



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

**Sistema basado en arquitectura híbrida FPGA- $\mu$ C para la medición remota de variables fisiológicas en plantas**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

**Maestría en Ciencias en Instrumentación y Control Automático**

**Presenta:**

Ing. Carlos de Jesús González Osuna

**Dirigido por:**

Dr. Luis Miguel Contreras Medina

Dr. Luis Miguel Contreras Medina  
 Presidente

Dr. Irineo Torres Pacheco  
 Secretario

Dr. Ramón Gerardo Guevara González  
 Vocal

Dr. Jesús Roberto Millán Almaraz  
 Suplente

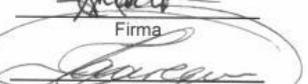
Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa  
 Suplente

  
 Nombre y Firma  
 Dr. Aurelio Domínguez González  
 Director de la Facultad

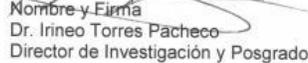
  
 Firma

  
 Firma

  
 Firma

  
 Firma

  
 Firma

  
 Nombre y Firma  
 Dr. Irineo Torres Pacheco  
 Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
 Querétaro, Qro.  
 Marzo 2013  
 México

**Sistema basado en arquitectura híbrida  
FPGA- $\mu$ C para la medición remota de  
variables fisiológicas en plantas**

por Ing. Carlos de Jesús González Osuna

## Resumen

El trabajo presentado en ésta tesis describe el desarrollo de un dispositivo capaz de estimar transpiración remotamente; este nace de la deficiencia de la tecnología aplicada en la agricultura para tener una visión integrada en el campo de cultivo, ya sea para el monitoreo del comportamiento de la planta en base a la transpiración realizada, o bien para la automatización de un invernadero. El proyecto presentado cuenta de 2 partes principales, la primera es encargada de la comunicación para la lectura de los sensores primarios (temperatura y humedad relativa), empaquetar las mediciones y mandarlas inalámbricamente hasta un servidor, los sensores primarios utilizados son SHT75 y SHT21, ambos capaces de medir temperatura y humedad con una precisión de  $\pm 1.8\%$  y  $\pm 2.0\%$  de humedad relativa y por la temperatura  $\pm 0.4$  °C y  $\pm 0.3$  °C, respectivamente, el dispositivo que se encarga de realizar las tareas de la primera parte es un Smartfusion que incorpora un FPGA, un microcontrolador y un arreglo análogo programable en campo, la segunda parte principal se encuentra en un servidor que en base a programas realizados en Java los cuales tienen la tarea de obtener los datos enviados inalámbricamente del sensor realizado, convertir los datos, almacena en una base de datos, en base a la ecuación estimar la transpiración y crear una página de internet con una gráfica que la transpiración de la planta a lo largo del experimento, la página de internet también tiene la posibilidad de descargar en un archivo de texto (.txt) que contiene las mediciones almacenadas en la base de datos para un análisis posterior.

**Palabras clave:** FPGA, Microcontrolador, Java, Servidores Web, monitoreo de variables fisiológicas en plantas.

## SUMMARY

The work presented in this thesis describes the development of a device capable to estimate plant transpiration remotely; this stems from the deficiency of technology applied in the agriculture for have an integrated vision in the growing field, either for monitoring the behavior of transpiration-plant or greenhouse automation. The project have two principal aspects, the first is in charge of the lectures from primaries sensors (temperature and relative humidity), measurements packet and send it wirelessly to the server, the primaries sensors are SHT75 and SHT21, both capable to measure for accuracy of  $\pm 1.8\%$  and  $\pm 2.0\%$  of relative humidity and  $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$  and  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$  of temperature, respectively, the device in charge id a SmartFusion which incorporate a FPGA, a microcontroller and a field programmable analogic array, the second main aspect is in a server, that based on Java programs have the task of get the measurements sent wirelessly, convert the measures, estimate the transpiration, added into a data base and run a Web page with a graphic of the plant transpiration, also the Web page offer the possibility of download the measures in the data base in a text file for further analysis.

**Key words:** FPGA, Microcoontrollers, Java, Web Servers, plant monitoring.

## **DEDICATORIAS**

Agradezco a mis padres por ser unos de pilares en mi formación, por su apoyo incondicional y por siempre estar ahí cuando más lo he necesitado.

Agradezco a todos los buenos compañeros que he hecho durante el desarrollo de esta tesis, dentro y fuera de la escuela.

Agradezco a Ana Laura Guerrero Vargas por ser un gran apoyo, su amor, su comprensión y paciencia a lo largo del tiempo que hemos compartido juntos.

Agradezco a mi asesor Dr. Luis Miguel Contreras Medina, que con sus comentarios acertados me ha hecho crecer en los ámbitos personales y profesionales. Así como por su paciencia al momento de tratar conmigo.

Agradezco a la Universidad por permitirme seguir con mi desarrollo profesional y personal.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado durante mis estudios de maestría (Núm. de beca: 387128).

A la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) por permitirme realizar mis estudios en de posgrado en esta institución.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1. Justificación .....	3
I.2. Planteamiento del problema .....	5
I.3. Hipótesis y objetivos .....	7
I.3.1 Hipótesis .....	7
I.3.2 Objetivo general .....	7
I.3.3 Objetivos específicos .....	7
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	9
II.1. Fitomonitoreo .....	9
II.2. Topología de red.....	9
II.3. Tecnología de red inalámbrica.....	13
II.4. Servidores.....	15
III. METODOLOGÍA.....	17
III.1. Medición de transpiración en plantas.....	17
III.2. ZigBee .....	20
III.3. Sensores.....	24
III.4. FPGA- $\mu$ C .....	27
III.4.1 FPGA .....	27
III.4.2 Microcontrolador.....	28
III.4.3 FPGA- $\mu$ C.....	29
III.5. Diagrama general .....	30
III.6. Sensor inteligente .....	32
III.6.1 FPGA- $\mu$ C.....	32
III.6.2 Microcontrolador.....	34

III.6.3 FPGA .....	36
III.6.4 Puesta de experimento .....	36
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
IV.1. Obtención de datos y filtrado .....	38
IV.2. Compensación en la medición .....	40
IV.3. Transpiración.....	40
IV.4. Presentación de la transpiración por internet .....	41
IV.5. Comparación entre dos variedades de frijol .....	42
IV.6. Comparación entre el prototipo realizado y Li-Cor (LI 6400XT) .....	43
V. CONCLUSIONES.....	44
VI. BIBLIOGRAFÍA .....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Topología punto-a-punto. ....	10
Figura 2. Topología tipo Bus. ....	10
Figura 3. Topología Estrella. ....	11
Figura 4. Topología Anillo.....	11
Figura 5. Topología tipo malla: a) completamente conectada y b) parcialmente conectada.....	12
Figura 6. Topología tipo árbol.....	12
Figura 7. Topología tipo híbrida.....	13
Figura 8. Topología cadena margarita. ....	13
Figura 9. Corte de hoja, esquema de agua mostrando flujos de CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> O.....	19
Figura 10. Diagrama a bloques de SmartFusion .....	30
Figura 11. Diagrama general.....	31
Figura 12. Dirección de los bloques en APB3 .....	33
Figura 13. Diagrama global del encapsulado. ....	34
Figura 14. Comparación entre medidor de transpiración (CI-340) y prototipo desarrollado.....	37
Figura 15. Humedad relativa y temperatura obtenidas contra humedad relativa y temperatura filtradas. ....	39
Figura 16. Humedad relativa y temperatura obtenidas de ambos sensores vs Humedad relativa y temperatura filtradas de ambos sensores. ....	39
Figura 17. Transpiración de una planta de frijol resistente a estrés hídrico. ....	41
Figura 18. Página de internet presentando la transpiración de la planta.....	42
Figura 19. Comparación entre la transpiración de una planta joven y una planta vieja de frijol. ....	43

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación entre tecnologías de comunicación.....	14
Tabla 2. Comparación entre unidad de proceso, transceptor y sensores utilizados. .....	22
Tabla 3. Comparación de sensores y topologías utilizados en la investigación. ...	23
Tabla 4. SHT21. Humedad Relativa.....	24
Tabla 5. SHT21 Temperatura.....	25
Tabla 6. SHT75 Temperatura.....	26
Tabla 7. SHT75 Humedad Relativa.....	26
Tabla 8. Nombre y breve descripción de las señales del bus APB3 .....	32

# I. INTRODUCCIÓN

Una red de sensores inalámbricos (WSN) consiste en la utilización de nodos completamente autónomos que pueden recoger, procesar información, y comunicarse entre sí. Una WSN, permite recolectar información de todos los sensores disponibles al mismo tiempo; con esto se puede tener un monitoreo amplio de las variables de interés. En el caso de monitoreo de variables fisiológicas de las plantas, acorta el tiempo que se requiere para medir dichas variables debido a que permite un funcionamiento en paralelo de todos los sensores. Se dice que una WSN es robusta cuando tiene una capacidad considerable para el tratamiento de la información como es la aplicación de filtros, cálculos estadísticos, entre otros. Y se le atribuye que es eficiente cuando presenta capacidad para disponer de la información.

Los FPGAs (Field Programmable Gate Arrays) son de arquitectura abierta, lo cual permite que todo el desarrollo que se haga en ellos pertenezca a quien lo desarrolló, pero esto requiere de inversión de tiempo de diseño. Cuando el tiempo en que se requiere el producto terminado es corto se mezclan tecnologías como la incorporación de microcontroladores, estos últimos realizan tareas genéricas como las comunicaciones entre dispositivos dado que cuentan con los periféricos con protocolos estándar. El FPGA posee una gran capacidad de cómputo; lo cual lo hace adecuado para aplicaciones donde el procesamiento complejo es requerido. Esto hace posible implementar metodologías de procesamiento digital de señales, las cuales permiten robustecer las mediciones tomadas por los sensores; además, debido a su naturaleza de ejecución recurrente, permite implementar cálculos en paralelo reduciendo considerablemente los tiempos de procesamiento, a tal grado de realizar mediciones robustas en tiempo real, así como transferencia de información.

Los periféricos que usan los microcontroladores permiten la adaptación de dispositivos externos (como pantallas, módulos de comunicación, almacenamiento de información, etc.) para satisfacer diferentes necesidades y/o dar mayor alcance

al proyecto; en el caso de una WSN, permite reducir el tiempo de recolección de datos puesto que esta se realiza de manera inalámbrica, concentrando la información en un solo punto, para su posterior análisis o direccionamiento a otra parte como son: base de datos, centro de control y toma de decisiones, servidor, entre otros. Los microcontroladores permiten hacer eficiente las mediciones utilizando los módulos de comunicación embebidos, lo cual, como se mencionó anteriormente, reduce el tiempo de desarrollo y permite a otros dispositivos, tal como el FPGA, realizar los procesamientos complejos. Dado a que, en una WSN para aplicaciones de agricultura se requiere procesamiento complejo de los datos obtenidos y necesita ser eficiente, se utiliza un FPGA para robustecer las mediciones a través del procesamiento de los datos, y un microcontrolador para hacer el sistema eficiente, utilizando sus módulos de comunicación embebidos. Por tal motivo la incorporación de las plataformas FPGA-Microcontrolador resultan adecuadas para este tipo de aplicaciones.

De acuerdo a la literatura, las funciones fisiológicas son las tareas especializadas que realiza cada organismo para un proceso en concreto, tales como la fotosíntesis, transpiración, entre otras, en el caso de las plantas. La transpiración en las plantas es considerada una de las funciones fisiológicas más importantes porque constituye la evolución de las plantas para la adaptación al cambio de humedad en una atmósfera, con una atmósfera seca se puede deshidratar y eventualmente morir. Para su estimación se usan las mediciones de variables dinámicas como la conductancia estomática, déficit de presión de vapor y diferencia de temperatura entre el ambiente y la hoja. Dichas variables se pueden estimar por sensores primarios (humedad relativa, temperatura, radiación, presión atmosférica, flujo de aire volumétrico). La medición de estas variables se hace aislando la hoja, por donde se hace pasar una corriente de aire, y así se extrae información de los sensores primarios y se realiza el cálculo usando técnicas de procesamiento de señales como: filtro de promedio de decimación, filtro de respuesta al impulso infinito y las ecuaciones correspondientes para las variables dinámicas.

El frijol es una leguminosa originaria de América y su utilización en el consumo humano data de la época prehispánica hace más de 5000 años. En la actualidad el frijol, tiene una importancia fundamental en la dieta alimenticia de la población mexicana como resultado de su alto contenido de proteínas, almidones y grasas; además, es un cultivo que no puede sustituirse por el consumo de algún otro. Otro factor importante del frijol en México es que es uno de los países que más lo produce ocupando el sexto lugar, sin embargo su rendimiento se sitúa por debajo del promedio, siendo la sequía una de los mayores reductores de rendimiento. La sequía es un factor de estrés, ante esto la planta presenta mecanismos o adaptaciones para tolerarlo, los cuales se ven reflejados en las principales funciones fisiológicas. Estas se usan para describir el comportamiento de la planta, lo cual es llamado comúnmente caracterización fisiológica.

Como se mencionó anteriormente, para la estimación de funciones fisiológicas de manera inalámbrica se hace uso de sensores primarios, los cuales requieren procesamiento complejo para robustecer sus mediciones, por este motivo es deseable el uso de FPGAs; por otro lado, se sustentó que la incorporación de Microcontroladores hace que el sistema sea eficiente utilizando los recursos embebidos para comunicación externa. Por tales motivos, resulta adecuado el uso de una WSN utilizando plataformas FPGA y FPGA-microcontrolador para la caracterización y el monitoreo de variables fisiológicas en plantas.

## **I.1. Justificación**

Existen diferentes métodos para la caracterización fisiológica de las plantas, pero la gran mayoría de estas se realizan en laboratorios, los cuales además de requerir herramientas bastante especializadas de alto costo, también requieren de gente capacitada, los cuales representan desventajas.

Hoy en día existen dispositivos que dejan de lado la necesidad de tener que extraer la planta y llevarla al laboratorio para un posterior análisis que pueda

dar información acerca de las variables fisiológicas de interés, tales como fotosíntesis y transpiración; sin embargo, estos dispositivos presentan dos problemas: uno es el que tener que llevar el dispositivo que se encarga de la medición de las variables necesarias de planta en planta lo cual hace que resulte tedioso y que tome mucho tiempo; esto conlleva a problemas como: no tener una visión integrada del cultivo a nivel planta, puesto que solamente se cuenta con mediciones de variables del entorno. Debido a esto, es recomendable el uso de WSN para el monitoreo de variables fisiológicas en un campo de cultivo.

Hoy en día, existen WSNs aplicadas a la agricultura, una desventaja es que estas se limitan a medir variables del entorno; es decir, no son capaces de monitorear las variables fisiológicas de las plantas. Por este motivo no existe una visión integrada acerca de las variables fisiológicas de los campos de cultivo, la cual permitiría conocer con precisión el comportamiento de variedades vegetales a ciertas condiciones de estrés y por tanto ayudaría a caracterizar y desarrollar variedades más resistentes. En consecuencia, es deseable contar WSNs para aplicaciones en agricultura que cuenten con capacidades de fitomonitorio (monitoreo de variables fisiológicas), que sea capaz de realizar procesamiento complejo y paralelo, así como manejar eficientemente los datos obtenidos, por ejemplo comunicación de nodo a nodo, o de coordinador a base de datos o dispositivos de almacenamiento. Para esto se recomienda el uso de plataformas FPGA y FPGA-Microcontrolador.

El estrés hídrico es un factor que limita bastante el rendimiento de frijol a nivel nacional, dado que, en zonas donde se presenta este tipo de estrés, la producción puede bajar diez veces comparada con regiones donde la planta no presenta este tipo de problemas; lo cual empuja a desarrollar variedades de frijol capaces de resistir el estrés sin comprometer el rendimiento. Por lo tanto el conocer el comportamiento de las variables fisiológicas de las plantas bajo estrés hídrico, utilizando monitoreo inalámbrico en tiempo real, ayudaría a conocer el impacto que tiene la sequía en dichas funciones y por lo tanto a desarrollar nuevas

variedades más resistentes. Además ayudaría a describir fisiológicamente las nuevas variedades generadas tal y como se requiere en el proceso de patentado.

## **I.2. Planteamiento del problema**

En la actualidad no existen dispositivos capaces de describir el comportamiento de variables fisiológicas fundamentales en la planta en tiempo real, es decir no se tiene una visión integrada dentro del campo de cultivo en forma inmediata. Si bien existen dispositivos portátiles que hacen mediciones, aún no se llega a tener el dispositivo funcionando en forma prolongada en el campo. Debido a esto, se hace evidente una demanda de tecnología en el campo de la agricultura con sensores capaces de estar monitoreando el área de interés, así como la implementación de una WSN para comunicación y flujo de información entre los sensores.

Las WSN tienen un enfoque hacia las áreas de domótica, inmótica, industrial, entre otras; dejando muy rezagado el sector de la agricultura, la cual resulta adecuada para la aplicación de este tipo de tecnología. Esto se puede observar en las deficiencias que se tienen de control y monitoreo de variables en invernaderos y a cielo abierto; donde solo se mide de una manera muy general y en un solo punto, atacando el problema superficialmente, lo cual provoca mediciones erróneas y acciones de control poco eficientes, dado a la poca información del entorno y de la planta.

La agricultura juega un papel crucial en la economía de los países y brinda la principal fuente de alimentos, ingresos y empleo a sus poblaciones rurales. La realización de mejoras en agricultura y uso de tierras es fundamental para alcanzar la seguridad alimentaria, la reducción de la pobreza y un desarrollo integral sostenible (RDFS, 2011). En México, la agricultura se realiza en cuatro millones de unidades productivas que ocupan 21 millones de hectáreas aproximadamente. Del total de las unidades productivas, sólo 240 mil (6%) son altamente eficientes y rentables, y se dedican en su mayoría a la producción de

hortalizas, frutales y cultivos orgánicos, principalmente para los mercados internacionales; 18% están en transición, hacia una alta productividad y competitividad, dedicadas sobre todo a cultivos básicos; y un amplio sector, con más de tres millones de unidades, producen principalmente maíz y frijol para autoconsumo; de esta superficie, la que se dedica a la agricultura se divide en dos: la agricultura de temporal, la cual se realiza en 14 millones de hectáreas, mientras que la riego cuenta con 6.4 millones de hectáreas, sin embargo, ésta última representa más del 45% del valor de la producción agrícola (INIFAP, 2011).

El frijol es un cultivo de importancia social a nivel nacional por formar parte básica de la alimentación del pueblo mexicano, y porque un gran número de productores dedicados al cultivo lo producen para autoconsumo (INIFAP, 2004) encontrándose en el 11vo lugar en ingesta de frijol por habitante, con un consumo de 12.3 Kg/año (SAGARPA, 2011). México ocupa el 4to lugar en superficie cosechada de frijol, el 6to lugar en volumen de producción y el puesto 98 en rendimiento de frijol, con un rendimiento de 0.67 ton/ha el cual está por debajo de la media mundial.

La sequía es el factor más limitante en la producción de frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) en México. Acosta-Díaz et al. (2007) corroboró que las características fisiológicas y fenológicas relacionadas con la adaptación a la sequía, afecta el rendimiento en el cultivo de frijol. La producción de frijol en México tiende a estancarse en alrededor de 1.2 millones de toneladas anuales, aunque con fuertes fluctuaciones. Para explicar esto, se han formulado diferentes hipótesis, tales como: a) los bajos rendimientos se deben a una lenta incorporación de innovaciones tecnológicas que impacten en la rentabilidad y sostenibilidad; b) los siniestros ocurren principalmente en aquellas zonas donde se localiza el frijol de temporal; y c) la desventaja de la producción en el mercado, desalientan la asignación de más recursos-superficie en primer término (Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 2010).

Debido a que el rendimiento del frijol es bajo para condiciones de temporal, los investigadores han hecho énfasis en la formación de variedades de

frijol con resistencia a sequía, de alta capacidad de rendimiento de ciclo intermedio a precoz, con alto grado de tolerancia a plagas y enfermedades, y adaptadas a las condiciones climatológicas (INIFAP, 2010). Pero este se ve obstaculizado dado que no existen dispositivos capaces de tener una visión integrada del cultivo para monitoreo de variables fisiológicas.

Por lo descrito anteriormente, se hace evidente la demanda de sensores capaces de tener una visión integrada del campo de cultivo, el procesamiento de los datos obtenidos para darle robustez y la concentración de los datos en un punto para poder hacer posible la caracterización fisiológica.

### **I.3. Hipótesis y objetivos**

#### **I.3.1 Hipótesis**

Mediante el monitoreo inalámbrico de variables fisiológicas utilizando plataformas FPGA y FPGA-Microcontrolador es posible obtener mediciones precisas, confiables, asequibles y en tiempo real del área monitoreada para la caracterización fisiológica de plantas.

#### **I.3.2 Objetivo general**

Desarrollar una red inalámbrica para fitomonitorio utilizando sensores inteligentes para la caracterización de plantas de frijol sometidas a estrés hídrico.

#### **I.3.3 Objetivos específicos**

- Implementación de una red de sensores inalámbricos tipo estrella.
- Obtener información de los sensores conectados en cada nodo y mandarlo de manera inalámbrica a una base de datos.
- Creación de un administrador de información capaz de guardar las mediciones de cada sensor en una base de datos, obtenidas de manera

remota; así como crear una página de internet graficando el cambio de estas variables a lo largo del tiempo.

- Caracterización fisiológica de al menos una variedad de frijol resistente a estrés hídrico y si comparación con plantas sin estrés.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### II.1. Fitomonitorio

El fitomonitorio incorpora técnicas de medición, muestreo, protocolos de medición, interpretación de los datos de aplicaciones específicas. Este tipo de técnicas están consideradas en la llamada “agricultura de precisión”.

Esta instrumentación está dedicada al monitoreo y comportamiento de variables fisiológicas de la planta. Como se ha mencionado existen diferentes tipos de variables fisiológicas a medir en las plantas: sin embargo, hay algunas variables que por su misma complejidad no pueden ser medidas directamente a través de la instrumentación electrónica, como la fotosíntesis y la transpiración, pero se pueden estimar en base a otras variables con las que si se encuentra instrumentación para su medición como, temperatura en hoja y ambiente, humedad relativa, radiación (Millán-Almaraz et al, 2009). Este tipo de mediciones normalmente se hacen manuales debido a la naturaleza de las mismas, es decir se tiene el equipo que presenta cierta robustez para de esta manera ir de planta en planta haciendo la medición de estas variables, dichos equipos, dedicados a la estimación de variables como fotosíntesis y transpiración usan, principalmente, el principio de intercambio de gases como método de estimación (Millán-Almaraz et al., 2009; SolFranc Tecnologías S.L, 2008; CID Inc., 2008; PP System, 2008; Labotec, 2011).

### II.2. Topología de red

Existen diferentes topologías que definen como se conectan cada uno de los dispositivos que componen una red, existen ocho topologías de red básicas, las cuales son:

**Punto-a-punto:** es la topología más simple, la cual consta de dos componentes que mantienen comunicación únicamente entre ellos dos.

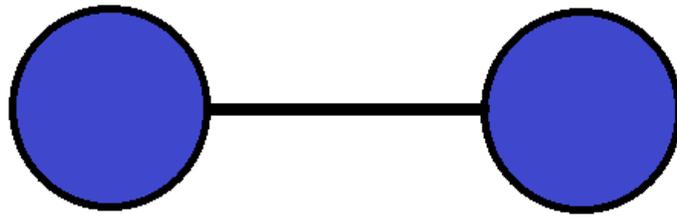


Figura 1. Topología punto-a-punto.

**Bus:** todos están conectados por el mismo medio, el cual es bidireccional, cada uno puede comunicarse con el resto.

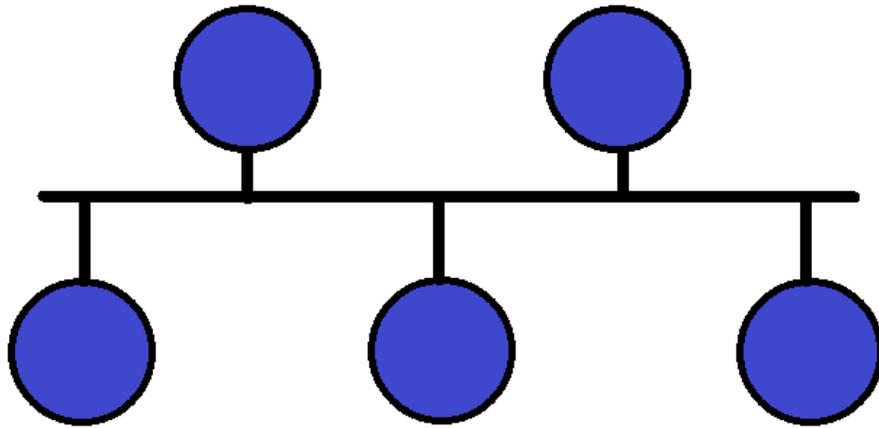


Figura 2. Topología tipo Bus.

**Estrella:** Cada dispositivo está conectado solamente a un coordinador central por medio de una conexión punto-a-punto; cabe mencionar que los dispositivos no están conectados entre sí.

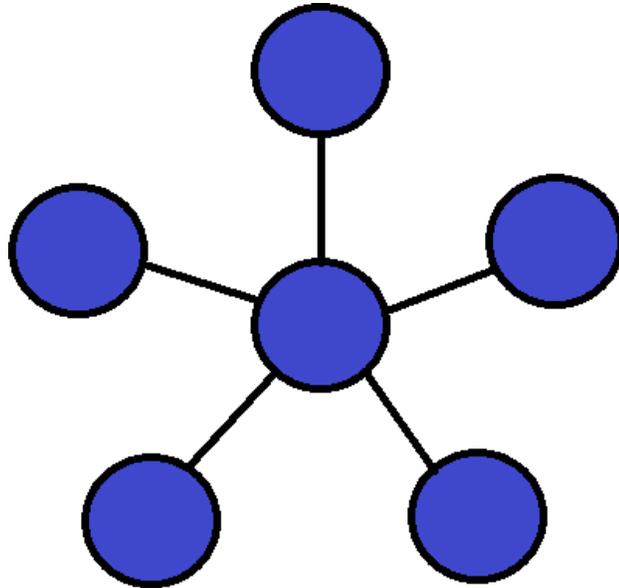


Figura 3. Topología Estrella.

**Anillo:** En esta topología todos los componentes conectados están en forma de círculo y la información viaja en un solo sentido.

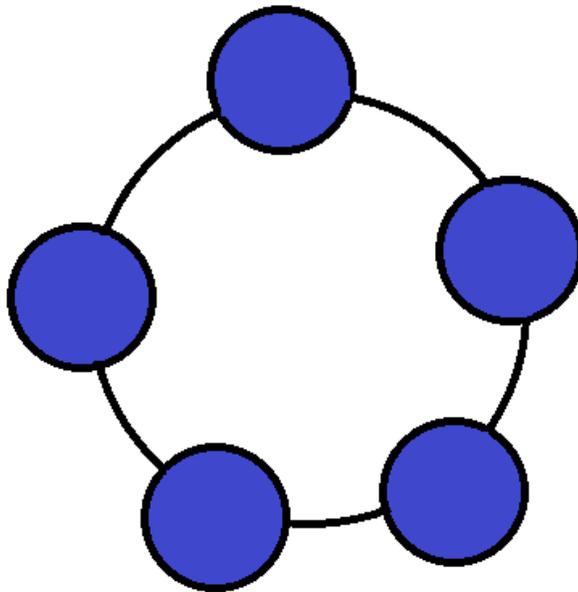


Figura 4. Topología Anillo.

**Malla:** Esta topología se puede dividir en dos totalmente conectada y parcialmente conectada, totalmente conectada que es cuando cada uno de los

los nodos están conectados con el resto de los nodos de la red y la parcialmente conectada es cuando casi todos los nodos están conectados entre sí.

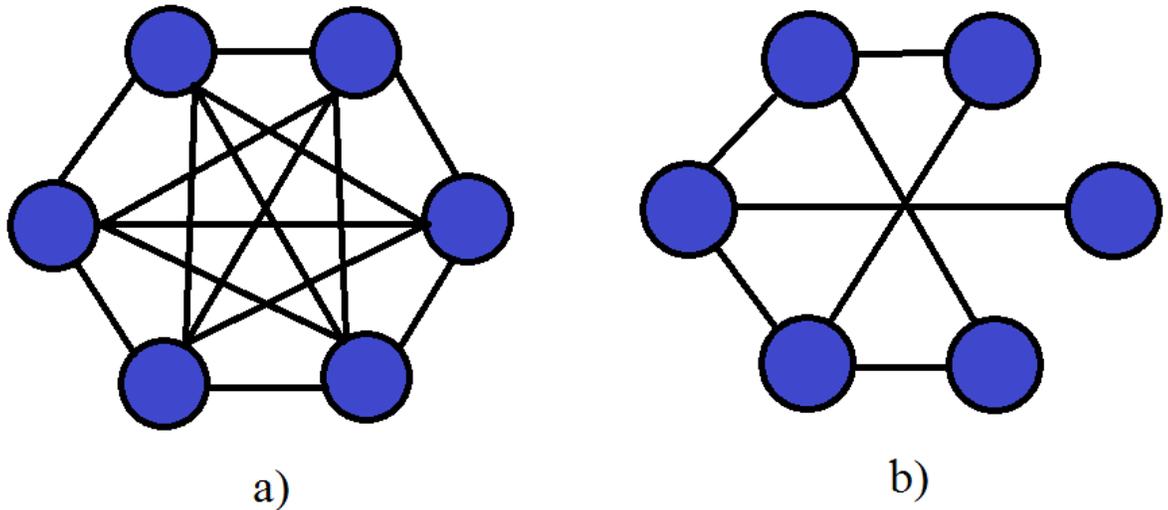


Figura 5. Topología tipo malla: a) completamente conectada y b) parcialmente conectada.

**Árbol:** Se le llama topología tipo árbol cuando un coordinador maestro tiene más de una estructura conectada a él, a través de topología punto a punto.

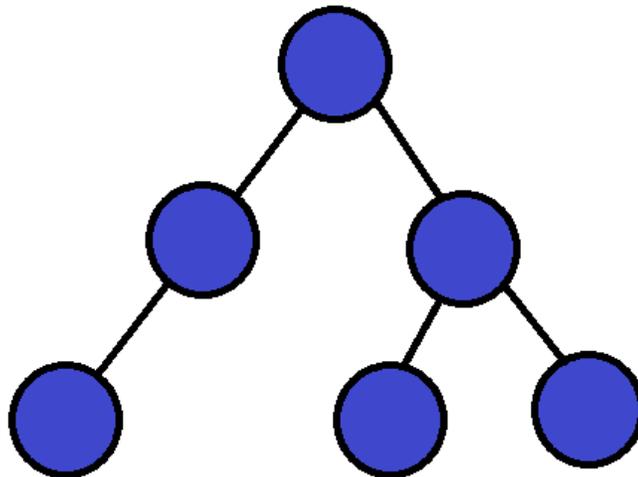


Figura 6. Topología tipo árbol.

**Híbrido:** Es la combinación de dos o más topologías en la cual el resultado no sea una topología antes mencionada.

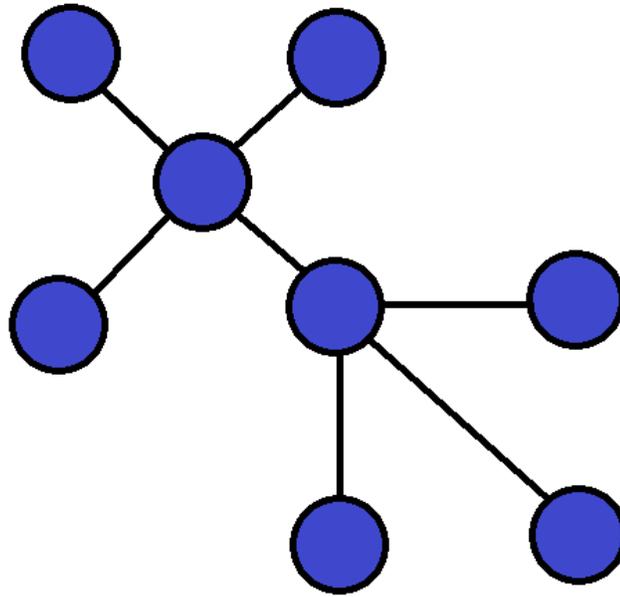


Figura 7. Topología tipo híbrida.

**Cadena margarita o lineal:** Esta se forma conectando varios dispositivos en línea, es decir de un dispositivo A a uno B, de un B a uno C y así sucesivamente; sin que el último dispositivo se conecte al primero.

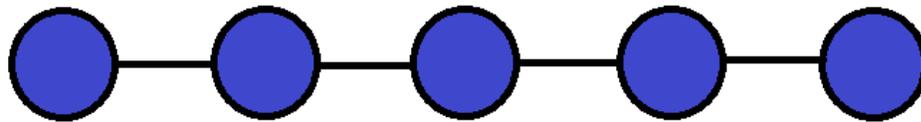


Figura 8. Topología cadena margarita.

### II.3. Tecnología de red inalámbrica

En la Tabla 1 se muestra una comparación entre las diferentes tecnologías de comunicación inalámbrica para ser implementada en la WSN, como se puede deducir la tecnología ZigBee es la que resulta la opción más viable dado que tiene un buen alcance a pesar de tener bajo consumo y bajo costo; su velocidad de transferencia de datos es la más baja de las 4 opciones pero en este caso no es necesario tener una tasa de transferencia alta. Lo dicho anteriormente empata con lo afirmado por Garcia-Sanchez (2011), el cual menciona que el estándar ZigBee

se ha convertido en un estándar de facto para las tecnologías comerciales de redes de sensores inalámbricas.

Tabla 1. Comparación entre tecnologías de comunicación.

	XBee	Bluetooth	Wibree	Wi-Fi
<b>Banda de frecuencia</b>	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
<b>Rango</b>	30 m – 1.6 km	9.2 m – 92 m	Hasta 3 m	30 m – 46 m
<b>Velocidad de datos</b>	250 kbps	1 Mbps	1 Mbps	11 – 54Mbps
<b>Consumo</b>	Bajo	Medio	Bajo	Alto
<b>Costo</b>	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo

ZigBee es un estándar de comunicaciones inalámbricas diseñado por la ZigBee Alliance. No es una tecnología, sino un conjunto estandarizado de soluciones que pueden ser implementadas por cualquier fabricante. ZigBee está basado en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (wireless personal area network, WPAN) y tiene como objetivo las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías, cuya finalidad es habilitar redes inalámbricas con capacidades de control y monitoreo que sean confiables, de bajo consumo energético y de bajo costo, que funcionen vía radio y de modo bidireccional; todo basado en un estándar público global que permita a cualquier fabricante crear productos que sean compatibles entre ellos (Baronti, 2007).

Las redes ZigBee se componen de varios dispositivos: coordinador, router y dispositivo final. Los coordinadores controlan la formación y seguridad de la red, los routers extienden el rango de las redes. Los dispositivos finales realizan un censado específico o acciones de control (ZigBee, 2011).

Se pueden utilizar varias topologías de red para coordinar el gateway WSN, nodos finales u otros ruteadores. Los nodos ruteadores son similares a los

nodos finales, en los que se puede adquirir datos censados, pero también pueden ser utilizados para pasar los datos medidos desde otros nodos. La principal y más básica, es la topología en estrella, en la cual cada nodo mantiene una sola trayectoria de comunicación directa con el gateway. Esta topología es simple pero restringe la distancia total que su red puede alcanzar.

Para aumentar la distancia que una red puede cubrir, se puede implementar una topología de cluster o árbol. En esta arquitectura más compleja, cada nodo mantiene una sola trayectoria de comunicación directa al gateway pero se pueden usar otros nodos para enrutar sus datos a esa trayectoria. Esta topología tiene un problema, si el nodo ruteador falla, todos los nodos que dependen de ese ruteador también pierden sus trayectorias de comunicación con el gateway.

La topología de red de malla soluciona este problema al usar trayectorias de comunicación redundante para aumentar la fiabilidad del sistema. En una red de malla, los nodos mantienen múltiples trayectorias de comunicación al gateway, así, si el nodo ruteador falla, la red automáticamente enruta los datos a través de una trayectoria diferente. La topología de malla, aunque es muy confiable, sufre de incremento de latencia de red ya que los datos deben hacer múltiples saltos antes de llegar al gateway (National Instruments, 2011).

## **II.4. Servidores**

En informática, un servidor es una computadora que forma parte de una red y provee servicios a otras computadoras denominadas clientes. Por lo tanto existen diferentes tipos de servidores denominados por el servicio que proveen, por ejemplo:

- Servidor de impresoras: controla una o más impresoras y acepta trabajos de impresión de otros clientes de la red.
- Servidor de correo: almacena, envía, recibe, enruta y realiza otras operaciones relacionadas con email para los clientes de la red.

- Servidor web: almacena documentos HTML, imágenes, archivos de texto, escrituras, y demás material Web compuesto por datos (conocidos colectivamente como contenido), y distribuye este contenido a clientes que la piden en la red.
- Servidor de base de datos: provee servicios de base de datos a otros programas u otras computadoras, como es definido por el modelo cliente-servidor. También puede hacer referencia a aquellas computadoras (servidores) dedicadas a ejecutar esos programas, prestando el servicio.
- Servidor de Seguridad: tiene software especializado para detener intrusiones maliciosas, normalmente tienen antivirus, antispyware, además de contar con cortafuegos redundantes de diversos niveles y/o capas para evitar ataques, los servidores de seguridad varían dependiendo de su utilización e importancia.

## III. METODOLOGÍA

### III.1. Medición de transpiración en plantas

El cálculo de la transpiración y conductancia estomática se basan principalmente en las mediciones del intercambio de vapor de agua. Este método consiste en temporalmente en aislar una muestra de hoja de la planta en una cámara miniatura de intercambio de gases que son usadas comúnmente en la medición de fotosíntesis (Millán-Almaraz *et al.*, 2009). Posteriormente, un flujo de aire es introducido dentro de la cámara para medir la presión de vapor de aire entrante y la cantidad saliente de vapor de la hoja. La cantidad absoluta de agua es calculada utilizando sensores de humedad relativa (*HR*) y ecuaciones de curvas de vapor de los diagramas de Mollier, expresando la transpiración y conductancia estomática como masa de vapor por unidad de superficie por unidad de tiempo (Schmidt, 2005). Los sistemas de monitoreo convencionales emplean esta técnica para obtener la transpiración y conductancia estomática a partir de la humedad relativa del aire y la temperatura foliar (Daletown, 2009; CID, 2008).

Mediciones de temperatura, radiación, carbono y humedad relativa contienen información importante sobre la dinámica de fotosíntesis y transpiración, por lo tanto es deseable la medición de estas variables de respuestas para las aplicaciones de agricultura de precisión. Anteriormente los sensores de temperatura foliar y la humedad relativa han sido utilizados en sistemas de adquisición de datos para monitoreo ambiental y en controladores climáticos para invernaderos. Aplicaciones más avanzadas incluyen detección fuera de línea de estrés hídrico en plantas basado en el análisis del comportamiento de la transpiración de los cultivos, en investigación forestal también se ha utilizado la dinámica de transpiración para estudiar los árboles, y en irrigación inteligente se ha investigado para generar itinerarios de riego en respuesta a las necesidades de las plantas, tomando en cuenta a la planta como usuario final de una línea de irrigación, activando el riego cuando la planta presenta transpiración excesiva, ésta técnica ha recibido el nombre de fitomonitorio (Ton, 2004). El déficit de presión de vapor ha sido estudiado en invernaderos para determinar cuando la

humedad relativa está cerca del punto de condensación con el objetivo de controlar los humidificadores en el invernadero y evitar con ello enfermedades en las plantas. Sin embargo, los sistemas no son capaces de tomar decisiones en tiempo real, esto hace que los datos tengan que ser descargados y analizados fuera de línea, dicho proceso puede tomar tiempo suficiente para la pérdida total de la cosecha. Esto hace necesario el desarrollo de sensores de transpiración inteligentes para monitoreo en tiempo real (Millán-Almaraz et al., 2010; Millán-Almaraz et al., 2009).

En la Figura 9, se muestra el esquema con un corte de una hoja de planta donde se pueden notar los diferentes tejidos de la planta, que tiene un bajo contenido de dióxido de carbono y una gran concentración de agua. El ambiente, se presenta como una nube gris que constituye un entorno relativamente seco que puede llegar a deshidratar o incluso matar a la planta si las condiciones no son adecuadas. Las estomas de las células de guardia que son de color naranja, son el sistema que controla el proceso para abrir o cerrar las estomas para balancear los flujos de dióxido de carbono y agua entre la planta y el ambiente. Aquí el  $r_b$  es la resistencia límite y el  $r_s$  es la resistencia estomática.

La transpiración ( $E$ ) es el proceso que depende principalmente de la diferencia entre la presión de vapor del aire de entrada  $e_i$  y la cantidad de vapor del aire de salida  $e_o$ . Sin embargo, los sensores de humedad primarios proveen valores relativos de humedad y necesitan ser convertidos en  $e_i$  y  $e_o$ . Primero, es necesario determinar  $e_s$  con el fin de conocer la cantidad máxima de humedad en el aire que el aire puede contener a la temperatura ambiente  $T_a$  usando las curvas de vapor en los diagramas termodinámicos de Mollier o mediante el uso de la ecuación (1). Luego  $e_i$  y  $e_o$  pueden ser fácilmente obtenidas por (2) y (3), donde  $RH_i$  es la humedad relativa del aire de entrada y  $RH_o$  la humedad relativa del aire de salida.

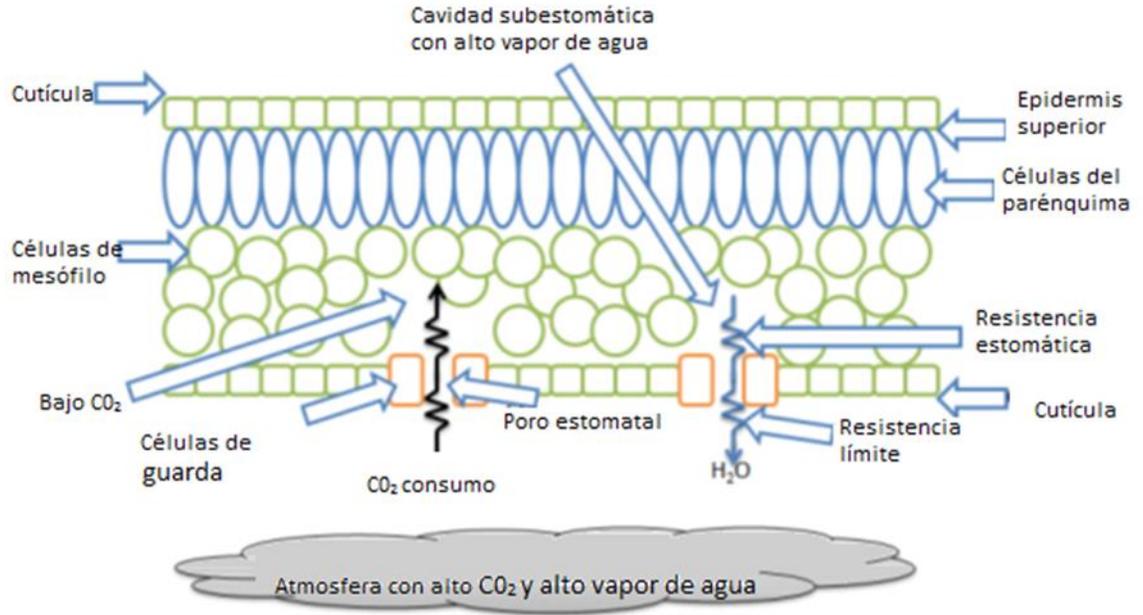


Figura 9. Corte de hoja, esquema de agua mostrando flujos de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$

$$e_s = 6.13753 \times 10^{-3} \exp \left( T_a \frac{18.564 - \frac{T_a}{254.4}}{T_a + 255.57} \right) \quad (1)$$

$$e_i = \frac{(RH_i)(e_s)}{100} \quad (2)$$

$$e_o = \frac{(RH_o)(e_s)}{100} \quad (3)$$

Donde  $e_s$  es la saturación de presión de vapor.

Para la estimación de  $E$ , es necesario estimar otro factor importante,  $W$ , que es el flujo máximo por área foliar, expresada en  $\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  para los sistemas de flujo abierto. La ecuación de  $W$  expresada en (4), donde  $P$  es la presión atmosférica en  $\text{Bar}$ ,  $V$  es el flujo volumétrico de aire en litros por minuto ( $\text{lpm}$ ),  $T_a K$  es la temperatura en Kelvin ( $K$ ), y  $A$  es el área foliar en  $\text{cm}^2$ , es la que se utiliza a menudo el área foliar efectiva en cámara de los sistemas de medición de fotosíntesis y transpiración. La constante 2005.39 es un coeficiente de ajuste para cambiar las unidades de masa a  $\text{mol}$ , la superficie a  $\text{m}^2$  y el tiempo de minutos a segundos.

$$W = (2005.39) \frac{(V)(P)}{(T_a K)(A)} \quad (4)$$

Una vez que  $e_i$ ,  $e_o$  y  $W$  se estiman,  $E$  puede ser calculada como se establece en (5):

$$E = (W)(1000)(18.02) \frac{(e_i - e_o)}{(P - e_o)} \quad (5)$$

### III.2. ZigBee

Existen varias compañías que ofrecen este protocolo de comunicación, en ellos se encuentran en un mismo encapsulado el transceptor junto con un microcontrolador las cuales son: ATmega128RFA1, AT86RF230, AT86RF231, XBee, XB24CZ7PIS-004, EM250, EM351, EM357, MC1322x, JN514x, uPD78F8056, uPD78F8057, uPD78F8058, M16C/6B3, R8C/3MQ, STM32W, ZBS240, CC2530, CC2520, UZ2400, RF24J40MA, MRF24J40MB, MRF24J40MC, por las compañías Atmel, Digi International, Ember, Freescale, Jennic, NXP Semiconductors, Renesas, STMicroelectronics, Samsung Electro-Mechanics, Texas Instruments, Uniband Electronic Corporation y Microchip Technology, respectivamente.

En la Tabla 2 se muestra una comparación hecha por Garcia-Sanchez (2011), donde se comparan el uso de unidades de proceso, que en este caso son microcontroladores, sensores utilizados y el transceptor para el protocolo ZigBee utilizado en los sensores remotos comerciales.

Cabe mencionar que en la Tabla 2 se muestran dispositivos comerciales que usan una gran capacidad de sensores para poder abarcar varias aplicaciones, pero en nuestro caso la aplicación está bien definida por eso mismo solo se utilizarán los sensores necesarios. Con base en la comparación hecha en la Tabla 3, la cual muestra una comparación entre los tipos de sensores que se usan en la investigación, y en los cuales podemos ver qué predominan los sensores de humedad relativa y temperatura.

Los dispositivos que usan para hacer la comunicación inalámbrica en los artículos revisados sobre redes de sensores inalámbricos para el monitoreo en la agricultura, son de pequeño tamaño, esto es debido a que los sensores deben de ser lo más compactos posibles. Por lo cual se hará uso de los módulos de comunicación XBee Pro S2B, los cuales siguen el mismo protocolo, así que no deberían presentar ningún inconveniente al momento de cambiar de transceptor.

Tabla 2. Comparación entre unidad de proceso, transceptor y sensores utilizados.

Características	MICAz	MICA2DOT	MICA2	Imote2	TelosB	IRIS	Crick
<b>Microcontrolador</b>	ATmega128L	ATmega128L	ATmega128L	Marvell/ XScalePXA271	TIMSP430	ATmega128L	ATmega128L
<b>Sensores disponibles</b>	Luz, temperatura, humedad, presión barométrica, acelerómetro, GPS, humedad relativa, acústica, video, micrófono, sonar, magnetómetro.	Luz, temperatura y acelerómetro.	Luz, temperatura, humedad, presión barométrica, acelerómetro, GPS, humedad relativa, acústica, video, micrófono, sonar, magnetómetro.	Luz, temperatura, humedad y acelerómetro.	Luz, temperatura y humedad	Luz, temperatura, humedad relativa, presión barométrica, acelerómetro/sísmico, acústico, magnético y video.	Luz, temperatura, humedad, presión barométrica, acelerómetro, GPS, humedad relativa, acústico, ultrasónico, video, micrófono, sonar, magnetómetro.
<b>Chip Transceptor</b>	CC2420	CC1000	CC1000	CC2420	CC2420	Atmel RF230	CC1000

En la Tabla 3, se muestra una comparación entre las diferentes topologías que se utilizaron en investigaciones de la misma índole así como los sensores utilizados.

Tabla 3. Comparación de sensores y topologías utilizados en la investigación.

<b>Investigación</b>	<b>Sensores</b>	<b>Topologías</b>
George Hloupis et. al, 2011	No especifican	Estrella
López-Riquelmea et.al. 2009	Humedad Relativa, temperatura ambiental, conductancia eléctrica en el agua, temperatura de agua, humedad, conductividad, salinidad y temperatura de suelo.	Estrella
Zhang, 2011	Salinidad del suelo, temperatura y contenido de agua	No especifican
Junxiang, 2011	Cámaras	Estrella
Garcia-Sanchez, 2011	pH suelo, humedad, conductividad, salinidad, temperatura, luz ambiental, humedad del suelo, cámara y sensor de movimiento	Grupo de árboles
Escolar-Díaz, 2011	Temperatura, humedad, luz y humedad del suelo	Grupo de árboles
Morais, 2008	Humedad del suelo, humedad relativa e irradiación solar.	Grupo de árboles

Matese, 2009	Temperatura ambiental, presión atmosférica, anemómetro, humedad relativa, precipitación, temperatura del fruto, temperatura de la hoja y potencial mátrico.	Grupo de árboles
Cheng, 2011	Humedad del suelo y temperatura	Grupo de árboles
Peres, 2011	Humedad relativa, radiación solar, temperatura ambiental y precipitación	No especifican
Zheng, 2011	Temperatura y humedad del ambiente, conductividad eléctrica, humedad y temperatura del suelo	Malla

### III.3. Sensores

Como se mencionó en la sección anterior, los sensores de mayor uso en el campo son los de humedad relativa y temperatura, son estos sensores primarios que de manera indirecta estiman la transpiración en las plantas.

Los sensores seleccionados para medir estas variables son el SHT21 y el SHT75, ambos de la marca Sensirion (SHT7x, 2011; SHT21, 2011). A continuación vemos las tablas del desempeño de cada sensor para sus mediciones de temperatura y de humedad relativa.

Tabla 4. SHT21. Humedad Relativa

Parámetro	Condición	Mínimo	Típico	Máximo	Unidades
Resolución	12 bits		0.04		% Humedad Relativa
	8 bits		0.7		% Humedad Relativa
Precisión	Típico		± 2.0		% Humedad Relativa
Repetitividad			±0.01		% Humedad Relativa
Histéresis			±1		% Humedad Relativa
No linealidad			<0.1		% Humedad Relativa
Tiempo de respuesta	$\tau$ 63%		8		segundos
Rango de operación		0	0-80	100	%Humedad Relativa
Desvío a largo plazo	normal		<0.5		% Humedad Relativa/año

Tabla 5. SHT21 Temperatura.

Parámetro	Condición	Mínimo	Típico	Máximo	Unidades
Resolución	14 bits		0.01		°C
	12 bits		0.04		°C
Precisión	Típico		±0.3		°C
Repetitividad			±0.1		°C
Rango de operación		-40		125	°C
Tiempo de	$\tau$ 63%	5		30	segundos

respuesta					
Desvío a largo plazo			<0.04		°C/año

Tabla 6. SHT75 Temperatura.

Parámetro	Condición	Mínimo	Típico	Máximo	Unidades
Resolución		0.04	0.01	0.01	°C
		12	14	14	bits
Precisión	Típico		±0.3		°C
Repetitividad			±0.1		°C
Rango de operación		-40		123.8	°C
Tiempo de respuesta	$\tau$ 63%	5		30	segundos
Desvío a largo plazo			<0.04		°C/año

Tabla 7. SHT75 Humedad Relativa

Parámetro	Condición	Mínimo	Típico	Máximo	Unidades
Resolución		0.4	0.05	0.05	% Humedad Relativa
		8	12	12	bits
Precisión	Típico		± 1.8		% Humedad Relativa
Repetitividad			±0.01		% Humedad Relativa
Histéresis			±1		% Humedad Relativa
No linealidad			±3		% Humedad

					Relativa
Tiempo de respuesta	$\tau$ 63%		8		segundos
Rango de operación		0		100	%Humedad Relativa
Desvío a largo plazo	normal		<0.5		% Humedad Relativa/año

Como se puede observar en las tablas (Tabla 4, Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7), son muy similares en cuanto al desempeño de cada sensor, pero en cuanto a la comunicación el sensor SHT21 tiene la capacidad de comunicación con el protocolo I<sup>2</sup>C, el cual es un estándar en cuanto a protocolos de comunicación, haciendo más rápida su implementación con respecto al SHT75 el cual maneja un protocolo similar al I<sup>2</sup>C pero como no es igual se tiene que implementar el programa especial para leer este sensor.

### III.4. FPGA- $\mu$ C

En este apartado explicaremos brevemente sobre lo que es un FPGA y un  $\mu$ C (microcontrolador) describiendo sus ventajas y desventajas, para terminar explicando como la combinación de estos dos reducen las desventajas.

#### III.4.1 FPGA

Un FPGA es un arreglo bidimensional de bloques lógicos y flip-flops con interconexión electrónicamente programable (Sulaiman et al., 2009). Los FPGAs se basan en una cantidad muy grande de celdas lógicas, muy elementales, y una mucho mayor interconectividad que sus contrapartes como los DSP y microcontroladores. Permite un menor consumo de potencia y un mayor nivel de integración. Estos dispositivos pueden 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 FPGAs ofrecen ventajas como alta velocidad en procesamiento, funcionalidad compleja y bajo consumo de energía. Estas características son atractivas desde el punto de vista para el diseño de sistemas embebidos. Actualmente se ha reportado el uso de FPGAs 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.

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, bloques de memoria, entre otros. Se pueden programar inalámbricamente, son reconfigurables, todo está integrado en un solo circuito (System On a Chip), su tamaño es reducido, en el orden de milímetros y son de bajo costo.

Las principales “desventajas” de un FPGA es su alto conocimiento y el tiempo desarrollo. Alto conocimiento se refiere a los conocimientos que se necesitan cuando se está adentrando a dicha tecnología, para lo cual ya se debe de contar con conocimientos de lógica combinacional y lógica secuencial. El tiempo de desarrollo de un núcleo en específico se lleva más tiempo en comparación con el desarrollo de un programa en un microcontrolador, debido a que el FPGA, generalmente se programa a bajo nivel, pero dicho tiempo se repone, ya que el código puede ser llamado posteriormente para diferentes aplicaciones de una manera rápida y sencilla.

### **III.4.2 Microcontrolador**

Un microcontrolador es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes necesarios para controlar el funcionamiento de una tarea

determinada. Para esto los microcontroladores usan muy pocos componentes asociados. Un sistema con microcontrolador debe de 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 (Palacios-Municio et al., 2004).

El microcontrolador es uno de los inventos más notables del siglo XX. En el mercado hay gran cantidad de ellos, con multitud de posibilidades y características. Cada tipo de microcontrolador sirve para una serie de casos y es el diseñador del sistema quien debe decidir cuál es el microcontrolador más idóneo para cada uso ( Palacios-Municio et al., 2004) .

### **III.4.3 FPGA- $\mu$ C**

SmartFusion es un cSoc (customizable System-on-a-chip) es el único chip que integra un FPGA, un procesador ARM Cortex-M3 de 32 bits, y un arreglo analógico programable, que ofrece una completa personalización. Está basado en proceso patentado de flash, el cual es ideal para los diseñadores que ocupan un SoC que proporciona una mayor flexibilidad que las funciones fijas de un microcontrolador, sin el excesivo costo de un núcleo procesador implementado en el FPGA (Actel, 2011; Actel, 2010).

En la Figura 10 se muestra un diagrama a bloques del contenido en el encapsulado donde se observan con azul los componentes del micro-controlador, en morado el FPGA y en amarillo la parte analógica programable. Se puede apreciar que la parte que pertenece al micro-controlador cuenta con los típicos periféricos para la comunicación con sensores y otros medios de envi6/recepci6n de informaci6n tales como Ethernet para otras computadores en red, UART para conversi6n a USB o RS232.

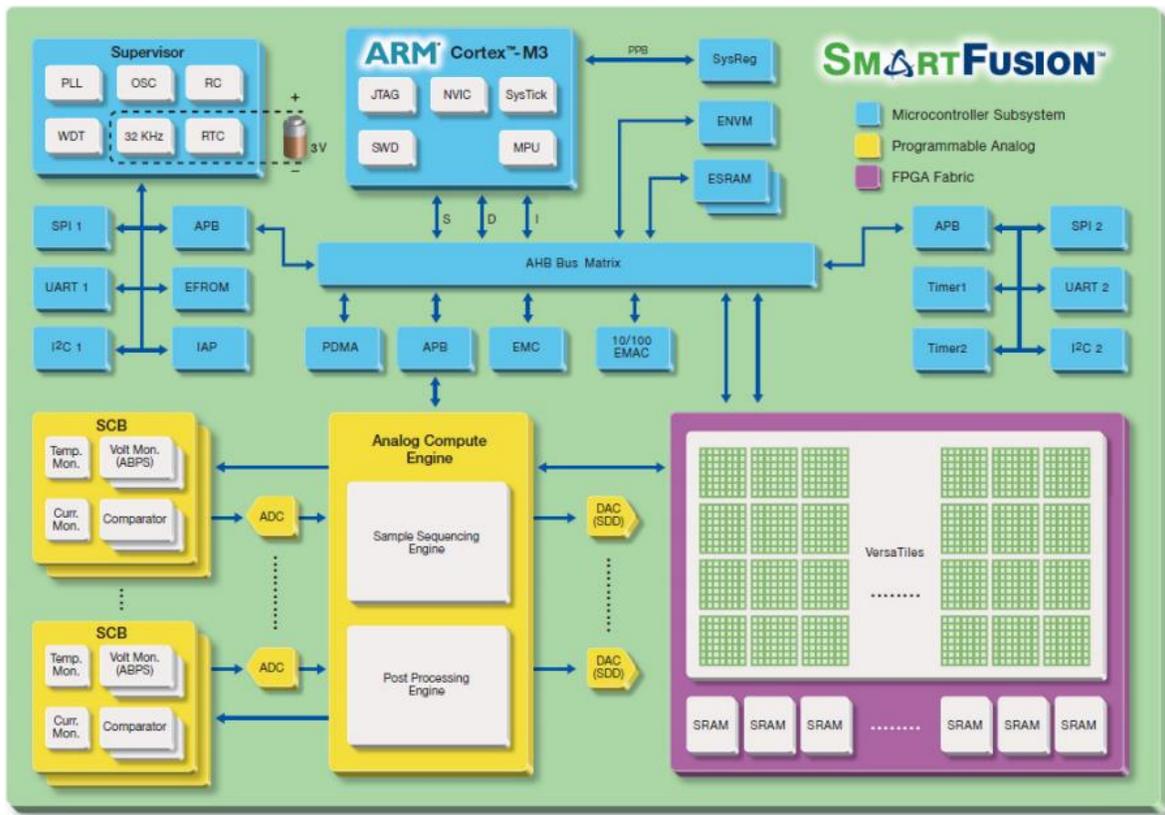


Figura 10. Diagrama a bloques de SmartFusion

La utilización de estas dos tecnologías (FPGA y  $\mu C$ ), permite mejorar, con las ventajas, las desventajas de cada uno, una de las desventajas que se tiene al usar el FPGA es su alto tiempo de desarrollo pero al usar un  $\mu C$  se pueden usar los protocolos estándar de comunicación como son I2C, SPI, UART, etc; y por la parte del  $\mu C$  se elimina la desventaja de la ejecución de sentencias de manera secuencial, dado que el FPGA trabaja de manera paralela.

### III.5. Diagrama general

La Figura 11 ilustra el diagrama a bloques sobre las partes que lleva la red de sensores. Empezaremos a describirla de izquierda a derecha, primero tenemos como elemento a medir la planta, con el uso de sensores de humedad relativa y

temperatura, dichas mediciones son adquiridas, empaquetadas por la unidad de proceso (SmartFusion), para ser mandadas vía inalámbrica por un XBee (XBee PRO S2B) a otro XBee de la misma serie, una vez adquiridos los datos en el servidor, estos son obtenidos por un programa en Java, el cual hace las operaciones necesarias para su conversión de bytes a °C y Humedad Relativa, también se pueden implementar las ecuaciones en Java para de esta manera obtener transpiración en línea, una vez convertidos los almacena en una base de datos realizada en postgresSQL, existe otros dos programas en Java corriendo de manera simultánea, el primero crea una página web (Web Servelt) para ser desplegada en intranet (también puede ser desplegada en internet), donde se monta una imagen graficando los valores de la base de datos (humedad relativa, temperatura del ambiente y transpiración, y dos plantas), y tiene un link para descargar la base de datos en un archivo txt, el segundo programa en Java es el que realiza este archivo.

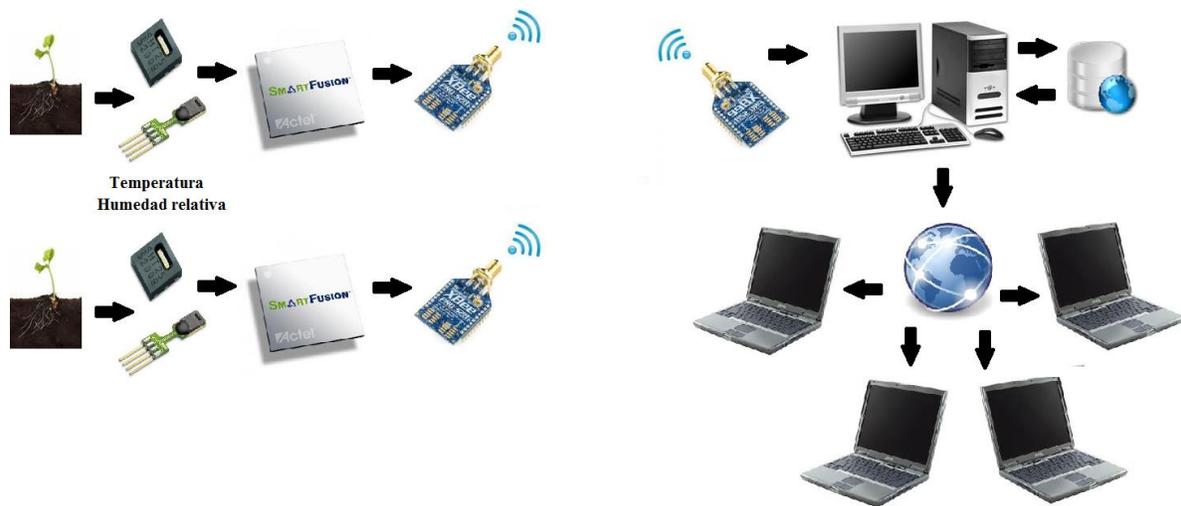


Figura 11. Diagrama general

## III.6. Sensor inteligente

### III.6.1 FPGA- $\mu$ C

Se ha mencionado con anterioridad que se hizo uso de un encapsulado que contiene un FPGA, un microcontrolador y un arreglo analógico programable. En este proyecto solo se hizo uso de los dos primeros. Un diagrama global que muestra el contenido del encapsulado esta expresado en la Figura 13, donde se pueden observar los 4 bloques principales con su conexión, tanto interconexión como conexiones así salidas del encapsulado, los cuales son el microcontrolador (Proyecto\_nuevo\_MSS\_0), el bloque CoreAPB3 para la comunicación entre el microcontrolador y el FPGA, los bloques descritos en VHDL llamados BOMBA\_PWM\_WRAPPER\_0 y SHT75\_DRIVER\_WRP\_0, los cuales son usados para controlar el encendido de la bomba, el ancho de pulso que controlan la posición de los servomotores que sirven para abrir y cerrar la cámara que aísla a la planta y la comunicación con los sensores SHT75, respectivamente.

El bloque APB3 es el bus encargado de hacer la comunicación entre el FPGA y el microcontrolador, este bloque de comunicación debe tener un maestro y un esclavo, para nuestro caso el maestro es el microcontrolador y los esclavos son los bloques del FPGA, a cada esclavo se le asigna una dirección tal y como se muestra en la Figura 12. Las señales con las que debe de contar el APB3 se expresan en la Tabla 8.

Tabla 8. Nombre y breve descripción de las señales del bus APB3

Nombre de la señal	Descripción
<b>PCLK</b>	Es el reloj
<b>PRESETn</b>	Reset. Activo en bajo
<b>PADDR</b>	Bus de dirección hasta 32 bits
<b>PSELx</b>	Seleccionador
<b>PENABLE</b>	Habilitador
<b>PWRITE</b>	Selector entre lectura y escritura
<b>PWDATA</b>	Bus de escritura

<b>PREADY</b>	Bandera para avisar que está listo
<b>PRDATA</b>	Bus de lectura
<b>PSLVERR</b>	Bandera de error

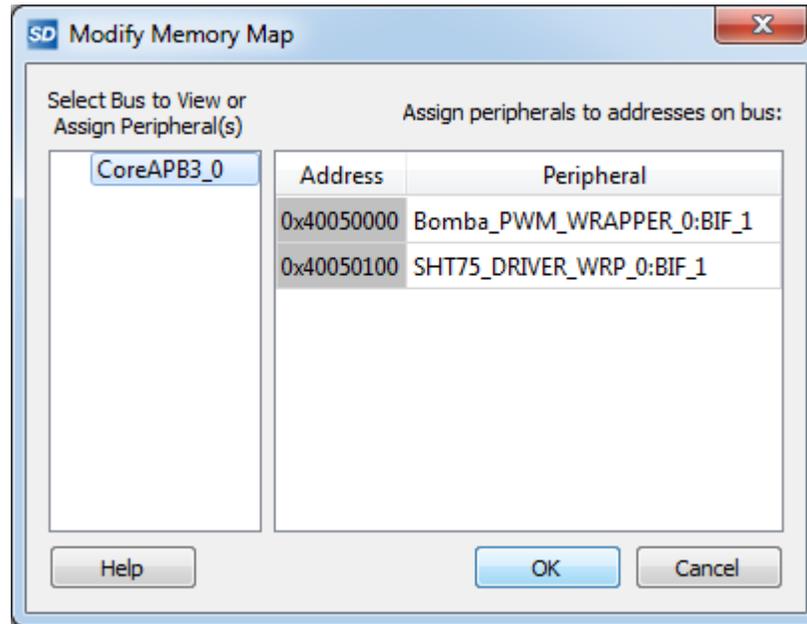


Figura 12. Dirección de los bloques en APB3

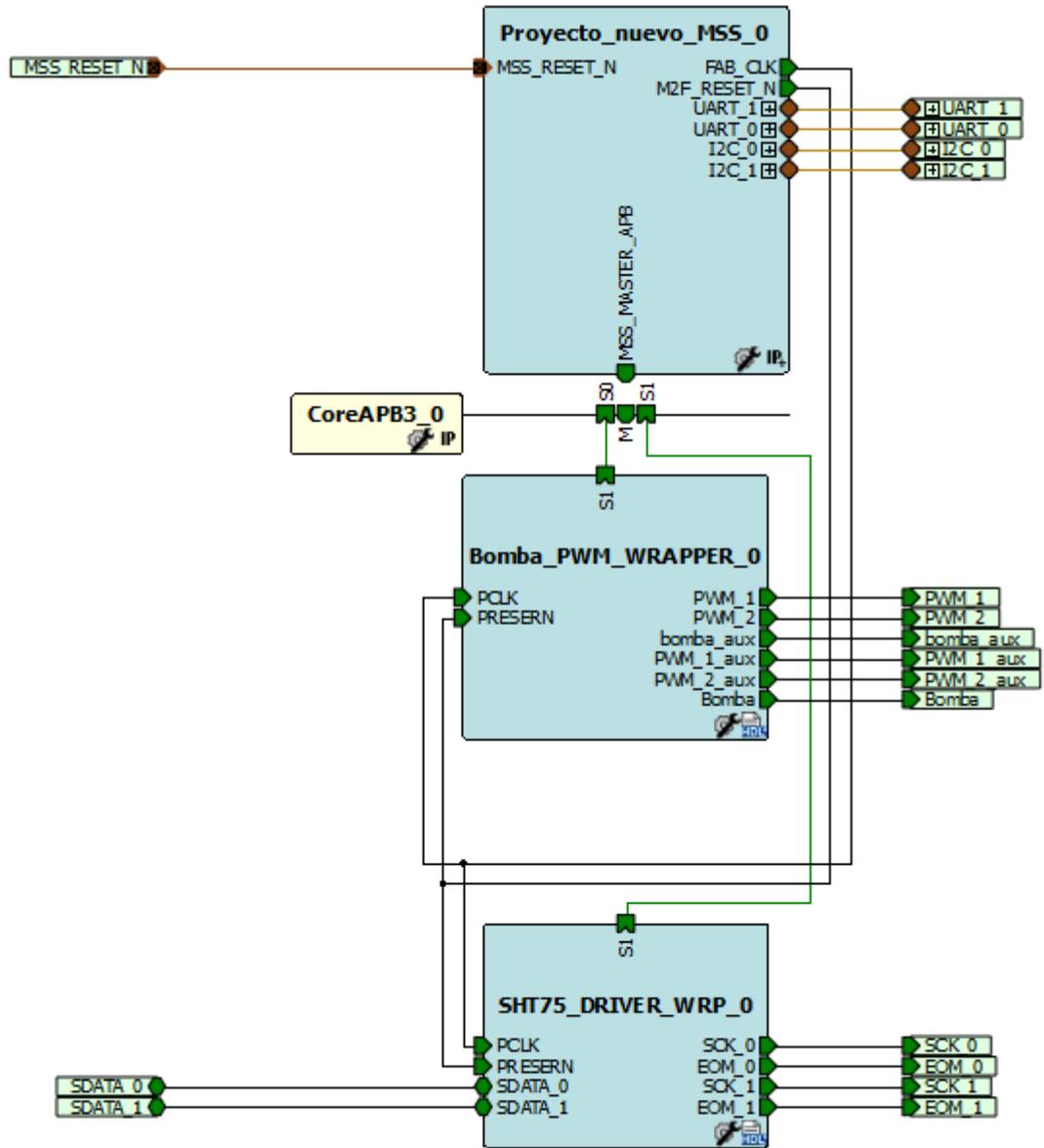


Figura 13. Diagrama global del encapsulado.

### III.6.2 Microcontrolador

Como ya se mencionó, el dispositivo a usar (SmartFusion) dentro de un mismo encapsulado contiene un FPGA, un arreglo analógico programable y un Microprocesador ARM Cortex-M3 de 32 bits; el programa para operar este microprocesador se verá en esta sección.

El programa tiene a su cargo las siguientes funciones:

- Lectura de los sensores SHT21 por el puerto I<sup>2</sup>C.
- Protocolo de comunicación UART, uno para controlar el XBee y otro para comunicación con la computadora.
- Apertura y cierre de las cámaras para aislar las plantas.
- Apagado y encendido de la bomba.
- Señal mandada al FPGA para dar inicio y pedir los datos de las mediciones de los sensores SHT75.

Para la lectura de los sensores SHT21 se crearon librerías especiales con las opciones de inicialización, obtención de humedad relativa, obtención de temperatura y reset. La tarjeta utilizada trae conectada al UART0 un FTDI, el cual es un convertidor de protocolo UART a USB, para de esta manera poder ver en la computadora lo que está ocurriendo dentro del encapsulado. Las demás funciones se hacen a través del bus APB3 para la comunicación entre el FPGA y el  $\mu$ C.

La secuencia de funciones que sigue el programa se enlista a continuación.

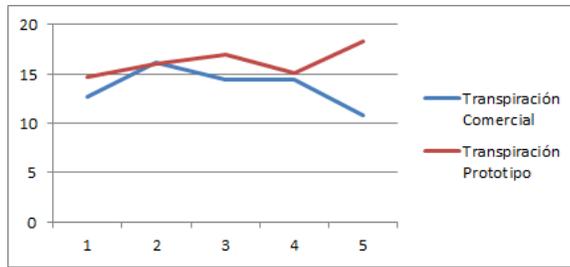
1. Limpiar variables.
2. Declaración de punteros para el bus APB3.
3. Inicializar UART0 a 57600 baudios y UART1 a 9600 baudios.
4. Inicializar sensores.
5. Medir temperatura de referencia.
6. Medir humedad relativa de referencia.
7. Cerrar cámaras para aislar la planta.
8. Encender la bomba.
9. Medir humedad relativa de ambas plantas.
10. Empaquetar y pasar los datos al UART1 para que el XBee los mande inalámbricamente al servidor.
11. Retardo para volver a empezar la operación.
12. Ir al paso 5.

### **III.6.3 FPGA**

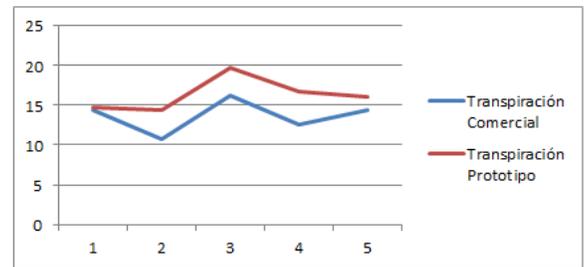
En la parte del FPGA del encapsulado se pusieron dos bloques, uno es para el control de la bomba y para la apertura/cierre de las cámaras para aislar las plantas, el otro bloque es para la comunicación con los sensores SHT75. El control de la bomba es on/off (prendido o apagado), las cámaras para aislar las plantas están construidas con servomotores para lo cual fue necesario hacer un PWM para cada servomotor. Se realizó la comunicación con los sensores SHT75 en el FPGA porque no cuentan con un protocolo de comunicación estándar. Otra ventaja que ofrece el uso del FPGA, es que la medición de ambos sensores se puede hacer al mismo tiempo, es decir, en paralelo.

### **III.6.4 Puesta de experimento**

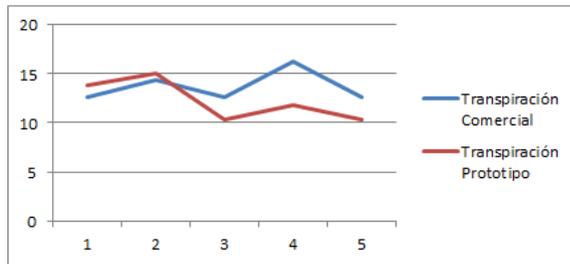
El experimento tuvo lugar en las instalaciones de INIFAP campus Celaya, donde se tuvieron dos plantas de diferente edad, las cuales estuvieron a diferentes porcentajes de capacidad de campo (cantidad de agua en el suelo), éstas fueron medidas con un sensor comercial (CI-340) y comparadas con las mediciones del prototipo realizado, en la Figura 14 se muestran dichas comparaciones, donde se puede observar que si hay variación entre la estimación de transpiración pero no es crítica la diferencia. Cada inciso de la Figura 14 corresponde a una variedad de frijol a diferente porcentaje de agua en el suelo con respecto a la cantidad de agua que pueden acumular dicho suelo (capacidad de campo), el inciso *a* corresponde a Pinto Villa a 20%, el inciso *b* corresponde a la Pinto Saltillo a 60%, el inciso *c* corresponde a Bayo Madero a 20% y el inciso *d* corresponde a Canario 60 a 60%. Cabe mencionar que en ésta figura el eje *Y* corresponde a la cantidad de transpiración expresada en mg/m<sup>2</sup>/s y el eje *X* corresponde a diferentes plantas de la misma variedad de frijol.



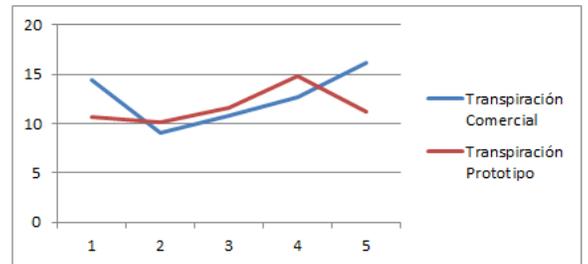
a)



b)



c)



d)

Figura 14. Comparación entre medidor de transpiración (CI-340) y prototipo desarrollado.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### IV.1. Obtención de datos y filtrado

En la instrumentación siempre es de suma importancia que la obtención de los datos se haga sin el ruido inherente a las variables involucradas en el área de biosistemas (Temperatura, Humedad, Radiación, Transpiración, etc.) para lo resolver esto hace uso de filtros digital o analógicos, en éste caso se hizo uso de un filtro de decimación de promedio el cual se ve expresado en la siguiente ecuación.

$$y(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x(k - i) \quad (6)$$

Donde  $x$  es la entrada,  $k$  el número de muestra,  $n$  el orden del filtro, y la salida e  $i$  la variable de desplazamiento.

Esta implementación cuenta con este filtro con orden 64, en las siguientes figuras (Figura 15 y Figura 16) se muestra las señales obtenidas contra las señales filtradas. Cada muestra fue tomada cada 2 minutos, en éste tipo de implementación la temperatura y la humedad relativa no tienen cambios muy rápidos por eso no es necesario un muestreo veloz.

En la Figura 15 se muestran las mediciones de humedad relativa y temperatura del sensor SHT21 y el filtrado de las mismas mediciones. En la Figura 16 se muestran las mediciones de humedad relativa y temperatura obtenidas de ambos sensores comparadas contra la señal de humedad relativa y temperatura filtrada de ambos sensores.

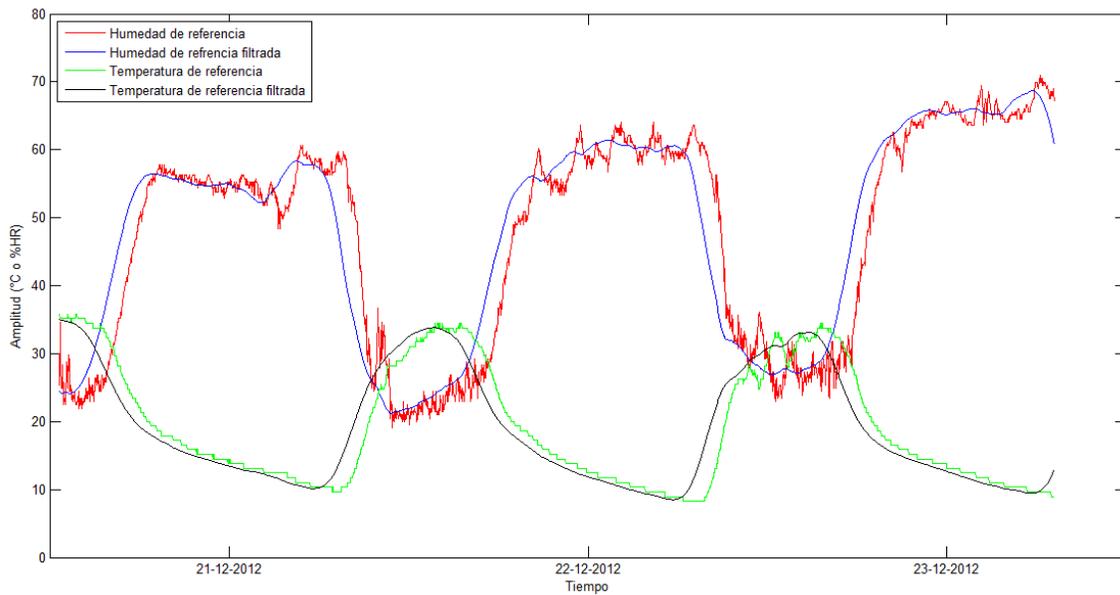


Figura 15. Humedad relativa y temperatura obtenidas contra humedad relativa y temperatura filtradas.

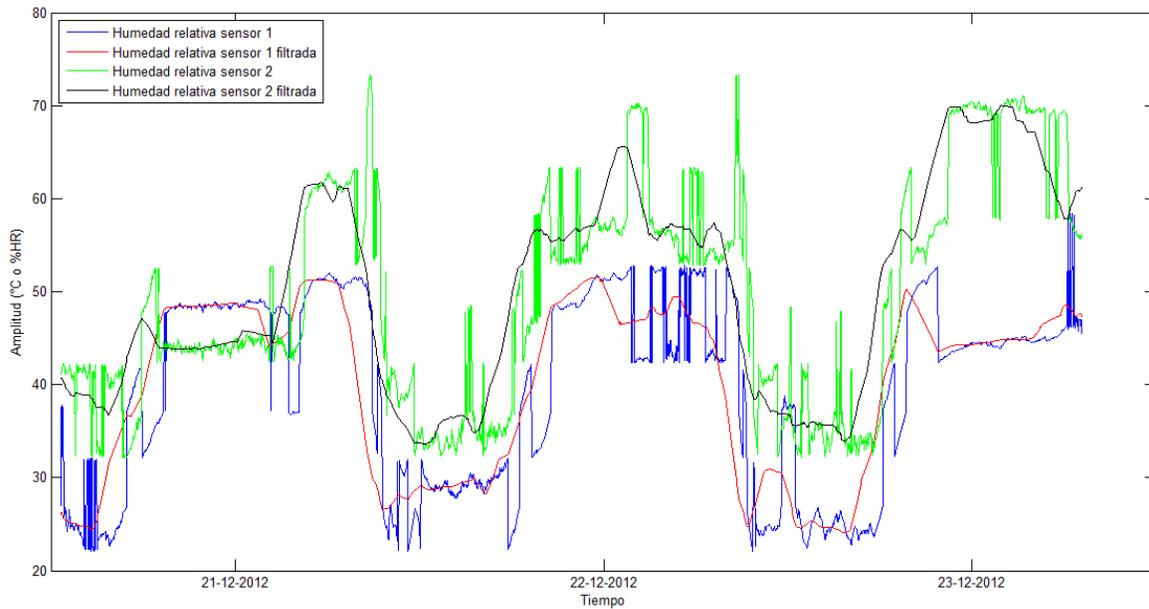


Figura 16. Humedad relativa y temperatura obtenidas de ambos sensores vs Humedad relativa y temperatura filtradas de ambos sensores.

## **IV.2. Compensación en la medición**

Se puede observar que las ecuaciones que se plantearon para estimar la transpiración en las plantas se basan en la diferencia de humedad relativa del ambiente y la humedad relativa de la planta, por ende se van a tener diferencia en las mediciones por dos razones, 1) los sensores no están en el mismo sitio y 2) son diferentes serie de sensores. Esto hace que sea necesario poner un factor para compensar estas diferencias, es decir una compensación en la medición. Este valor que se va adherir a las ecuaciones se obtuvo poniendo los sensores en las posición donde estarán mientras está en funcionamiento, con una duración de un día, se tomó la diferencia máxima entre los sensores para de ésta manera compensar la variabilidad entre los sensores y obtener datos con mayor confiabilidad.

Al hacer las pruebas durante un día se expresaron diferencias entre los resultados conforme a lo previsto, y la diferencia entre los sensores de diferentes series (SHT75 y SHT21) y diferente posición fue con un máximo de 15% de humedad relativa, dicho valor fue el que se usó para la compensación de la medición.

## **IV.3. Transpiración**

El experimento tuvo lugar en las instalaciones del INIFAP campus Celaya donde se dejó monitoreando una planta de frijol resistente a sequía, el intervalo de las mediciones de los sensores primarios fue aproximadamente de 2 minutos con 2 segundos, este intervalo es bastante aceptable dado que los sensores comerciales (PTM-48M), así como los de investigación (Millan-Almaraz, 2010) hacen una medición cada 15 minutos, el comportamiento de las variables se ve expresado en la Figura 17, donde se puede observar cuantitativamente la transpiración que realiza la planta en *mg/m<sup>2</sup>/seg*.

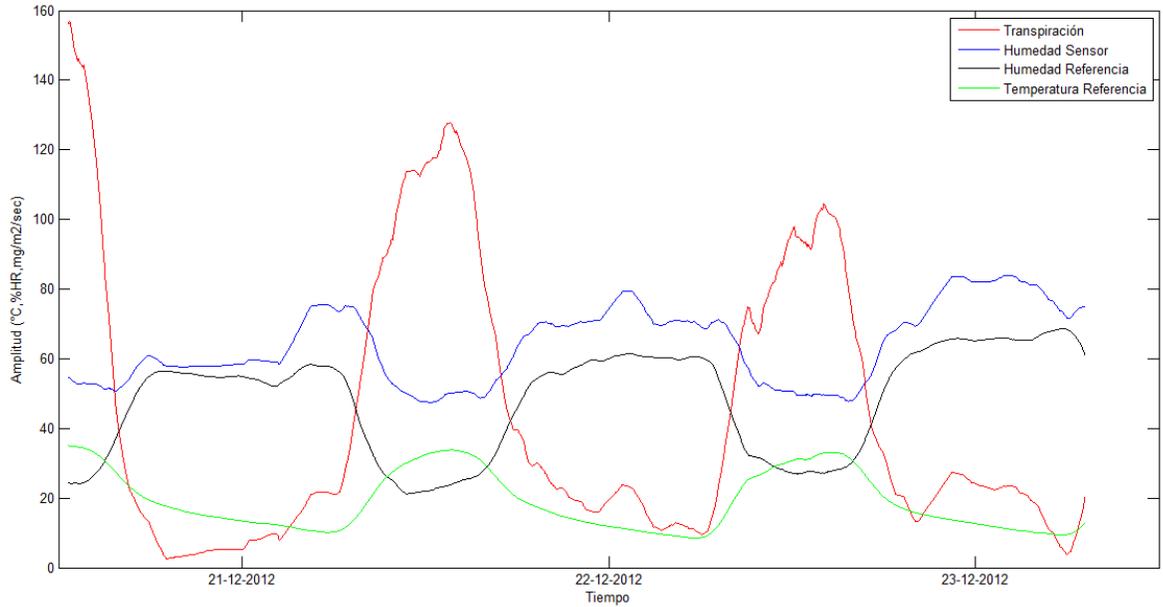


Figura 17. Transpiración de una planta de frijol resistente a estrés hídrico.

#### IV.4. Presentación de la transpiración por internet

Se realizó una aplicación java JSP (Java Server Page), para el despliegado de la información en una página de internet, la cual presenta en una gráfica la transpiración de la planta con un intervalo de mediciones de 2:02 minutos aproximadamente, la página también contiene un link para poder ver o descargar las mediciones de los sensores primarios hasta la transpiración. Dicha página se muestra en la Figura 18.

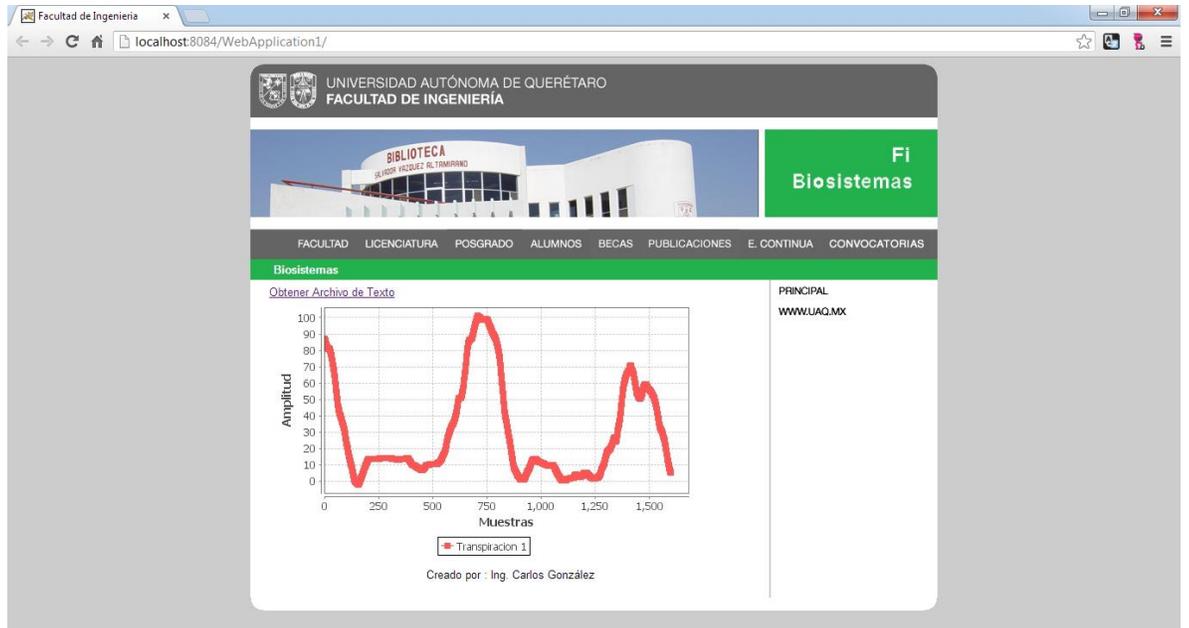


Figura 18. Página de internet presentando la transpiración de la planta.

#### IV.5. Comparación entre dos variedades de frijol

Este experimento fue realizado en el INIFAP campus Celaya y tuvo una duración de dos días con intervalos de medición de 2 minutos con 2 segundos aproximadamente. Se realizó una comparación entre dos plantas de frijol (Figura 19), de las cuales una estaba en una etapa madura de su ciclo de vida y la otra era una planta joven, éste experimento nos muestra la clara diferencia en la cantidad de transpiración que realiza cada una de ellas. Tal y como se esperaba la planta de frijol más joven presenta una mayor transpiración en comparación con la planta de mayor edad. También se puede observar que la transpiración incluso en la noche es mayor.

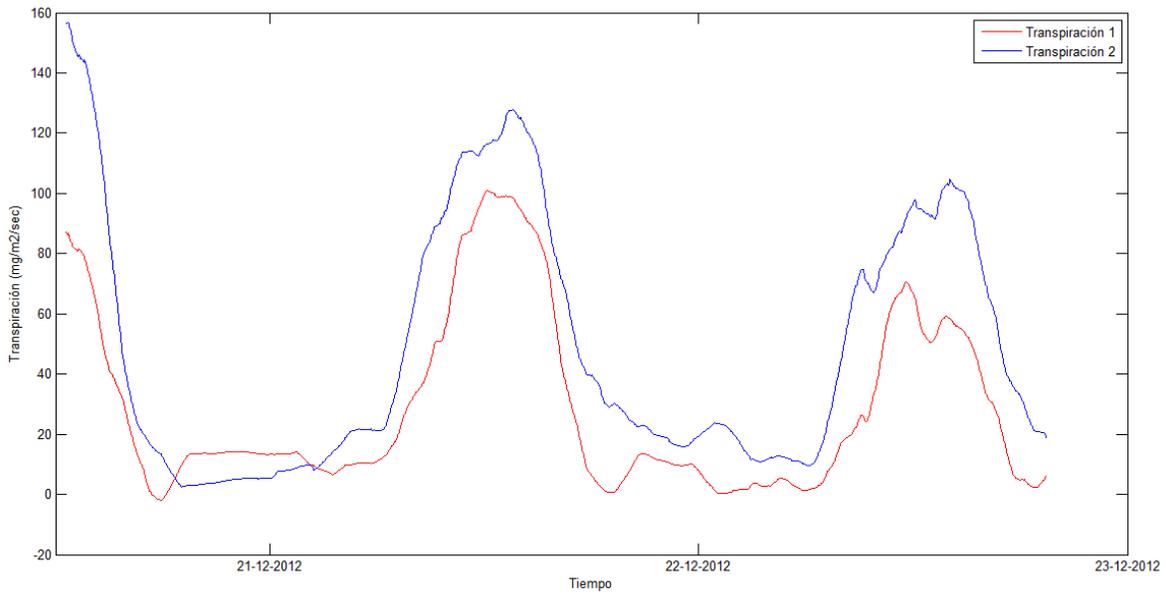


Figura 19. Comparación entre la transpiración de una planta joven y una planta vieja de frijol.

#### IV.6. Comparación entre el prototipo realizado y Li-Cor (LI 6400XT)

Para poder validar aún más los datos se realizó una comparación usando 3 plantas diferentes de la misma especie haciendo mediciones con un equipo de la marca Li-Cor, usando el modelo LI 6400XT, éstas mediciones tuvieron lugar en la ciudad de Zacatecas, apoyándonos con la universidad del estado (Universidad Autónoma de Zacatecas). En la Figura 20 se muestra dichas mediciones hechas, ésta figura nos muestra que el prototipo realizado, si bien no es exacto, se aproxima a los valores otorgados por el LI 6400XT. Cabe destacar que lo más importante es que sigue la tendencia de las mediciones, que es la que aporta mayor información sobre el comportamiento de las plantas a través del tiempo.

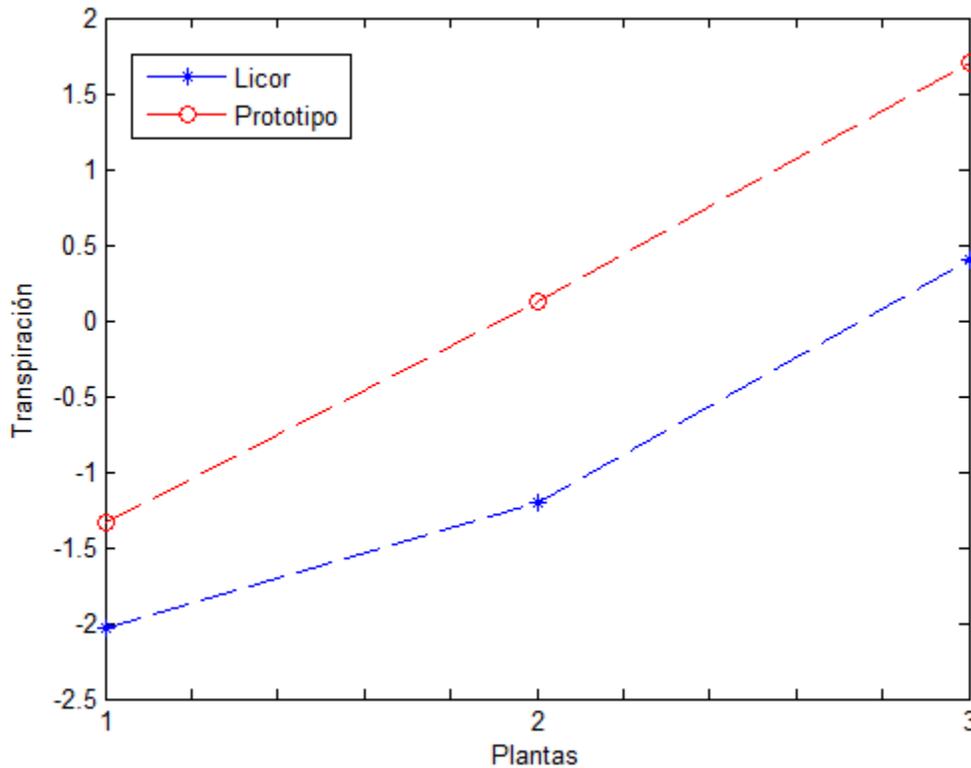


Figura 20.- Comparación de medición entre Li-Cor (LI 6400XT) y prototipo.

## V. CONCLUSIONES

En esta tesis se presentó un dispositivo capaz de estimar la transpiración de las plantas (el frijol como caso de estudio) en base a sensores primarios (humedad relativa y temperatura), el cuál fue tomado como nodo final en una red de sensores inalámbricos, la topología usada fue tipo estrella donde el coordinador es un servidor que contiene diferentes programas en Java para: 1) poder leer los datos de todos los puntos en la red de sensores, con esos datos de sensores primarios estimar la transpiración realizada por cada planta monitoreada y almacenar dicha información en una base de datos, 2) copiar la base de datos a un archivo tipo texto y 3) crear una página Web para que desde cualquier dispositivo con conexión a internet pueda ver en tiempo real la transpiración realizada por cada planta, así como la capacidad de poder descargar en un archivo de texto todos los datos almacenados en la base de datos desde el momento de puesto en marcha hasta ese momento (la última muestra, cada

muestra dura 2 minutos aproximadamente), para probar la precisión se comparó contra un equipo comercial (CI-340) obteniendo resultados confiables, otra prueba fue que se corroboró la diferencia entre la transpiración dos de frijol pero de diferente edad, obteniendo que la planta más joven transpira más que la planta de mayor edad.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

Acosta-Díaz E., Amador-Ramírez M.D., Padilla-Ramírez J.S., Valadez-Montoya H. 2007. Biomasa y rendimiento de frijol tipo flor de junio bajo riego y sequía. *Agric. Téc. Méx.* 33:153-162.

Actel. 2011. SmartFusion evaluation kit, user's guide. Consultado Noviembre, 2011. <http://www.actel.com/products/SmartFusion/default.aspx>

Actel, 2010. Actel smartfusion™ microcontroller, subsystem user's guide

Baronti P., Pillai P., Chook V., Chessa S., Gotta A., Fun Hu Y. 2007. *Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and zigbee standards.* Elsevier B.V., 0140-3664.

CID Inc. 2008. CI-340 Hand-Held Photosynthesis System Instruction Manual

Daletown company Ltd. 2009. PTM-48M User Manual.

INIFAP. 2004. Guía para producir frijol de temporal en Querétaro. Consultado en Octubre, 2011. <http://www.inifap.gob.mx/circe/publique/GUIA%20PARA%20PRODUCIR%20FRIJOL%20DE%20TEMPORAL%20EN%20QUERETARO.pdf>

INIFAP. 2010. Reporte Anual 2009, Ciencia y tecnología para el campo mexicano.

INIFAP. 2011. Convenio de administración por resultados del INIFAP 2009-2013.

Labotec. Medidor de fotosíntesis, portátil. Consultado Octubre, 2011. <http://labotecgroup.com/productos.php?categoria=Medidor%20de%20Fotosintesis>

Millán-Almaraz, J.R.; Guevara-González, R.G.; Romero-Troncoso, R.J.; Osornio-Rios, R.A.; Torres-Pacheco, I. 2009. Advantages and disadvantage on

photosynthesis measurement techniques: A review, Afr. J. Biotechnol. 8, 7340-7349.

Millán-Almaraz J.R., Romero-Troncoso R.J., Guevara-González R.G., Contreras-Medina L.M., Carrillo-Serrano R.V., Osornio-Rios R.A., Duarte-Galvan C., Rios-Alcaraz M.A., Torres-Pacheco I. 2010. FPGA-based Fused smart sensor real-time plant-transpiration dynamic estimation, Sensor 10, 8316-8331.

National Instruments. ¿Qué es una red de sensores inalámbricos (WSN)?. Consultado Octubre, 2011. <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/9507>

Palacios-Municio, E., F. Remiro-Dominguez, L.J. López-Pérez. 2004. Microcontrolador PIC16F84. Desarrollo de Proyectos. 1ra Ed. RA-MA Editorial, Madrid, España.

PP System. 2008. CIRAS-2 portable photosynthesis system, for research.

Red del sistema de las Naciones Unidas sobre el desarrollo rural y seguridad alimentaria. 2011. Agricultura. Consultado Octubre, 2011. [http://www.rdfs.net/themes/agriculture\\_es.htm](http://www.rdfs.net/themes/agriculture_es.htm)

Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Vol. 1, Núm. 3, 1 de julio-30 de septiembre 2010. Consultado Octubre, 2011. [http://www.inifap.gob.mx/revistas/ciencia\\_agricola/vol1\\_num3.pdf](http://www.inifap.gob.mx/revistas/ciencia_agricola/vol1_num3.pdf)

Romero-Troncoso, R. de J. 2007. Electrónica Digital y Lógica Programable. 1ra. edición. Ed. Universidad de Guanajuato. ISBN: 968-864-449-8.

SAGARPA. 2011. INFORME, Estudio de gran visión y factibilidad económica y financiera para el desarrollo de infraestructura de almacenamiento y distribución de granos y oleaginosas para el mediano y largo plazo a nivel nacional. Consultado Noviembre, 2011. [http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/Estudios\\_promercado/GRA\\_NOS.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/Estudios_promercado/GRA_NOS.pdf)

Salisbury, F.B.; Ross C.L. 2005. Plant Physiology. 4ta edición. Ed. Paperback. ISBN: 8131501655

Schmidt, U 2005. Microclimate control in greenhouses based on phytomonitoring data and Mollier phase diagram. Acta Hortic. 2005, 691, 125-132.

SHT21 Data Sheet. 2011. Sensirion.

SHT7x Data Sheet. 2011. Sensirion.

SolFranc Tecnologías S.L (2008). PTM-48M photosynthesis and transpiration monitor

Sulaiman N. Obaid, Z. A., Marhaban M. H and. Hamidon, M. N., 2009. Design and Implementation of FPGA-Based Systems-A Review," Australian Journal of Basic and Applied Sciences, vol. 3, pp. 3575-3596.

Ton, Y.; Kopyt, M.; Nilov, N. 2004. Phytomonitoring technique for tuning irrigation of vineyards. Acta Hortic. 646, 133-139.

ZigBee. 2011. ZigBee Specification Network Topology. Consultado Octubre, 2011. <http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBee/NetworkTopology.aspx>