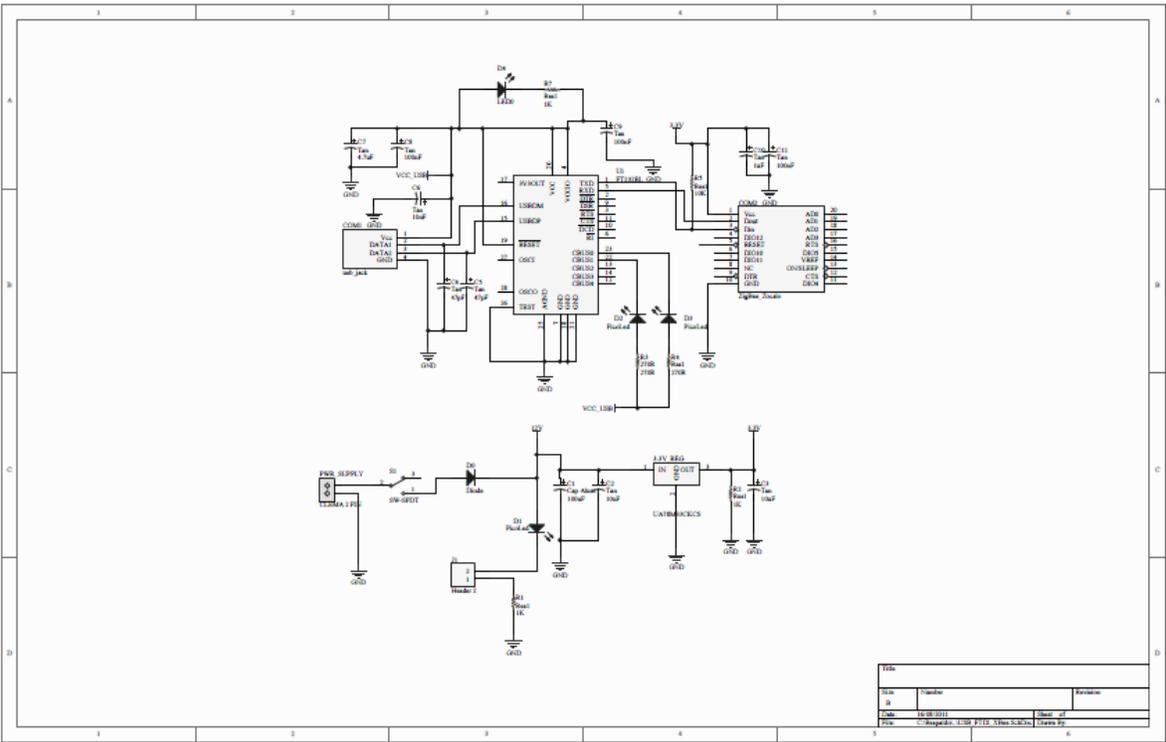


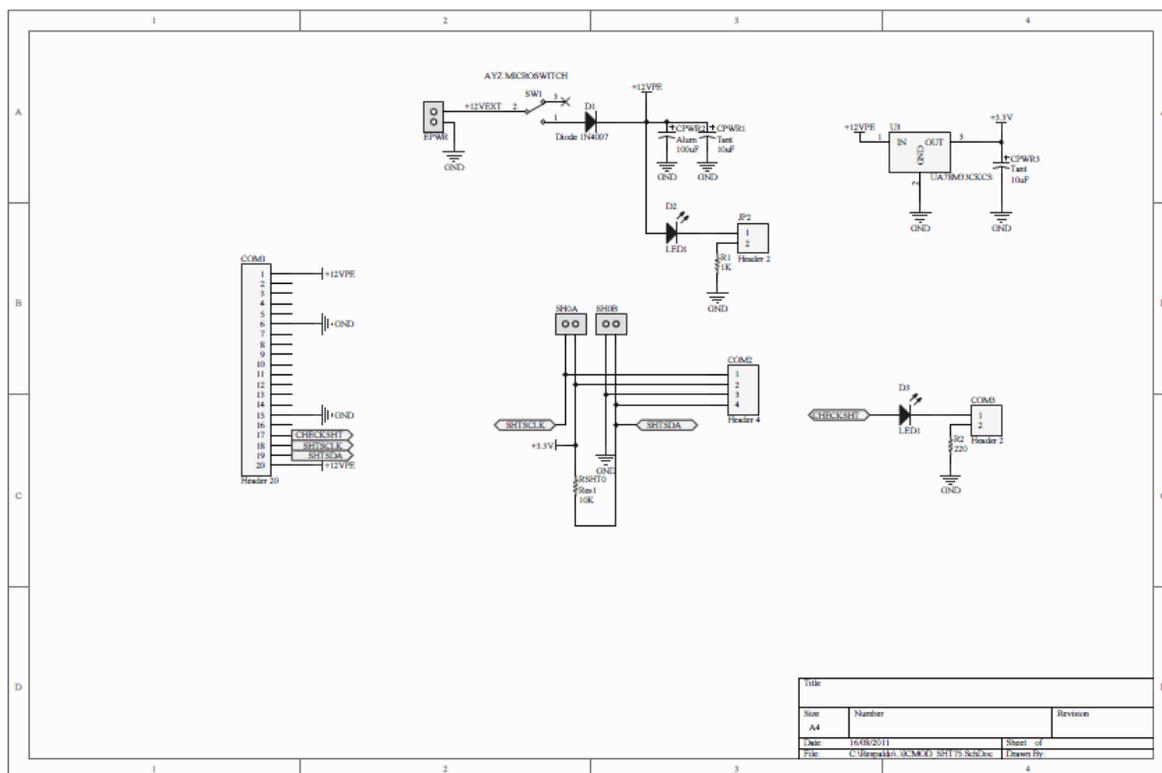
Figura A.2 Modulo de comunicación inalámbrica ZigBee y USB 2.0.



**Figura A.3 Programador USB de módulos de radiofrecuencia MaxStream-Digi International.**



**Figura A.4 Modulo de instrumentación para sensores digitales de humedad relativa y temperatura Sensirion SHT75**



## Cuadro A.5 Código del nodo de monitoreo

```
#include<18f2550.h>#device *=16 #include<string.h>
#fuses XT,NOPROTECT,WDT
#use delay(clock=4000000)
#use rs232(rcv=PIN_C7,xmit=PIN_C6,baud=9600,bits=8,parity=N)

#define clock    PIN_C1    //(pin de reloj)
#define data     PIN_C2    //(pin de datos)
#define check    PIN_B7    //Indicador de encendido del MEM
////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////FUNCIONES////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////inicializacion////////////////////////////////////////////////////////////////
void comstart (void)
{
    output_float(data); //"data high" Sets the specified pin to the input mode.
                        //This will allow the pin to float high to represent a high on an
                        //open collector type of connection.
    output_bit(clock, 0); //"clk low" Outputs the specified value (0 or 1) to the
                        //specified I/O pin.
    delay_us(1);
    output_bit(clock, 1); //clk high
    delay_us(1);
    output_bit(data, 0); //data low
    delay_us(1);
    output_bit(clock, 0); //clk low
    delay_us(2);
```

```

output_bit(clock, 1); //clk high
delay_us(1);
output_float(data); //data high
delay_us(1);
output_bit(clock, 0); //clk low
}
//////////Funcion para resetear la comunicacion con el SHT75//////////
void comreset (void)
{
int8 i;
output_float(data); //data high
output_bit(clock, 0); //clk low
delay_us(2);
for(i=0; i<9; i++)
{
output_bit(clock, 1); //toggle clk 9 times
delay_us(2);
output_bit(clock, 0);
delay_us(2);
}
comstart();
}
//////////Funcion desconocida//////////
int1 comwrite (int8 iobyte)
{
int8 i, mask = 0x80; // 1000 0000
int1 ack;

```

```

delay_us(4);
for(i=0; i<8; i++)
{
    output_bit(clock, 0);           //clk low
    if((iobyte & mask) > 0)
    {
        output_float(data); //data high if MSB high
    }

    else
    {
        output_bit(data, 0);       //data low if MSB low
    }

    delay_us(1);
    output_bit(clock, 1);          //clk high
    delay_us(1);
    mask = mask >> 1;             //shift to next bit
}

```

```

//Shift in ack
output_bit(clock, 0); //clk low
delay_us(1);
ack = input(data); //get ack bit
output_bit(clock, 1); //clk high

```

```

delay_us(1);
output_bit(clock, 0); //clk low
return(ack);
}
////////////////////////////////////////Funcion para leer mem SHT75////////////////////////////////////////
int16 comread (void)
{
int8 i;
int16 iobyte = 0;
const int16 mask0 = 0x0000;          //const:  BYTE CONST TABLE [10]=
{9,8,7,6,5,4,3,2,1,0};
const int16 mask1 = 0x0001;        // sirve para establecer parametros en la ROM
del pic, en este caso int16 por los bits

//shift in MSB data
for(i=0; i<8; i++)
{
iobyte = iobyte << 1;
output_bit(clock, 1);          //clk high
delay_us(1);

if (input(data))
{
iobyte |= mask1; //shift in data bit  iobyte = iobyte | mask1
}

else

```

```

    {
        iobyte |= mask0;    //iobyte = iobyte | mask0;
    }

    output_bit(clock, 0);    //clk low
    delay_us(1);
}

//send ack 0 bit
output_bit(data, 0); //data low
delay_us(1);
output_bit(clock, 1); //clk high
delay_us(2);
output_bit(clock, 0); //clk low
delay_us(1);

output_float(data); //data high    //Aqui no debe de importar si lo ponemos en alto
o bajo, pq pasa a control del mem

//shift in LSB data
for(i=0; i<8; i++)
{
    iobyte = iobyte << 1;
    output_bit(clock, 1);    //clk high
    delay_us(1);

    if (input(data))
    {

```

```

    iobyte |= mask1; //shift in data bit
}

else
{
    iobyte |= mask0;
}

output_bit(clock, 0);          //clk low
delay_us(1);
}

//send ack 1 bit
output_float(data); //data high
delay_us(1);
output_bit(clock, 1); //clk high
delay_us(2);
output_bit(clock, 0); //clk low

return(iobyte);
}

////////////////////////////////////////Funcion para esperar la lectura del SHT75////////////////////////////////////////

void comwait (void)
{
    int16 sht_delay;

```

```

output_float(data);          //data high
output_bit(clock, 0);        //clk low
delay_us(1);
for(sht_delay=0; sht_delay<30000; sht_delay++) // wait for max 300ms
{
    if (!input(data)) break;    //if sht_data_pin low, SHT75 ready
    delay_us(10);
}
}

```

////////////////////////////////Function to soft reset SHT75////////////////////////////////

```

void sht_soft_reset (void)
{
    comreset();    //SHT75 communication reset
    comwrite(0x1e); //send SHT75 reset command
    delay_ms(15); //pause 15 ms
}

```

////////////////////////////////Funcion paramedir temperatura del SHT75////////////////////////////////

```

int16 measuretemp (void)
{
    int1 ack;
    int16 iobyte;

```

```

comstart();          //alert SHT75

ack = comwrite(0x03); //send measure temp command and read ack status  000'
00011

if(ack == 1) return;

comwait();          //wait for SHT75 measurement to complete

iobyte = comread(); //read SHT75 temp data

return(iobyte);

}

```

////////////////////////////////////Funcion para medir humedad del SHT75////////////////////////////////////

```

int16 measurehumid (void)
{
int1 ack;

int16 iobyte;

comstart();          //alerta al SHT75

ack = comwrite(0x05); //send measure RH command and read ack status  000
00101

if(ack == 1) return; //Inicia nuevamente la función

comwait();          //wait for SHT75 measurement to complete

iobyte = comread(); //read SHT75 temp data

return(iobyte);

}

```

```
//////////Funcion para medir y calcular temperatura y humedad del SHT75//////////
```

```
int16 sht_temp (void)
```

```
{
```

```
int16 restemp;
```

```
restemp = measuretemp(); //measure temp
```

```
return (restemp);
```

```
}
```

```
int16 sht_hum (void)
```

```
{
```

```
int16 reshum;
```

```
reshum = measurehumid(); //measure temp
```

```
return (reshum);
```

```
}
```

```
//////////Funcion para inicializar el SHT75 a encendido//////////
```

```
void sht_init (void)
```

```
{
```

```
comreset(); //resetea al mem
```

```
delay_ms(20); //retraso del encendido
```

```
}
```

```
////////////////////////////////////
```

```
//////////////////////////////////PROGRAMA PRINCIPAL//////////////////////////////////
```

```
////////////////////////////////////
```

```

void main()
{

int1 flag1, flag2;
//float restemp, truehumid;
int8 IP,command;
int16 temperatura, humedad, Temp, RH;
int8 TMSB=0xFF, TLSB=0xFF,HMSB=0xFF, HLSB=0xFF;
//int8 a=0x11, b=0x22, c=0x33, d=0x44;

set_tris_a(0b11111111);
set_tris_b(0b00000000);
set_tris_c(0b10111000);

// printf("Nodo1 listo\n");

while (true)
{

flag1 = 0;
flag2 = 0;
output_bit(check,0);

while(flag1 == 0)
{

if(kbhit()&&(flag2==0))//preguntando si hay dato en el buffer

```

```

{
    IP=getc();//obteniendo el dato o IP de a que nodo se dirige la orden
    flag2=1;
}

```

if((kbhit() && (flag2==1)) && (IP==0x01)) //preguntando si hay dato en el buffer, el estado de la bandera y su el IP es el indicado

```

{
    command=getc();

    if(command==0xf1)
    {
        /*sht_init();
        output_bit(check,1);
        sht_rd (restemp, truehumid);
        printf("Temp : %3.1f ", restemp);
        printf("RH  : %3.1f ", truehumid);
        printf("\n");
        delay_ms(500);      //delay 500 ms between reading to prevent self
heating of sensor
        flag1 = 1;*/

        sht_init();
        output_bit(check,1);

        ////////////operaciones binarias para descomponer int16 en dos
int8//////////

        temperatura = sht_temp ();
        Temp = temperatura;

```

```

    TLSB = temperatura;
    temperatura = (temperatura >> 8);
    TMSB = temperatura;

    //////////////////////////////////operaciones para descomponer humedad////////////////////////////////////
    humedad = sht_hum();
    RH = humedad;
    HLSB = humedad;
    humedad = humedad >> 8;
    HMSB = humedad;

    // /*

    //Tramision de la temperatura en dos bytes
    printf("%c",TMSB);
    delay_ms(20);
    printf("%c",TLSB);
    delay_ms(20);

    //Transmision de la humedad en dos bytes
    printf("%c",HMSB);
    delay_ms(20);
    printf("%c",HLSB);

    // */

    /*

```

```
    printf("%c",a);
    delay_ms(20);
    printf("%c",b);
    delay_ms(20);
    printf("%c",c);
    delay_ms(20);
    printf("%c",d);
    delay_ms(20);

    */
    //delay_ms(500);
    flag1 = 1;

    }
}

if(IP != 0x01)
{
    flag2 = 0;
}

}
}
}
```

## Cuadro A.6 Código del nodo de control de motores

```
#include<18f2550.h>

#device *=16 //numero de bits a utilizar por los apuntadores

#include<string.h>

#fuses XT,NOPROTECT,NOWDT

#use delay(clock=4000000)

#use rs232(rcv=PIN_C7,xmit=PIN_C6,baud=9600,bits=8,parity=N)

////////////////////////////////////

////////////////////////////////////PROGRAMA PRINCIPAL////////////////////////////////////

////////////////////////////////////

void main()

{

    int1 flag1, flag2;

    int8 IP,command;

    set_tris_a(0b11111111);

    set_tris_b(0b00000000);

    set_tris_c(0b10111000);

    output_low(PIN_B0);

    output_low(PIN_B6);
```

```

//printf("Nodo4 listo\n");

while (true)
{
    flag1 = 0;

    flag2 = 0;

    while(flag1 == 0)
    {

        if(kbhit() && (flag2==0))//preguntando si hay dato en el buffer
        {
            IP=getc();//obteniendo el dato o IP de a que nodo se dirige la orden

            flag2=1;
        }

        if((kbhit() && (flag2==1)) && (IP==0x04)) //preguntando si hay dato en el
buffer, el estado de la bandera y su el IP es el indicado
        {
            // a minuscula 97

            command=getc();

            if(command==0xf1) // a minuscula
            {

```

```
output_low(PIN_B0);  
output_high(PIN_B6);  
delay_ms(30000);  
flag1 = 1;  
}
```

```
if(command==0xf2) //c minuscula  
{  
output_high(PIN_B0);  
output_low (PIN_B6);  
  
delay_ms(30000);  
flag1 = 1;  
}
```

```
}
```

```
if(IP != 0x04)  
{  
flag2 = 0;  
}
```

```
output_low(PIN_B0);
```

```
output_low(PIN_B6);
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```

## Cuadro A.7 Código del nodo de control de bombas hidráulicas

```
#include<18f2550.h>

#device *=16 //numero de bits a utilizar por los apuntadores

#include<string.h>

#fuses XT,NOPROTECT,WDT

#use delay(clock=4000000)

#use rs232(rcv=PIN_C7,xmit=PIN_C6,baud=9600,bits=8,parity=N)

////////////////////////////////////////////////////////////////

////////////////////////////////////////////////////////////////PROGRAMA PRINCIPAL////////////////////////////////////////////////////////////////

////////////////////////////////////////////////////////////////

void main()

{

    int1 flag1,flag2;

    int8 IP,command;

    set_tris_a(0b11111111);

    set_tris_b(0b00000000);

    set_tris_c(0b10111000);

    output_low(PIN_B0);
```

```

output_low(PIN_B1);

//printf("Nodo3 listo\n");

while (true)

{

    flag1 = 0;

    flag2 = 0;

    while(flag1 == 0)

    {

        if(kbhit() && (flag2==0))//preguntando si hay dato en el buffer

        {

            IP=getc();//obteniendo el dato o IP de a que nodo se dirige la orden

            flag2=1;

        }

        if((kbhit() && (flag2==1)) && (IP==0x03)) //preguntando si hay dato en el
buffer, el estado de la bandera y su el IP es el indicado

        {

            // a minuscula 97

            command=getc();

            if(command==0xf1) // Encender bomba

            {

```

```
    output_high(PIN_B0);  
    output_high(PIN_B1);  
    flag1 = 1;  
}
```

```
if(command==0xf2) //Apagar bomba  
{  
    output_low(PIN_B0);  
    output_low(PIN_B1);  
    flag1 = 1;  
}
```

```
}
```

```
if(IP != 0x03)
```

```
{
```

```
    flag2 = 0;
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```