



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

Diseño de un sistema de irrigación automatizado para policultivo

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en ciencias
con terminación en Instrumentación y Control Automático

Presenta:

Ing. Jaredt Guadalupe Torres Lopes

Dirigido por:

M.I. Alejandro Espinosa Calderón

SINODALES

M.I. Alejandro Espinosa Calderón
Presidente

Dr. Irineo Torres Pacheco
Secretario

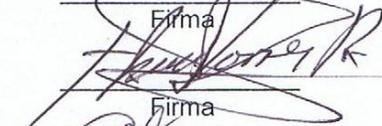
Dr. Ramón G. Guevara González
Vocal

M.I. Luis Miguel Contreras Medina
Suplente

M.I. Rafael Francisco Muñoz Huerta
Suplente

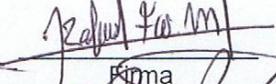
Dr. Aurelio Domínguez González
Nombre y Firma
Director de la Facultad


Firma


Firma


Firma


Firma


Firma


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

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Mayo de 2012
México

RESUMEN

El uso de sistemas de riego tiene como objetivo obtener mayores rendimientos en la producción de cualquier cultivo. Así mismo es una alternativa de solución para la actual problemática de escasez de agua, la cual ha venido repercutiendo en una deficiente producción agrícola. Este proyecto propone una solución para los constantes problemas de desperdicio de agua que se presentan en la agricultura. También expone los distintos métodos de irrigación existentes, discutiendo sus ventajas y desventajas. De esta discusión se concluye que el riego por goteo es el método que proporciona mayores beneficios. Se expone, también, cómo la práctica constante del monocultivo ha venido impactando negativamente: erosionando y degradando el suelo; contaminando químicamente; y generando la pérdida de la biodiversidad. Por lo tanto se propone la práctica del policultivo, utilizada tan comúnmente por nuestros antepasados y que proporciona numerosos beneficios como: la promoción de la diversidad biológica; el respaldo frente al mercado por efecto de plagas; y la seguridad alimentaria. Por último se recomienda adoptar el uso de invernaderos, o condiciones protegidas, para los cultivos, mezclándolos con los beneficios que acarrea la práctica del policultivo y el manejo de un sistema de irrigación adecuado para el sistema de producción. En el presente proyecto se realizó la combinación de distintas tecnologías con el fin de optimizar el riego y proporcionarle las condiciones adecuadas a las plantas para su desarrollo. El sistema de riego automatizado consta básicamente de tarjetas diseñadas para el PIC18f2550 (Microchip, 2009) para la adquisición de datos con cuatro sensores cada uno; para cada sensor se diseñó un sistema de acondicionamiento de señal; un FPGA Spartan 3 realiza el control general del sistema; se utiliza el protocolo de comunicación Xbee para la comunicación inalámbrica; y se desarrolló una interfaz de comunicación con la PC en la que se grafica el potencial mátrico del suelo a lo largo del tiempo.

(Palabras clave: Potencial mátrico, agricultura protegida, invernadero, FPGA, PIC, XBee)

ABSTRACT

The main objective of irrigation systems is to obtain higher production performances in any crop. Thus systems also offer a solution for the present strong problematic related to water scarcity, which has repercussions as deficient agricultural productions. The present work proposes a solution for the constant problems of water wasting in agriculture. It also exposes all the irrigation method, comparing their advantages and disadvantages. From such comparison it is concluded that drop irrigation is the method that offers more benefits. In the present document it is also exposed how the constant practice of single cropping has negative repercussions: eroding and degrading the soil; contaminating chemically; and generating biodiversity loses. Thus it is proposed the practice of multiple cropping, commonly used by our ancestors, and which provides numerous benefits as: the promotion of biological diversity; the protection against economical loses due to plagues; and alimentary safety. It is also recommended the usage of greenhouses, or protected conditions, for crops, mixing them with the benefits of multiple cropping and the usage of the correct irrigation system for the production system. The present work combines different technologies with the objectives of optimizing the irrigation installment, and providing the adequate conditions to plants for their growth. The present automated irrigation system consists of electronic boards designed for PIC18f2550 (Microchip, 2009) for the data acquisition from 4 matrix potential sensors each; signal conditioning systems for eac sensor; a master control with an FPGA Spartan 3; an Xbee wireless communication protocol; and a PC interface, where are shown the measurements of the system.

(Key words: Matrix potential, protected agriculture, green house, FPGA, PIC, Xbee)

*A mi mami y papi,
Por su amor y apoyo incondicional.*

*♥ A Cristabel, Idania y Mairelin
Por ser más que hermanas, mis mejores amigas!!*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a mis padres que a lo largo de mi vida me han brindado su cariño, comprensión y apoyo en todo momento. Por enseñarme a ser perseverante y tener constancia para cumplir las metas que me he propuesto. Efectivamente han educado con el ejemplo, gracias. A ustedes Migo, Teso0 y Rubia de antemano saben que las amo y sí créanme me ha animado que me estén marcando y marcando, Gracias por estar ahí siempre.

A toda mi familia, tíos y primos, que no pongo sus nombres porque son bastantes xD jojojo pero gracias porque aunque están lejos me hacen sentir querida, pero especialmente a mis abuelos: papa Pedro extraño platicar contigo, se que estarías muy contento de ver que por fin culmine mis estudios. Mama Eva aunque seas medio enojonsilla también te quiero y me divierte hablarte para echar chisme jejeje. Papa Manuel y mama Kika, sin palabras pues ocupan un lugar muy especial en mi corazón. A todos ustedes les doy las gracias porque siempre han estado al pendiente de mi bienestar.

A mis amigos por formar parte de mi vida, gracias por acompañarme en los mejores momentos que he pasado y porque no en los malos ratos que también tuvimos.

A mi asesor Alejandro Espinosa Calderón (jaja) por guiarme durante el desarrollo de este proyecto, por ser antes que mi director de tesis un AMIGO. Gracias!! por aguantar mis berrinches.

A los doctores Irineo Torres y Ramón Guevara, le agradezco me han hayan dado un lugar en su grupo de trabajo y proporcionado los medios para que desarrollara mi proyecto de tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado durante mis estudios de maestría (Núm. de beca: 349731).

Al Fondo de Investigación de la Facultad de Ingeniería FIFI-UAQ 2011 (FIN201116) por su apoyo económico para este proyecto.

INDICE DE CONTENIDO

Resumen	iii
Abstract	iii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iiiv
Indice de tablas	viii
Indice de figuras	iiix
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción del problema	3
1.2. Justificación	4
1.3. Hipótesis y Objetivos	5
1.3.1. <i>Hipótesis</i>	5
1.3.2. <i>Objetivo General</i>	5
1.3.3. <i>Objetivos Específicos</i>	5
II. REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1. Policultivo.....	6
2.2. Irrigación	7
2.2.1. Requerimientos hídricos de las plantas	10
2.3. Automatización	12
2.4. Tipos de control	12
2.5. Dispositivos de control	13
2.6. Tipos de actuadores	14
2.7. Tipos de sensores	15
2.8. Desarrollos tecnológicos previos	16

III. METODOLOGÍA.....	17
3.1. Ambiente experimental	17
3.2. Variedad de las plantas seleccionadas.....	17
3.3. Método de irrigación seleccionada	18
3.4. Tipo de control seleccionado	18
3.5. Dispositivo de control seleccionado.....	18
3.6. Actuadores seleccionados.....	18
3.7. Sensores seleccionados.....	18
3.8. Metodología a seguir	19
3.8.1. <i>Caracterización del suelo</i>	22
3.8.2. <i>Topología del policultivo</i>	25
3.8.3. Plano de instalación de sistema de irrigación.....	25
3.8.4. Cálculos del Sistema de Riego	27
3.8.5. Adquisición de datos del sensor	36
3.8.6. <i>Comunicación inalámbrica</i>	37
3.8.7. <i>FPGA control</i>	38
3.8.8. <i>Etapa de potencia</i>	43
IV. RESULTADOS	44
4.1. Caracterización del suelo.....	44
4.2. Curva característica del sensor	44
4.3. Instrumentación	46
4.4. Interfaz gráfica	47
4.5. Etapa de potencia.....	51
4.6. Sistema mecánico irrigación	52

V. CONCLUSIONES	55
5.1. Trabajo a futuro	56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 2. 1 Factores que afectan la selección del método de riego.....	9
Tabla 2. 2 Estados de desarrollo crítico a la falta de agua.	12
Tabla 3. 1 Datos de peso para el cálculo de capacidad de campo:	23
Tabla 3. 2.- Cálculo de las pérdidas	30
Tabla 3. 3 Configuración módulos XBee	38
Tabla 4. 1 Obtención de la CC y DA	44
Tabla 4. 2 Caracterización del datalogger	45
Tabla 4. 3 Relación voltaje-potencial mátrico	46

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 3. 1 Invernadero donde se planea realizar el experimento.....	17
Figura 3. 2 Diagrama de flujo general del proceso.....	20
Figura 3. 3 Diagrama a bloques del proceso de adquisición de datos	21
Figura 3. 5 Pesado de la muestra	22
Figura 3. 4 Secado del suelo.....	22
Figura 3. 6 Drenado de las muestras	23
Figura 3. 7 Topología del policultivo.....	25
Figura 3. 8 Plano del sistema de riego y el acomodo de los cultivos en el invernadero	26
Figura 3. 9 Etapa de acondicionamiento de señal para un sensor de 0-5 volt	36
Figura 3. 10 Tarjeta pic18f2550.....	37
Figura 3. 11 Tarjeta módulo XBee.....	38
Figura 3. 12 Etapa de adquisición de datos	39
Figura 3. 13 Etapa de promedio	39
Figura 3. 14 Máquina para controlar el protocolo RS232	40
Figura 3. 15 Diagrama a bloques del receptor	41
Figura 3. 16 Diagrama a bloques del receptor	42
Figura 3. 17 Diagrama de unión del protocolo RS232 a la etapa del ADC.....	42
Figura 3. 18 Diagrama eléctrico de la etapa de potencia para activar bombas	43
Figura 4. 1 Caracterización del sensor (Cbar vs Hz).....	44
Figura 4. 3 Instrumentación del sistema.....	46
Figura 4. 2 Curva característica del datalogger.....	46
Figura 4. 4 Página de inicio de la interfaz	47
Figura 4. 5 Gráfica potencial mátrico del canal utilizado para chile.....	48
Figura 4. 6 Gráfica potencial mátrico del canal dedicado para tomate.....	49
Figura 4. 7 Gráfica cada canal dedicado para tomate.....	50
Figura 4. 8 Tarjeta XBee para PC	50
Figura 4. 9.- Circuito de potencia	51

Figura 4. 10.- Instalación de actuadores	52
Figura 4. 11.- Contenedor de gua	53
Figura 4. 12.- Líneas de riego	54
Figura 5. 1 Descripción del método a utilizar para dosificar agua y nutrientes.....	57

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura (del latín *agri*, 'campo o tierra de labranza' y *cultūra*, '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). La agricultura ha evolucionado desde el cultivo a cielo abierto hasta los modernos invernaderos de hoy en día.

Los invernaderos son estructuras empleadas para proteger cultivos, 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 microclimas artificiales ideales para aumentar los rendimientos agrícolas, sin importar las condiciones ambientales externas (Bastida, 2006).

En la agricultura se distinguen 3 etapas básicas que son la siembra, el riego y la recolección. Se piensa que el riego y la agricultura comenzaron contemporáneamente, con el fin de aumentar la producción de alimentos. El uso de riego fue reportado por primera vez en las llanuras de inundación de los ríos Nilo, Éufrates, Tigris y valles fluviales, cuando florecieron las antiguas culturas egipcia y mesopotámica. Posteriormente, otros lugares agrícolas regados aparecieron en Mesoamérica, el oeste de África, y el sureste asiático, entre Malasia y la costa este de la India (Inzunza-Ibarra *et al.*, 2005).

En 1848 se crearon en México las primeras presas en el sureste de Coahuila y en la parte noroeste de Durango. Gracias a esto se dieron las primeras aplicaciones de riego fuera de temporada de lluvias, por lo que esta región se convirtió en el área agrícola más productiva de México en esa época (Meyers, 1994).

El agua es un recurso natural escaso, no renovable, irremplazable, no extensible por la mera voluntad del hombre, irregular, vulnerable, pasible de uso continuo, indispensable para la vida y para el ejercicio de la inmensa mayoría de las actividades económicas. Es por esto que, en la agricultura, es indispensable ser

eficientes en la distribución, conducción y aplicación del agua para así evitar su sobreexplotación (Ángeles, 2002).

Existen diversos tipos de irrigación tales como el riego por surcos o infiltración, por inundación, aspersión, subterráneo y por goteo. Los sistemas de irrigación con más ventajas son el método de irrigación subterráneo y el riego por goteo. Es importante controlar la cantidad de agua que se le aplica a cada planta porque la sobreirrigación incrementa la pérdida de nutrientes por lixiviación y puede reducir el rendimiento y la calidad del fruto (Sierra, 2007).

El riego puede apoyarse en sistemas mecánicos integrados por actuadores como bombas eléctricas, bombas de combustión interna, ventiladores y motores de ambos tipos. Los sistemas de automatización para censar y controlar sistemas de riego, están integrados por dispositivos semiautomatizados y automatizados como temporizadores o relojes que controlan bombas y otros componentes de riego (Bastida, 2006).

Los sistemas de policultivos giran alrededor de la necesidad de producir biodiversidad de alimento; y se caracterizan por la diversidad de especies de plantas y la integración de éstas con los animales y los humanos. Una de las principales razones por la cual los agricultores a nivel mundial se decidieron por sembrar policultivos, es que frecuentemente se obtiene un mayor rendimiento en una determinada área sembrada como policultivo que en una equivalente sembrada como monocultivo.

En la actualidad, aún cuando la tecnología usada en los sistemas de riego es muy avanzada, los sistemas de irrigación automatizados están diseñados para el monocultivo, ya que los agricultores así lo demandan, además de que la práctica del policultivo no es muy común en los invernaderos ni a cielo abierto. (Gutierrez *et al.*, 2007). Algunos ejemplos de sistemas automatizados de riego para monocultivo son medir la conductividad eléctrica del suelo, o usar como indicador la diferencia de temperatura entre la hoja y el aire (Noble *et al.*, 2000).

De acuerdo con todos estos hechos, surge la necesidad de diseñar un sistema de irrigación para policultivo que provea a las plantas de los requerimientos hídricos necesarios para su adecuado desarrollo, y que evite las pérdidas que se tienen actualmente de este recurso natural indispensable para la vida.

1.1. Descripción del problema

Las UPR (Unidades de Producción Rural) en México se encuentran en crisis económica. Esto es causado, entre otras cosas, por la ineficiencia en el uso del agua. Aproximadamente el 85 % de las UPR, tienen un tamaño que va de 2 a 5 hectáreas (ha), y su producción genera ingresos decrecientes. Su fragilidad económica se ha acentuado por el monocultivo y porque han desaparecido productos del ganado y sus derivados que formaban parte del consumo familiar. Para los agricultores existe un alto riesgo en el mercado ya que los niveles de producción obtenidos pueden llegar a no ser rentables con el manejo del monocultivo, debido a las pérdidas por plagas y enfermedades.

Aproximadamente el 56 % de la superficie de México es semidesértica y por otro lado la superficie potencial de riego en función de la aptitud de la tierra es de 13.5 millones de hectáreas, que se reducen a 9.8 millones si se tiene en cuenta la disponibilidad de agua.

Además, del agua que se extrae y se destina a la agricultura (61.2 km^3), sólo se usa aproximadamente el 65% (SEMARNAT, CNA, 2008). De este último porcentaje se aprovecha, infiltrándose en suelo objetivo aproximadamente el 51% (Palacios-Vélez, 2008). Por último, como la mayor parte de la extensión agropecuaria se riega superficialmente, las pérdidas por evaporación son de alrededor del 40-60% con relación al riego por goteo. Por lo tanto la cantidad de agua aprovechada es aproximadamente de 9.95 km^3 , lo que equivale al 16% del total inicial.

Para el caso de los policultivos, cuando la dosificación del agua se dificulta debido a que los requerimientos nutricionales de cada planta son distintos. El rendimiento de dichos cultivos disminuye proporcionalmente al déficit de humedad

que padezcan, pudiendo llegar a marchitarse y a morir prematuramente si la escasez de agua se prolonga. Por otra parte, cuando la cantidad de agua que reciben es excesiva y el sobrante no puede drenarse fácilmente, también se afecta el rendimiento, que puede ser nulo si la humedad impide la respiración de las raíces. Esta problemática se mantiene porque en la actualidad no existe tecnología de riego específica para policultivo.

1.2. Justificación

Para que las UPR en México sean sustentables y tengan un mejor aprovechamiento de los recursos naturales, se deben reducir los riesgos a los que está expuesto el productor por efecto de mercado y de daños por plagas cuando éste utiliza monocultivo. Además, se requiere la producción de varios cultivos (policultivo) en un solo invernadero simultáneamente. De esta manera se toma ventaja de las propiedades que el policultivo lleva consigo: la dieta familiar dependiente de la UPR es menos vulnerable; se puede contribuir al mercado regional o de la comunidad con varios productos simultáneamente reduciendo el riesgo del ingreso externo y se contribuye al equilibrio biológico del suelo.

También, es necesario reducir el porcentaje del volumen de agua que se utiliza actualmente para la producción primaria en México. Un elemento relevante para conseguir esto es el hecho de que los espacios para el proceso productivo en la UPR deben estar en condiciones protegidas (invernaderos), método que evitará el desperdicio de agua por evaporación y contribuirá a la generación de recursos crecientes para éstas. Conjuntamente es imprescindible la utilización de un sistema de irrigación que permita suministrar a las plantas sólo el agua que éstas requieran para su desarrollo adecuado.

Como consecuencia de todo lo dicho anteriormente, se concluye que es necesario diseñar un sistema de riego automatizado capaz de cubrir los requerimientos hídricos de cada especie del policultivo, con el fin de un óptimo aprovechamiento acuífero, ya que los cultivos no sólo requieren de diferentes cantidades de agua, sino que la aplicación de ésta debe dosificarse adecuadamente

durante el tiempo que dura el ciclo vegetativo, desde la siembra hasta la maduración.

1.3. Hipótesis y Objetivos

1.3.1. Hipótesis

Un sistema automatizado de irrigación para policultivo permite suministrar la cantidad necesaria de agua, según la literatura, para el desarrollo adecuado de las diferentes especies que lo conformen.

1.3.2. Objetivo General

Desarrollar un sistema de irrigación automatizado para policultivo en invernaderos, que provea a las plantas la cantidad de agua necesaria, según la literatura, para su desarrollo adecuado.

1.3.3. Objetivos Específicos

- Determinar los requerimientos hídricos, según la literatura, de los cultivos a utilizar. Con esto se podrán determinar los puntos y cantidades de riego para proporcionarle lo necesario para su desarrollo adecuado.
- Investigar características de los sensores existentes para medir potencial mátrico, con la finalidad de seleccionar y utilizar el más apropiado.
- Caracterizar el sensor de potencial mátrico seleccionado, para diseñar el sistema de adquisición de datos.
- Investigar los tipos de actuadores de riego, para seleccionar los que se utilizarán.
- Desarrollar un controlador que reciba información de los sensores para regular la cantidad de agua aplicada al cultivo.
- Realizar pruebas de monitoreo y riego.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Policultivo

La asociación de cultivos, o policultivo, en México ha sido una práctica en la agricultura tradicional que se ha llevado a cabo desde la época prehispánica. Es la nuestra una cultura ancestral cimentada en la domesticación de diversas plantas como maíz, frijol, chile, tomate y calabaza. Estas plantas se siembran entreveradas en parcelas con cercos de magueyes o nopales, donde a veces también crecen ciruelos, guayabos o capulines silvestres y donde se recogen quelites (Bartra, 2009; Gómez-Rodríguez y Zavaleta-Mejía, 2001). La asociación de cultivos promueve una mayor diversidad biológica, la dieta familiar dependiente de la UPRIS es menos vulnerable, se concurre al mercado regional o de la comunidad con varios productos, disminuye el riesgo de pérdida total de la cosecha, mejora el uso de los recursos naturales, proporciona protección contra daños de plagas y enfermedades, debido a los diferentes niveles de resistencia de las variedades y a los genes responsables de la resistencia (Gómez-Rodríguez y Zavaleta-Mejía, 2001; Askegaard *et al.*, 1999; Bartra, 2009; Cobos-Castro *et al.*, 2009). La topología en el policultivo tiene efecto sobre la sanidad, sobre las variables de vigor y crecimiento, por lo que se requiere más trabajo al respecto (Cobos-Castro, 2009).

El establecimiento de diferentes cultivos asociados no es una práctica agrícola compatible con la agricultura moderna extensiva y basada en el monocultivo. El desvanecimiento del múltiple cultivo en un predio empezó con el empleo de máquinas e insumos de síntesis química. Dichos recursos terminan por hacer de la tierra un simple sustrato estéril dependiente de los fertilizantes sintéticos (Gómez-Rodríguez y Zavaleta-Mejía, 2001; Loya-Ramírez *et al.*, 2003; Bartra, 2009; García-Hernández *et al.*, 2009).

La misión fundamental de la agricultura es la producción de materias primas y alimentos en cantidad y calidad suficiente para atender las necesidades de la población mundial en constante aumento (García-Hernández *et al.*, 2009). Al cultivo múltiple también se le llama agricultura de subsistencia. Los agricultores que utilizan

este método diversifican el número de cultivos en su granja para protegerse económicamente (Kolawole, 2009). El desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías sistemas de policultivo resulta prometedor para aumentar la producción de alimentos (Ayoola y Makinde, 2008). Los sistemas de cultivo múltiple son particularmente frecuentes en las fracciones reducidas de terreno por pequeños productores, donde son medios para aumentar la eficiencia o la utilización de los recursos, que incluyen la tierra, el agua y la radiación solar (Gómez-Rodríguez y Zavaleta-Mejía, 2001; Ayoola y Makinde, 2008).

Ningún pueblo se sustenta sólo en un cereal, pues todos son nutricionalmente limitados. La reivindicación del policultivo es una lucha contra el hambre y la emigración, un combate por la soberanía alimentaria y por la soberanía laboral (Bartra, 2009).

2.2. Irrigación

Uno de los más importantes usos del suelo por el hombre ha sido la agricultura. Desde la antigüedad, los pueblos nómadas se han establecido en lugares cercanos a ríos y con buena tierra para producir alimentos. Se cree que la primera granja comenzó nueve o diez mil años atrás (Inzunza-Ibarra y Monger, 2005). Se piensa que el riego y la agricultura comenzaron aproximadamente en el mismo tiempo para aumentar la producción de alimentos. El uso de riego fue reportado por primera vez en las llanuras de inundación de los ríos Nilo, Éufrates, Tigris y valles fluviales cuando florecieron las antiguas culturas egipcia y mesopotámica. Otros lugares agrícolas independientes aparecieron más tarde en Mesoamérica, el oeste de África, y el sudeste asiático, entre Malasia y la costa este de la India (Dunigan, 1969).

En México, en el año de 1848, los planes de Zuloaga, Jiménez, y Flores fueron muy importantes para el desarrollo del área agrícola más productiva del país, localizada en el sureste de Coahuila y en la parte noroeste de Durango. Ellos crearon las primeras presas (Meyers, 1994). Posteriormente en 1895, se constituyó la Comisión Federal del Agua para regular los sistemas de riego (Inzunza-Ibarra y

Monger, 2005). Más tarde con el reparto agrario, se realizaron las primeras construcciones hidráulicas y aunado a esto se han venido desarrollando una serie de métodos para la aplicación del agua en los cultivos, dentro de los cuales podemos mencionar los siguientes: por inundación, surcos, infiltración, subterráneo, aspersion, o por goteo (Goyal *et al.*, 1990). En la selección de un sistema de riego deben tenerse en cuenta los aspectos que se mencionan en la tabla 1.

Los métodos de riego por gravedad se usan en México en 92% del área bajo riego, y puede ser riego por inundación o por surcos (Palacios, 2002).

Es esencial desarrollar el plan de irrigación más adecuado para conseguir el mejor rendimiento posible de las plantas en diferentes regiones ecológicas. El consumo de agua de las plantas depende mayormente de su crecimiento, el suelo, las condiciones climáticas (Ertek *et al.*, 2002), su especie y su etapa de crecimiento (desde la siembra hasta la cosecha) (Ertek *et al.*, 2004).

Para evitar el déficit de agua, Mario *et al.* (1997) recomiendan mantener el suelo con una cantidad de ésta mayor al 65% de su capacidad de retención. La falta de agua del suelo requerida en la cosecha puede dar lugar a frutos deformes, y el exceso de ésta puede agravar las enfermedades de raíz y tallo (Richard *et al.*, 2002; Papadopoulos and Tan, 1991).

El consumo de agua en invernadero se estima, aproximadamente, en 1 m³/m² por año. Esta cifra incluye el agua requerida por la planta para cubrir sus necesidades fisiológicas y un porcentaje adicional de agua en exceso (20- 30%) para el lavado de sales del suelo o sustrato. Las variables fundamentales de calidad del agua de riego son: su acidez o alcalinidad (valorada por su pH), el contenido total de sales (medido por la conductividad eléctrica CE), el contenido en sodio y cloruros, la presencia de metales pesados y la concentración de microorganismos (Rodríguez *et al.*, 1999).

Tabla 2. 1 Factores que afectan la selección del método de riego

Método de Aplicación	La pendiente del terreno	Velocidad de infiltración	Tolerancia al agua de los cultivos	Efecto del viento
Gravedad	Preferentemente la superficie debe estar nivelada o trabajada según curvas de nivel, pendientes de 0 a 1 %	No se recomienda para suelos con velocidad de infiltración mayor de 6.5 cm por hora	Adaptable a la mayoría de los cultivos. La humedad en la raíz puede afectar a los muy sensibles	No afecta en forma significativa la eficiencia de aplicación
Aspersión	Adaptable a terrenos nivelados o desnivelados con pendientes variables	Se adapta a cualquier velocidad de infiltración del suelo	Puede propiciar la caída de flores y enfermedades en algunos frutales	Afecta considerablemente la eficiencia de aplicación
Micro-aspersión	Adaptable a todo tipo de pendiente	Adaptable a todas las velocidades de infiltración	Puede propiciar el desarrollo de algunas enfermedades fungosas	Puede afectar la eficiencia de aplicación pero menos que en la aspersión
Goteo	Adaptable a todo tipo de pendiente	Adaptable a todas las velocidades de infiltración	Sin problemas	No afecta
Subirrigación	El área debe estar nivelada o con curvas de nivel	Adaptable a suelos con buena capilaridad	Adaptable a la mayoría de los cultivos	No afecta

La actividad del agua depende del efecto osmótico, la presencia de solutos y del potencial matricial. El potencial osmótico representa la disminución de la capacidad de desplazamiento del agua debido a la presencia de solutos. A medida que la concentración de solutos aumenta, el potencial osmótico es más negativo, el agua tiende a fluir menos libremente. El potencial matricial representa el grado de retención del agua debido a su interacción con matrices sólidas y coloidales (Lira-Méndez and Mayek-Pérez, 2006). El potencial de crecimiento de los cultivos está determinado por una variedad de características bajo condiciones ambientales óptimas. El impacto de la limitación de disponibilidad de agua en el crecimiento de las plantas a menudo se ha apreciado en relación con el potencial hídrico; el potencial hídrico está dado por la suma de los potenciales osmótico, matricial, gravitatorio y de presión. Aumentar el potencial mátrico en el suelo ha demostrado tener efectos negativos sobre la conductancia estomática, tasas de fotosíntesis de la hoja, expansión y crecimiento de la raíz (Imhoff *et al.*, 2010). El potencial mátrico del suelo varía entre profundidades debido al efecto de la lámina de riego o lluvia y el acolchado plástico, y son mayores cuando el cultivo se cubre con acolchado plástico que sin acolchado (López-López *et al.*, 2010).

La disponibilidad de humedad en la zona radical está directamente relacionada con la interacción de numerosos procesos físicos en el suelo y procesos fisiológicos en la planta (Papadopoulos and Tan, 1991). La adaptación al estrés requiere un gasto de energía adicional, la planta recurre a sus reservas de energía por lo que interrumpe su crecimiento y desarrollo para adaptarse a dicho estrés. El límite permisible de abatimiento de humedad en el suelo depende de la sensibilidad de la variedad para tolerar el déficit de humedad; es decir, cada cultivo tiene requerimientos hídricos distintos. Los cultivos de la dieta familiar de la población mexicana son: Chile (*Capsicum annuum*), Tomate (*Lycopersicum esculentum*), Maíz (*Zea mays*) y Frijol (*Phaseolus vulgaris*) (Bartra, 2009).

2.2.1. Requerimientos hídricos de las plantas

Las plantas como frijol, maíz, tomate y chile son claves en la dieta diaria de países como Brasil, China, Holanda, India, España, Estados Unidos y México.

Aunque estos son los cultivos más abundantes en el mundo, en términos de volumen, el maíz es el número uno. Esto se debe a una larga cantidad de productos obtenidos del maíz, los cuales son consumidos por humanos, animales y la industria (FAOc, 2012). Los requerimientos hídricos para cada cultivo son descritos a continuación.

La etapa más sensible del frijol al déficit de humedad se registra durante la floración y fructificación, esta situación origina una disminución del rendimiento del 35 al 69%, además a un suelo sembrado con el cultivo frijol se le debería de aplicar agua cuando el potencial hídrico sea menor a 70 cbar, ya que los rendimientos del cultivo se ven afectados si se suministra cuando se encuentra por encima de esta tensión (Wagner *et al.*, 1989). Es favorable suministrar el agua a una tensión de 45 cbar, para este cultivo Mora_a (2004) recomienda una lámina de riego de 1.5 a 2.0 cm (150 a 200 m³). La raíz principal puede medir entre 17-29 cm (Ontiveros-Cortés *et al.*, 2005).

Para el caso del maíz el riego se debe iniciar a una tensión de 60 cbar (Imhoff *et al.*, 2010) y se recomienda una lámina promedio de 1.5 a 2.0 cm (150 a 200 m³) (Mora_b, 2004).

En lo que concierne al tomate el riego se debe iniciar a una tensión de 20–30 cbar (León *et al.*, 2005) y se requiere alrededor de 2-1 litro/planta/día (Rodríguez *et al.*, 1996), la raíz del tomate mide alrededor de 0.15-1 m (Singh *et al.*, 1989; Machado and Oliveira, 2005; Sainju *et al.*, 2000).

Por otra parte dentro de las cinco especies cultivadas de los chiles, *Capsicum annuum* L. es la más ampliamente conocida y la de mayor importancia económica, ya que presenta una distribución mundial. El centro de origen y/o domesticación del chile es propiamente México y Guatemala (Montes-Hernández *et al.*, 2004). Este comúnmente presenta una profundidad de raíz de 0.5m (Hulugalle and Willatt, 1987) y es recomendable suministrarle el agua cuando la tensión de humedad de suelo este entre 35-60 cbar (Burt, 2008; Palada and O’Keefe, 2001).

Tabla 2. 2 Estados de desarrollo crítico a la falta de agua.
(Modificada de Vuelvas *et al*, 1993.)

Cultivo	Estado de desarrollo crítico
Chile	Inicio de fructificación
Frijol	Floración. Desarrollo y llenado de vaina.
Jitomate	Floración. Formación de flores y crecimiento rápido de frutos. Cierre del cultivo.
Maíz	Diferenciación de órganos reproductivos. Floración. Estado lechoso y masoso del grano.

2.3. Automatización

La automatización consiste en incorporar a un proceso, un conjunto de elementos y dispositivos tecnológicos que aseguren su control y buen comportamiento. Sus objetivos 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, 1999).

2.4. Tipos de control

Control On-off: En la regulación todo-nada la válvula de control adopta únicamente dos posiciones: abierta o cerrada (Creus, 2005). Este método de control es económico, fácil de implementar y utilizado en numerosas aplicaciones en la industria.

Control Proporcional: Amplifica o atenúa el error de regulación a través de una ganancia de proporcionalidad, k_p (Angulo *et al.*, 2004). En el control proporcional de una planta (módulo a controlar) hay un error en estado estacionario o desplazamiento (offset), en la respuesta para una entrada escalón (Ogata, 2003).

Control Integral: Acumula a lo largo del tiempo el error de regulación, que pondera a través de un parámetro K_i (Angulo *et al.*, 2004). Aunque elimina el offset puede conducir a una respuesta oscilatoria (Ogata, 2003).

Control Derivativo: Considera de forma puntual el incremento del error de regulación, ponderado a través del término k_d (Angulo *et al.*, 2004). Prevé el error,

inicia una acción correctiva oportuna y tiende a aumentar la estabilidad del sistema (Ogata, 2003).

Control Proporcional-Integral: Sustituye al controlador proporcional para eliminar el offset, siempre y cuando el sistema de control sea estable (Ogata, 2003).

Control PID: El control PID reúne las tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D) que se han visto anteriormente. La acción proporcional estabiliza la oscilación natural de la variable controlada. Elimina además el grado de inestabilidad introducido por las acciones integral y derivativa; la acción integral proporciona una corrección o reajuste para compensar las variaciones de carga y mantener la variable controlada sobre el punto de consigna; la acción derivativa anticipa el efecto de la proporcional con el fin de estabilizar más rápidamente la variable controlada después de cualquier cambio en el proceso (Acedo, 2003).

Redes Neuronales: Las redes neuronales artificiales o ANS (artificial neural systems), mediante un estilo de computación paralelo, distribuido y adaptativo, son capaces de aprender a partir de ejemplos. Estos sistemas imitan (esquemáticamente) la estructura hardware (neuronal) del cerebro para tratar de reproducir algunas de sus capacidades (Martín del Brío *et al.*, 2007).

Sistemas Difusos: Los sistemas difusos (fuzzy systems) se introducen para manejar eficazmente conceptos vagos e imprecisos como los empleados en la vida cotidiana, y que nuestro cerebro está acostumbrado a tratar. Estos sistemas llevan a cabo un tipo de razonamiento aproximado semejante al desarrollado por el cerebro (Martín del Brío *et al.*, 2007).

2.5. Dispositivos de control

Microcontrolador: Dispositivo de bajo consumo de energía, con moderado poder de procesamiento, encapsulado pequeño y diversos periféricos integrados, basado en la arquitectura (Balch, 2003).

FPGA: (*Field Programmable Gate Array*, arreglo de compuertas programables en campo). Este tipo de dispositivo puede contar con unidades que

van desde las 50,000 hasta los 10'000,000 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 (Romero, 2007).

Ventajas del FPGA

- Bajo costo
- Tiempo real
- System on a chip (SoC)
- Prototipos reconfig.
- Tamaño reducido
- Arquitectura paralela

2.6. Tipos de actuadores

Válvulas con obturador de movimiento lineal: En ésta el obturador se mueve en la dirección de su propio eje. Las más importantes son la de globo que se caracteriza por cierre estanco, actuador de mayor tamaño, menores caudales que la de jaula, la dinámica del fluido influye y es adecuada para fluidos corrosivos o erosivos; la de jaula tiene cierre no estanco, resistente a cavitación y poco ruido, menor caudal que la rotativa, más cara y no adecuada para fluidos sucios. Ambas son de apertura rápida (Creus, 2005).

Válvulas con obturador de movimiento rotativo: La *Válvula Bola* tiene mayor rango de apertura, cierre estanco, cierre no estanco a Δp , no adecuada para cavitación y ruido, uso limitado en fluidos corrosivos, buena para sólidos en suspensión y lechadas, mayor capacidad que la de globo. La *Válvula Camflex* tiene buena rangeabilidad, característica lineal y resistente a cavitación. V. *Mariposa* es lineal, económica, difícil cerrarla a Δp , no adecuada para cavitación y ruido, mínimo espacio de instalación (Creus, 2005).

Bombas dinámicas (Centrifugas): Se añade energía de forma continua para aumentar la velocidad del fluido en el interior de la bomba. La velocidad del

fluido disminuye al alcanzar la línea de descarga, y como consecuencia, aumenta su presión (Acedo, 2006).

Bombas de desplazamiento positivo (Alternativas y rotativas): Son capaces de entregar desde cero hasta el flujo máximo. Las capacidades comunes de presión van de 2000 a 4000 psi. Se utilizan para aplicaciones de presión elevada que requieren un envío constante (Mott, 2006).

2.7. Tipos de sensores

Para saber la cantidad de agua que hay en el suelo se utilizan sensores que miden el potencial mátrico en el suelo (SMP) o el contenido volumétrico de agua en el suelo (SWC). En la programación de riego usando mediciones SMP, los valores estándar son fácilmente disponibles para las distintas especies de cultivo con la consideración de fenología del cultivo, demanda atmosférica por evaporación y la textura del suelo. Múltiples sensores de capacitancia a profundidad continuamente miden el SWC, proporcionan datos sobre el suelo, contenido de agua y la dinámica en toda la zona de la raíz. La calibración precisa del SWC es esencial, su uso es menos sencillo para la aplicación de agua en sistemas heterogéneos tales como con riego por goteo (Thompson *et al.*, 2007).

Los sensores de SWC presentan características técnicas favorables pero hay problemas importantes asociados con su aplicación en la granja cuando se usa el umbral recomendado de SWC. Los sensores SMP pueden utilizarse fácilmente con el umbral recomendado pero hay problemas técnicos que influyen en su idoneidad para el uso en la granja (Thompson *et al.*, 2007). En cuestiones económicas, los SMP mucho más baratos que los SWC.

La medición de la humedad del suelo, a través de métodos dieléctricos, está siendo utilizada con mayor frecuencia, debido a que no son destructivos; proporcionan medidas casi instantáneas, requieren poco mantenimiento, puede proporcionar lecturas continuas, no son radiactivos y se logran mediciones precisas. Algunas de las técnicas basadas en métodos dieléctricos han sido clasificadas como reflectometría en el dominio tiempo (TDR), ransmissometry en el dominio del tiempo

(TDT), y la frecuencia de la reflectometría de dominio (FDR) (Cardenas-Lailhacar *et al.*, 2010).

2.8. Desarrollos tecnológicos previos

Durante la investigación se encontraron diversas patentes dentro de las cuales se encuentra la invención de Cohen (1997) quien realizó un dispositivo para regular el flujo, funcionando como un emisor en un sistema de riego por goteo; además *E.I. du pont de nemours and company, design technology and irrigation limited* (2007) diseñó un recipiente para el agua de riego que está formado de distintas superficies y al menos, una de estas, es impermeable al agua en todas sus formas.

III. METODOLOGÍA

3.1. Ambiente experimental

El estudio se planeaba realizar en la localidad de Amazcala, Municipio de El Marqués, Qro., en la mitad de un invernadero de 24 m x 18 m, de dos naves con cubierta de polietileno, policarbonato y malla antiáfidos. Ventanas cenitales y laterales por nave. Con estructura metálica galvanizado. Aunque sí hubo trabajo en las instalaciones del invernadero, por cuestiones de tiempo y disponibilidad de material no se alcanzó a realizar del todo.



Figura 3. 1 Invernadero donde se planea realizar el experimento.

3.2. Variedad de las plantas seleccionadas

Frijol: Variedad Marcela flor de junio.

Chile: Variedad Chilaca (Pasia bardeño).

Maíz: VS220.

Tomate: El Cid.

Estas variedades de plantas fueron seleccionadas debido a la importancia que representan estas hortalizas en la dieta diaria de los mexicanos, además de sus características fisiológicas, las cuales favorecen la topología del policultivo utilizada (Bartra, 2009).

3.3. Método de irrigación seleccionada

El método seleccionado para la realización del proyecto es el de irrigación por goteo, debido a que es el que presenta mayores beneficios y facilita la dosificación (Rodríguez Suppo, 2003).

3.4. Tipo de control seleccionado

El tipo de control seleccionado es el On-Off ya que es sencillo y nos permite un control suficiente para la aplicación.

3.5. Dispositivo de control seleccionado

El dispositivo de control a utilizar es el FPGA, debido a la gran cantidad de entradas-salidas que se pueden controlar simultáneamente.

3.6. Actuadores seleccionados

En cuanto a válvula se utilizarán dos de tipo de bola, ya que es la que presenta mayor ventajas, en comparación con los otros tipos mencionados. La bomba a utilizar es la de desplazamiento positivo.

3.7. Sensores seleccionados

Se utilizarán sensores de potencial mátrico (SMP) marca watermark, ya que son de bajo costo y se encontraban disponibles en la universidad.

Características:

- Alcance desde 0-200 centibares/kPa
- Componentes de estado sólido

- No se disuelve en el suelo
- Correcto hasta en suelo húmedo (por debajo de 50 cbar)
- No es afectado por la temperatura de congelación
- Compensación interna para los niveles de salinidad que se encuentran comúnmente.

Beneficios:

- Produce mejor calidad y rendimiento
- Evita excesiva pérdida de fertilizantes
- Ahorra agua
- Ahorra energía
- Es muy económico, comparado con otros existentes en el mercado.
- Fácil de usar

3.8. Metodología a seguir

Se inicia midiendo el potencial mátrico del suelo utilizando un sensor watermark, si el potencial mátrico está por debajo del punto de marchites temporal se inicia el riego. El riego continua hasta que el potencial mátrico alcanza la capacidad de campo.

El acondicionamiento de señal proporciona una salida de 0 a 5 v referente a un potencial mátrico de 0 a 199 cbar. El circuito de acondicionamiento está formado de una etapa de amplificación con ganancia 4 y un filtro KRC de orden 2 con frecuencia de corte de 10Hz, para eliminar el ruido. Posteriormente se introduce el dato analógico en la tarjeta elaborada para el pic18f2550 en la que se utilizan cuatro canales del convertidor analógico a digital. Se realizaron tres tarjetas por lo que es posible estar tomando lectura de doce sensores a la vez. El pic envía los datos al FPGA cuando recibe el identificador correspondiente. Esto se lleva a cabo de manera inalámbrica a través de los dispositivos Xbee.

El FPGA se encarga de almacenar todos los datos en memoria RAM, posteriormente hace un promedio por tipo de planta entre los datos de las tres

tarjetas, enseguida se envía a la PC igual de forma inalámbrica y se van guardando en archivos de texto (.txt). Paralelo a esto se hace la comparación con un valor ya preestablecido y si la lectura del sensor es mayor al set point establecido entonces se enciende un actuador. La interfaz gráfica desarrollada en Labview es amigable con el usuario, permite graficar el potencial mátrico tanto en centibares como en su equivalente a voltaje, muestra el comportamiento de cada sensor y a su vez el promedio de los canales afines. La interfaz permite monitorear de manera remota las mediciones.

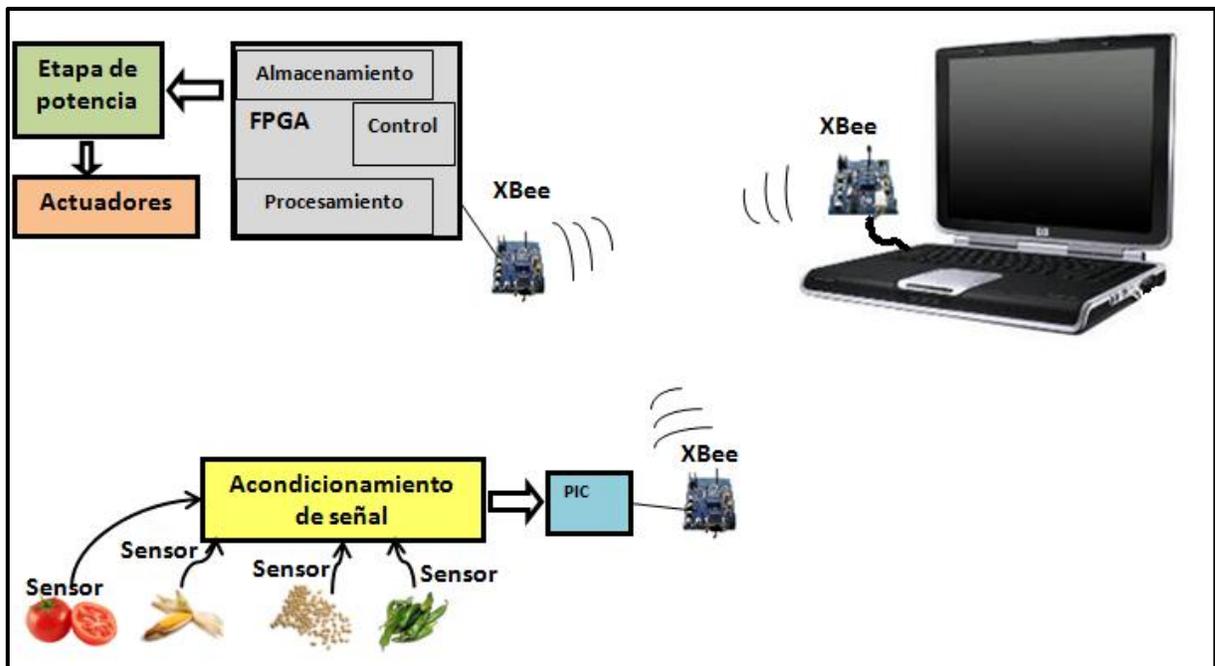


Figura 3. 2 Diagrama de flujo general del proceso

A continuación en la Figura 3.3 se muestra el diagrama a bloques del sistema de adquisición de datos del proyecto, el cual cuenta con tres conjuntos con cuatro sensores cada uno, cuatro circuitos de acondicionamientos de señal, un PIC18F2550 con cuatro canales, un FPGA y un XBee. Además se cuenta con un XBee que recibe la señal de los sensores, se comunica con un FPGA y mediante una etapa de potencia activa los actuadores para iniciar el proceso de irrigación.

Se diseño interfaz gráfica en Labview, en la que se introduce la tensión a la que se debe iniciar el riego de cada cultivo.

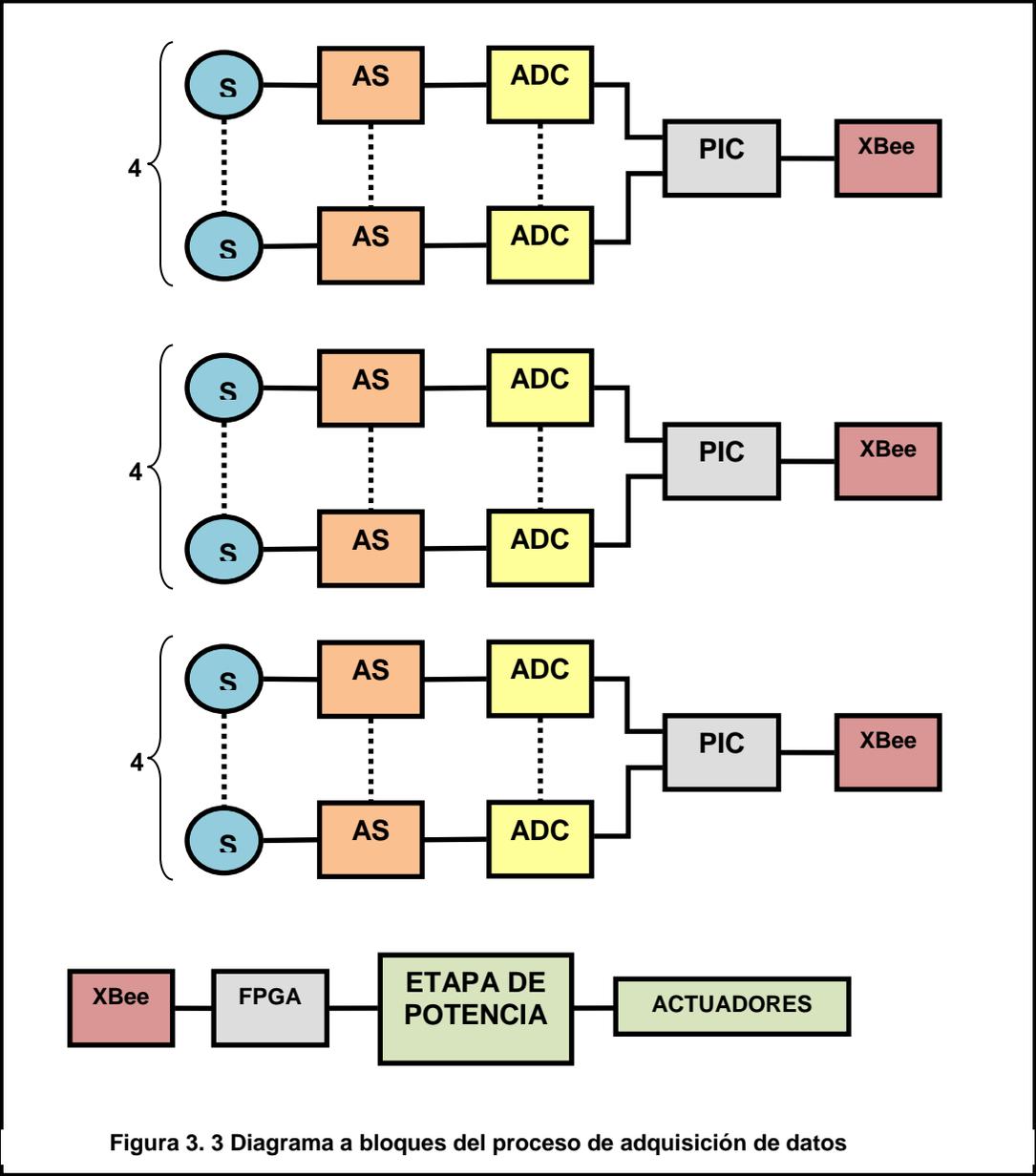


Figura 3. 3 Diagrama a bloques del proceso de adquisición de datos

3.8.1. Caracterización del suelo

Se determinó la capacidad de campo y la densidad aparente de una muestra de suelo de Amazcala. Para realizar dicha práctica se requirió del siguiente material: muestra de suelo, 3 cilindros de PVC, regla, balanza, estufa.

Procedimiento

Martes, 25 de mayo

- a. Secado del suelo (2 kg) en la estufa del laboratorio de hidráulica



Figura 3. 4 Secado del suelo

Miércoles, 26 de mayo

- b. Pesar recipientes vacíos en el laboratorio de suelos fig. 3.5.
- c. Medir recipientes para calcular volumen
- d. Colocar muestra dentro del cilindro, poco a poco e ir consolidando la muestra
- e. Pesar el cilindro con la muestra



Figura 3. 5 Pesado de la muestra

- f. 11 am se colocaron las tres muestras en una cubeta y se lleno de agua a 1/3 de la altura de los recipientes
- g. 1 pm se lleno a 2/3
- h. 3 pm se lleno hasta un cm menos de la altura de los recipientes
- i. 7pm las muestras se sacaron de la cubeta y se pusieron a drenar fig. 3.6.



Figura 3. 6 Drenado de las muestras

Jueves, 27 de mayo

- j. 10:30 am se pesaron las muestras

5. Resultado

Tabla 3. 1 Datos de peso para el cálculo de capacidad de campo:

Recipiente	Peso		
	Recipiente Solo (grs.)	R con Suelo Seco	Después de Drenar
M1	71.5	680.0	1023.4
M1a	71.8	682.0	1021.9
M1b	70.8	637.8	949.6

Altura Cilindro: 15 cm

Diámetro: 3 pulg.

Fórmulas:

$$Vol = \pi r^2 h \quad (3.48)$$

$$Densidad\ Aparente = \frac{W_{Seco}}{Vol} = gr/cm^3 \quad (3.49)$$

$$Cap.\ de\ Campo = \left(\frac{W_{1/3atm} - W_{Seco}}{W_{Seco}} \right) \cdot 100 = \% \quad (3.5)$$

Cálculos:

$$Vol = \pi r^2 h = \pi(1.5 \times 2.54)^2(15) = 684.05cm^3$$

⇒ **Recipiente M1**

$$CC = \left(\frac{1023.4 - 680.0}{680.0} \right) \cdot 100 = 50.5\%$$

$$DA = \frac{680}{684.05} = 0.994079\ gr/cm^3$$

⇒ **Recipiente M1a**

$$CC = \left(\frac{1021.9 - 682.0}{682.0} \right) \cdot 100 = 49.838709\% \quad (3.51)$$

$$DA = \frac{682}{684.05} = 0.997003\ gr/cm^3 \quad (3.52)$$

⇒ **Recipiente M1b**

$$CC = \left(\frac{949.6 - 637.8}{637.8} \right) \cdot 100 = 48.886798\% \quad (3.53)$$

$$DA = \frac{637.8}{684.05} = 0.932387\ gr/cm^3 \quad (3.54)$$

3.8.2. Topología del policultivo

Este esquema es un ejemplo de la topología que se planeaba seguir en la siembra de los cultivos. Este diseño consta de 12 líneas con 88 plantas cada una, por lo que son 1056 plantas en total. De cuales se utilizarán 6 surcos, en cada surco hay dos especies con 44 plantas cada una, lo que da un total de 528 plantas a las que se les suministrará el agua con el sistema propuesto. La Figura 3.7 muestra la topología a utilizar.

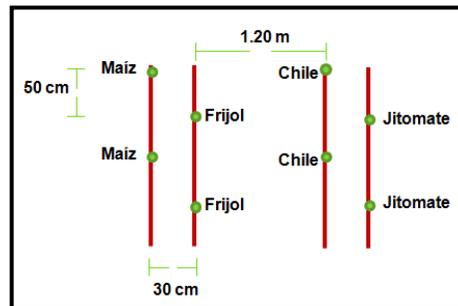


Figura 3. 7 Topología del policultivo

Debido a que se utilizó el potencial mátrico como variable a medir se usaron los sensores antes mencionados. Dichos dispositivos tienen una respuesta lenta (72 hrs.) lo que representa una limitante crítica por la que no se ha podido implementar el sistema en el invernadero. No obstante se tiene la instrumentación necesario para acoplar algún tipo de dispositivo que tenga una respuesta más rápida y bajo el mismo principio de medición.

3.8.3. Plano de instalación de sistema de irrigación

Como se ha venido exponiendo la instalación hidráulica donde se planeaba implementar el sistema sí se realizó, y en la Figura 3.8 se muestra la distribución de los cultivos en el área del invernadero, así como el equipo necesario para el riego. Los círculos de la parte inferior indican los cultivos: el color olivo representa al maíz, el café al frijol, el verde al chile y el rojo al tomate.

En la parte superior de la Figura 3.8 se encuentra la distribución de tanques, bombas, válvulas y tubería requeridos para llevar a cabo la irrigación. El círculo con

el número 1 representa el tanque que contendrá el agua para todos los cultivos, el número 2 contendrá calcio, el 3 será la solución nutritiva para los cultivos que ubicados en la mitad izquierda del invernadero, mientras que los círculos pequeños indican los tinacos con la solución nutritiva para cada uno de los cultivos por separado de la parte derecha del invernadero en la cual se aplicará el sistema de riego expuesto en este proyecto de tesis.

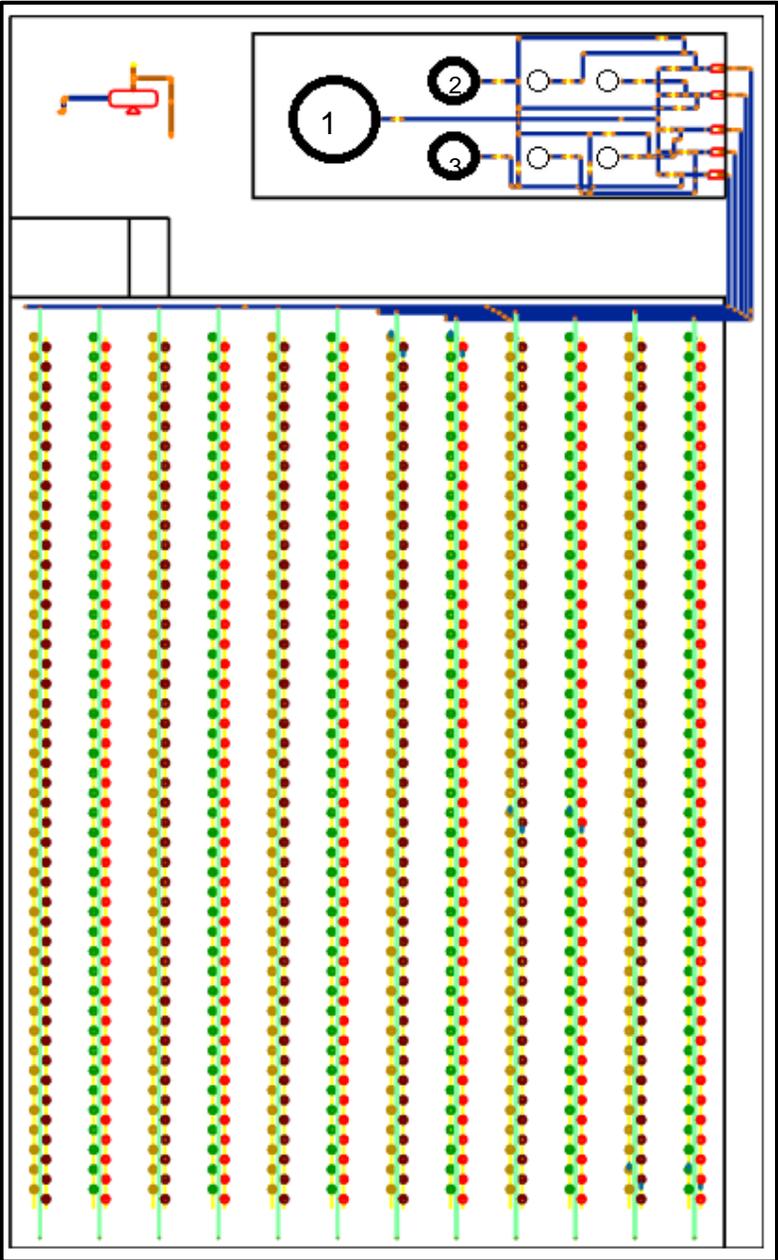


Figura 3. 8 Plano del sistema de riego y el acomodo de los cultivos en el invernadero

3.8.4. Cálculos del Sistema de Riego

A continuación se muestran los cálculos realizados para obtener las dimensiones de los componentes hidráulicos para el sistema de riego, que se instalaron en el invernadero descrito anteriormente.

Cantidad de agua por planta por día:

$$C_a = 2 \text{ Lt/día}$$

Número de emisores por planta (y tipo)

Goteros antidrenantes y compenzantes

$$n_e = 1$$

Caudal del emisor. Considerar los que existen en el mercado:

$$Q_e = 4 \text{ Lt/hr}$$

Densidad de siembra. Depende del cultivo

$$D_s = 3 \text{ plantas por m}^2.$$

Tiempos de riego (t_r)

Necesitamos aplicar 2 Lt/día a cada planta y tenemos un gotero de 4 Lt/hr

$$1 \text{ hr} \rightarrow 4 \text{ Lt} \qquad t_r = \frac{(2)(1)}{4} = 0.5 \text{ hr} \qquad (3.1)$$

$$? \rightarrow 2 \text{ Lt}$$

Total de plantas a regar (T_p) = 132

Espaciamiento entre emisores

$$S_e = 50 \text{ cm}$$

Diseño hidráulico

$$n_{eL} = 44$$

Caudal del emisor $Q_e = 4 \text{ Lt/hr}$

$$Q_e = 4 \frac{\text{Lt}}{\text{hr}} \left(\frac{1 \text{ hr}}{3600} \right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ Lt}} \right) = 0.000001111 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.2)$$

Caudal en cada regante

$$Q_r = n_{eL} Q_e = (44)(0.000001111) = 0.000048884 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.3)$$

Consideraciones iniciales: La velocidad media (V_m) en las tuberías se sugiere no debe ser mayor que 1.5 m/s. Esto obedece a que las pérdidas por fricción son proporcionales al cuadrado de la velocidad y conduce a una pérdida exponencial por fricción.

Cálculo del diámetro de los regantes (D_r)

Considerando que la velocidad media (V_m) no debe ser mayor de 1.5 m/s, proponemos este valor como tope para calcular el diámetro del regante a partir de la ecuación de continuidad.

$$Q = VA \rightarrow Q_r = V_m A_r \quad (3.4)$$

$$A_r = \frac{Q_r}{V_m} = \frac{0.000048884}{1.5} = 0.00003258 \text{ m}^2 \quad (3.5)$$

Para el cálculo del diámetro:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \rightarrow D_r = \sqrt{\frac{4 A_r}{\pi}} \quad (3.6)$$

$$D_r = \sqrt{\frac{(4)(0.3258)}{\pi}} = 0.6440 \text{ cm} \rightarrow 6.44 \text{ mm} \quad (3.7)$$

Este es el diámetro requerido para el regante, sin embargo debemos elegir un diámetro comercial. Elegiremos el de 16 mm es decir:

$$D_r = 16 \text{ mm}$$

A partir de este dato se recalculará la velocidad media en el regante.

$$A_r = \frac{\pi(0.016)^2}{4} = 0.000201 \text{ m}^2 \quad (3.8)$$

$$V_{mr} = \frac{Q_r}{A_r} = \frac{0.000048884 \text{ m}^3/\text{s}}{0.000201 \text{ m}^2} = 0.2432 \text{ m/s} \quad (3.9)$$

Cálculo del diámetro del múltiple (D_m):

El múltiple es la tubería que recibe los regantes. De nuestro esquema determinamos que son tres regantes. Por lo tanto el caudal del múltiple (Q_m) será:

$$Q_m = 3(Q_r) = (3)(0.000048884) = 0.0001466 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.10)$$

Calculamos D_m :

$$A_m = \frac{Q_m}{V_m} = \frac{0.0001466}{1.5} = 0.00009773 \text{ m}^2 = 0.9773 \text{ cm}^2 \quad (3.11)$$

$$D_m = \sqrt{\frac{(4)(0.9773)}{\pi}} = 1.1154 \text{ cm} \quad (3.12)$$

Diámetro requerido para el múltiple. Considerando tuberías comerciales: Se utilizará tubería de 1".

Cálculo de la tubería principal:

Esta tubería llevará el gasto de los tres regantes antes mencionados. Tubería a utilizar es la de 1"=2.54 cm.

Entonces:

$$D_s = 2.54 \text{ cm}$$

$$A_s = \frac{\pi(2.54)^2}{4} = 5.06 \text{ cm}^2 = 0.000506 \text{ m}^2 \quad (3.13)$$

$$V_s = \frac{0.0001466 \text{ m}^2/\text{s}}{0.000506 \text{ m}^2} = 0.2897 \text{ m/s} \quad (3.14)$$

Tabla 3. 2.- Cálculo de las pérdidas

Regante	22m
Múltiple	7.8m
Principal	5m

Cálculo de pérdidas por fricción (hf) y locales (hs):

Regante

Son 44 emisores por cada regante se dividirá en 4 secciones con 11 emisores cada uno. Distancia de 5.5 m

$$Q_{r_{11}} = (11)(0.0000011) = 0.0000121 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.15)$$

$$V_{r_{11}} = \frac{Q_{r_{44}}}{A_r} = \frac{0.0000121 \text{ m}^3/\text{s}}{0.000201 \text{ m}^2} = 0.0601 \text{ m/s} \quad (3.16)$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{(0.0601)(0.061)}{0.000001 \text{ m}^2/\text{s}} = 961.6 \quad (3.17)$$

Viscosidad cinemática

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{961.6} = 0.0665 \quad (3.18)$$

$$hf = f \frac{LV^2}{D 2g} = 0.0665 \frac{(5.5)(0.0601 \text{ m/s})^2}{(0.016)(2)(9.81)} = 0.0042 \text{ m} \quad (3.19)$$

$$hs = 0.00042 \text{ m}$$

2^{da} parte del regante:

$$Qr_{22} = 2Qr_{11} = \left(0.0000121 \text{ m}^3/\text{s} \right) (2) = 0.0000242 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.20)$$

$$Vr_{22} = \frac{Qr_{22}}{Ar} = \frac{0.0000242}{0.000201} = 0.1203 \text{ m/s} \quad (3.21)$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{(0.1203)(0.016)}{0.000001 \text{ m}^2/\text{s}} = 1924.8 \quad (3.22)$$

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1924.8} = 0.0332 \quad (3.23)$$

$$hf = f \frac{LV^2}{D^2g} = 0.0332 \frac{(5.5)(0.1203)^2}{(0.016)(2)(9.81)} = 0.00841 \text{ m} \quad (3.24)$$

$$hs = 0.000841 \text{ m}$$

3^{ra} parte del regante:

$$Qr_{33} = 3Qr_{11} = (3) \left(0.0000121 \text{ m}^3/\text{s} \right) = 0.0000363 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.25)$$

$$Vr_{33} = \frac{Qr_{33}}{Ar} = \frac{0.0000363}{0.000201} = 0.1805 \text{ m/s} \quad (3.26)$$

$$Re = \frac{(0.1805)(0.016)}{0.000001} = 1888 \quad (3.27)$$

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1888} = 0.0338 \quad (3.28)$$

$$hf = f \frac{LV^2}{D^2g} = 0.0338 \frac{(5.5)(0.1805)^2}{(0.016)(2)(9.81)} = 0.0192 \text{ m} \quad (3.29)$$

$$hs = 0.00192 \text{ m}$$

4^{ta} parte del regante:

$$Qr_{44} = 4Qr_{11} = (4)(0.0000121 \text{ m}^3/\text{s}) = 0.0000484 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.30)$$

$$Vr_{44} = \frac{Qr_{44}}{Ar} = \frac{0.0000484}{0.000201} = 0.2407 \text{ m/s} \quad (3.31)$$

$$Re = \frac{(0.2407)(0.016)}{0.000001} = 3851.2 \quad (3.32)$$

Del diagrama de Moody: $f = 0.04$

$$hf = f \frac{LV^2}{D^2g} = 0.04 \frac{(5.5)(0.2407)^2}{(0.016)(2)(9.81)} = 0.040 \text{ m} \quad (3.33)$$

$$hs = 0.004 \text{ m}$$

El múltiple procedemos de manera similar, dividiendo el múltiple en 2 tramos, tenemos:

Primera parte: Solo se tiene el efecto de un regante por lo que $Q_m = Q_r$

$$Q_m = 0.000048884 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$L_m = \frac{9}{2} = 4.5 \text{ m}$$

$$D_m = 2.54 \text{ cm} = 0.0254 \text{ m}$$

$$A_m = 0.00009773 \text{ m}^2$$

$$V_{m_{11}} = \frac{0.000048884}{0.00009773} = 0.5 \text{ m/s} \quad (3.34)$$

$$Re = \frac{(0.5)(0.0254)}{0.000001} = 12\,700 \quad (3.35)$$

$$hf = f \frac{LV^2}{D^2g} = 0.027 \frac{(5.5)(0.5)^2}{(0.0254)(2)(9.81)} = 0.0744 \text{ m} \quad (3.36)$$

$$hs = 0.00744 \text{ m}$$

Segunda parte

$$Q_m \times 2 = 0.000048884 \times 2 = 0.000097768 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.37)$$

$$Qm_9 = 0.000097768 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Vm = \frac{Qm}{Am} = \frac{0.000097768}{0.00009773} = 1.0 \text{ m/s} \quad (3.38)$$

$$Re = \frac{Vm Dm}{Am} = \frac{(1.0)(0.0254)}{0.000001} = 25\,400 \quad (3.39)$$

$$hf = f \frac{LV^2}{D^2g} = 0.024 \frac{(5.5)(1.0)^2}{(0.0254)(2)(9.81)} = 0.264 \text{ m} \quad (3.4)$$

$$hs = 0.0264 \text{ m}$$

Como la línea primaria son del mismo diámetro, entonces:

$$L = 5m$$

$$D = 0.0254m$$

$$A = 0.000506m^2$$

$$V = 0.2898 \text{ m/s}$$

$$Qp = Qm \times 3 = \left(0.000048884 \text{ m}^3/\text{s} \right) \times 3 = 0.00014665 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.41)$$

$$Re = \frac{VD}{V} = \frac{(0.2897)(0.0254)}{0.000001} = 7\,358.38 \quad (3.42)$$

$$hf = f \frac{LV^2}{D^2g} = 0.034 \frac{(5)(0.2898)^2}{(0.0254)(2)(9.81)} = 0.0286 \text{ m} \quad (3.43)$$

$$hs = 0.00286 \text{ m}$$

Cálculos para seleccionar bomba

$$P = \frac{\gamma QH}{\eta} \quad (3.44)$$

$P \rightarrow$ Potencia

$\gamma \rightarrow$ Peso específico del agua

$H \rightarrow$ Energía en el sistema

Donde H es:

$H = (\text{Perdida por fricción} + \text{Perdida local}) + \text{Presión que requiere el gotero}$
+ la carga de velocidad

Carga de velocidad = $v^2/2g$

$$H = 0.865461 \text{ m} + (1.5)(3) = 5.365461 \text{ m} \quad (3.45)$$

$Q \rightarrow$ Caudal

$\eta \rightarrow$ Eficiencia de la bomba

$$P = \frac{(1000 \text{ kg/m}^3)(0.0001466 \text{ m}^3/\text{s})(5.365461 \text{ m})}{0.3} = 2.621 \text{ kg m/s} \quad (3.46)$$

$$P = (9.81) \left(2.621 \text{ kg m/s} \right) = 25.712 \text{ w} = 0.0344 \text{ HP} \quad (3.47)$$

1 Watt = 0.001341022 HP

3.8.5. Adquisición de datos del sensor

Se realizó un sistema de adquisición de datos que consiste en tomar las respuestas entregadas por el sensor de potencial métrico, para lo cual fue necesario hacer una etapa de acondicionamiento de la señal entregada por este; el sensor proporcionaba resistencia y este se adecuo para obtener una señal de 0-5volt. Posteriormente estos voltajes se introducen en una tarjeta diseñada para el pic18f2550 que posee un convertidor analógico a digital de cinco canales, de los que se utilizan cuatro. Este pic además contiene un puerto serial que es utilizado para comunicarse con XBee (comunicación inalámbrica).

El circuito de acondicionamiento (Figura 3.9) está formado por: un amplificador U1A que opera como un seguidor de voltaje; una etapa de amplificación (operacional U1B) con ganancia 4; y un filtro KRC de orden 2 con frecuencia de corte de 10Hz para eliminar el ruido (Opam U1C) (Espinosa-Calderón, 2005).

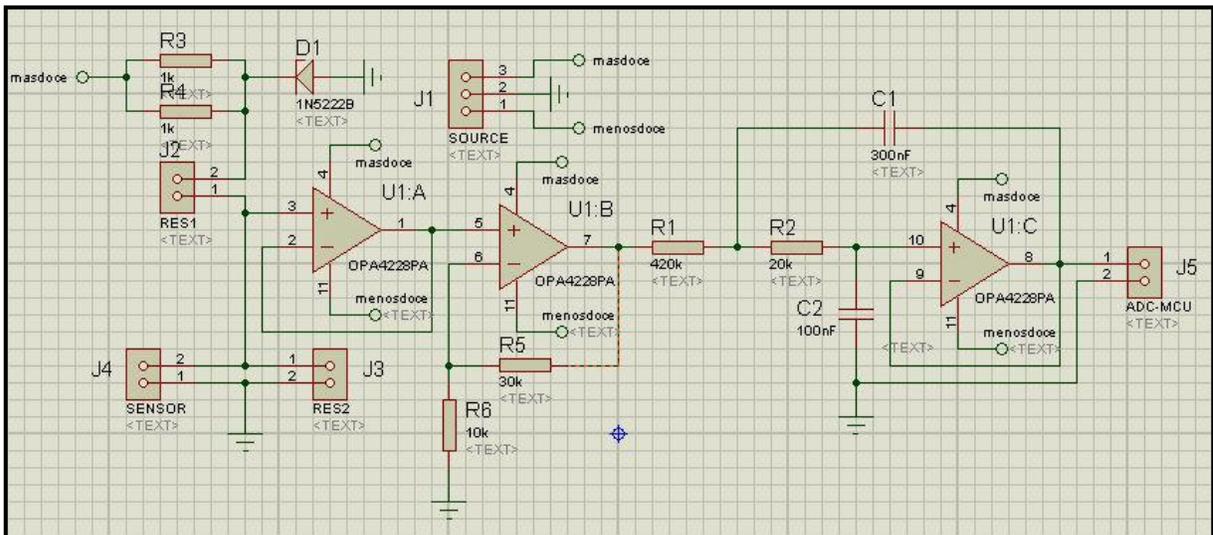


Figura 3. 9 Etapa de acondicionamiento de señal para un sensor de 0-5 volt

Tabla 3. 3 Configuración módulos XBee

Módulo Maestro	
PAN ID	0000
Destination Adress High	FFFF
Destination Adress Low	0
Módulo Esclavo	
PAN ID	0000
Destination Adress High	0000
Destination Adress Low	1

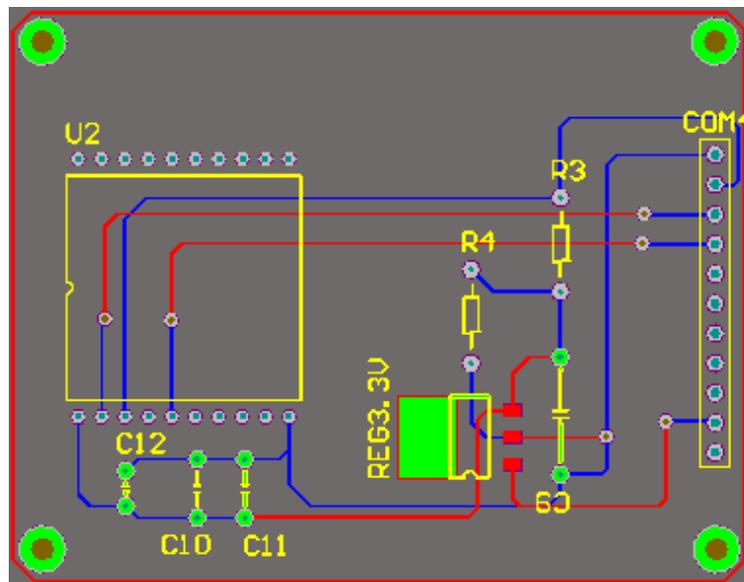


Figura 3. 11 Tarjeta módulo XBee

3.8.7. FPGA control

El núcleo de control se desarrollo en el FPGA, este recibe la lectura de los sensores, se almacenan, se procesan y se toma la decisión de los actuadores a activar (bombas, válvulas). Además los datos son enviados mediante el protocolo rs232 a la interfaz gráfica de Labview. A continuación se muestran los bloques más importantes del proyecto en el fpga:

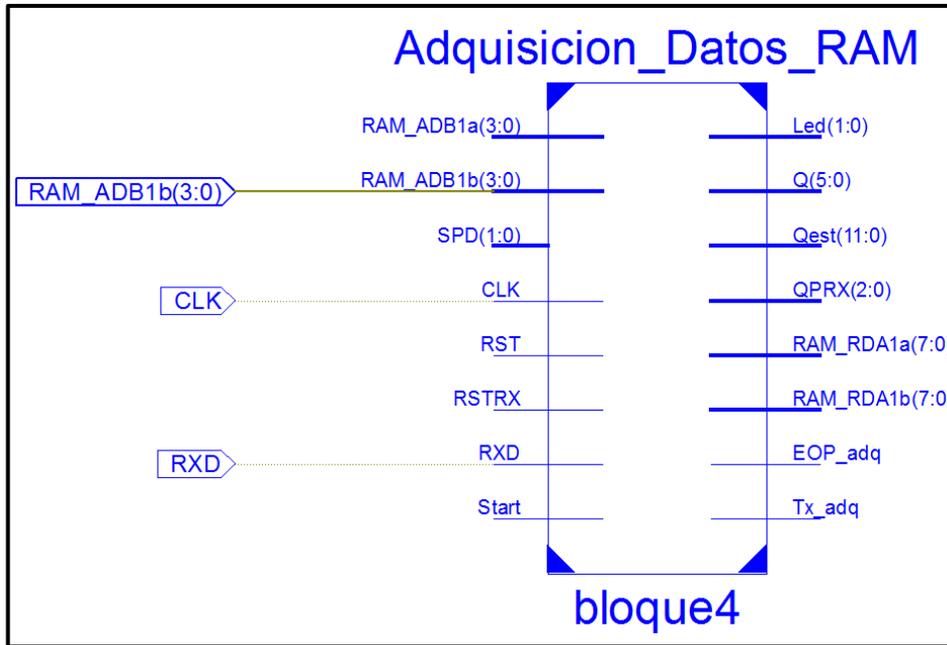


Figura 3. 12 Etapa de adquisición de datos

En esta etapa los datos enviados por las tres tarjetas de pics, son recibidas de manera inalámbrica en el fpga y almacenados en memoria RAM, para ser utilizados posteriormente.

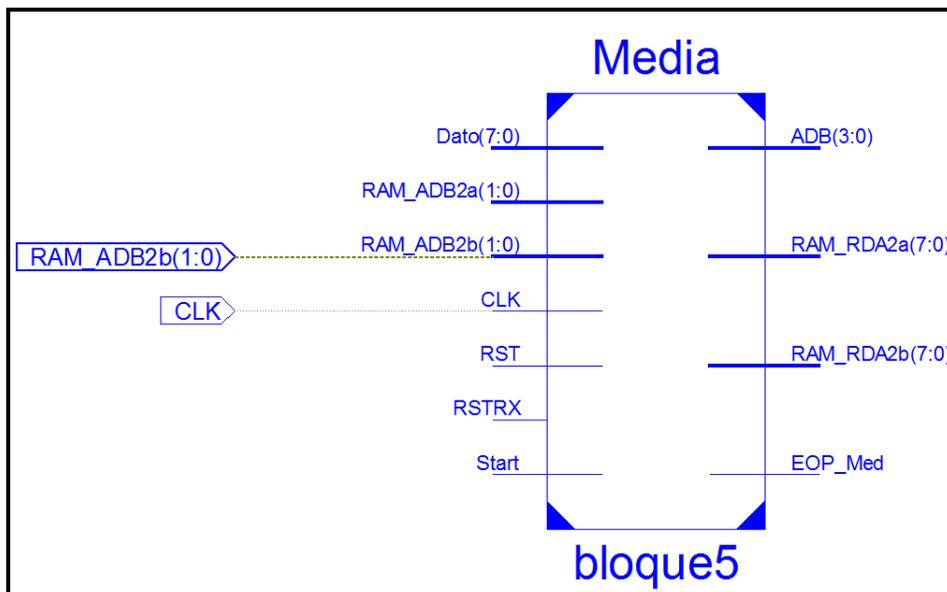


Figura 3. 13 Etapa de promedio

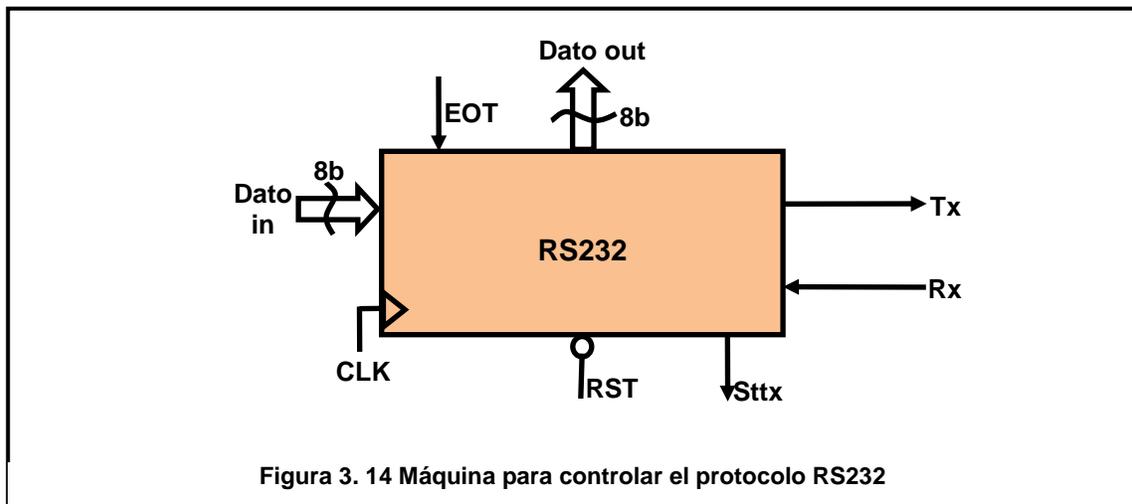
El bloque media, lee los datos guardados en memoria RAM y realiza el promedio de estos. Son 4 medias, las correspondientes a los potenciales mátricos del suelo que se obtuvo del campus Amazcala.

Protocolo RS232

Este protocolo contiene un transmisor y un receptor que trabajan totalmente independientes uno del otro, inclusive puede haber una transmisión y una recepción exactamente al mismo tiempo.

El receptor funciona de la siguiente manera, se establece un vector de 8 bits en la entrada Dato in, el cual es el dato a enviar. Al momento de detectarse un nivel alto en Sttx se empieza a enviar bit a bit por Tx el vector que se encuentra en Dato in.

De manera independiente la entrada Rx está siempre en espera de la llegada de una trama de datos de entrada, al detectarse una recepción esta pasa a sobre escribir el vector Dato out, una vez terminada la recepción la salida EOT se pone en alto por un ciclo de reloj para después volver a nivel bajo, indicando con esto el término de una recepción.



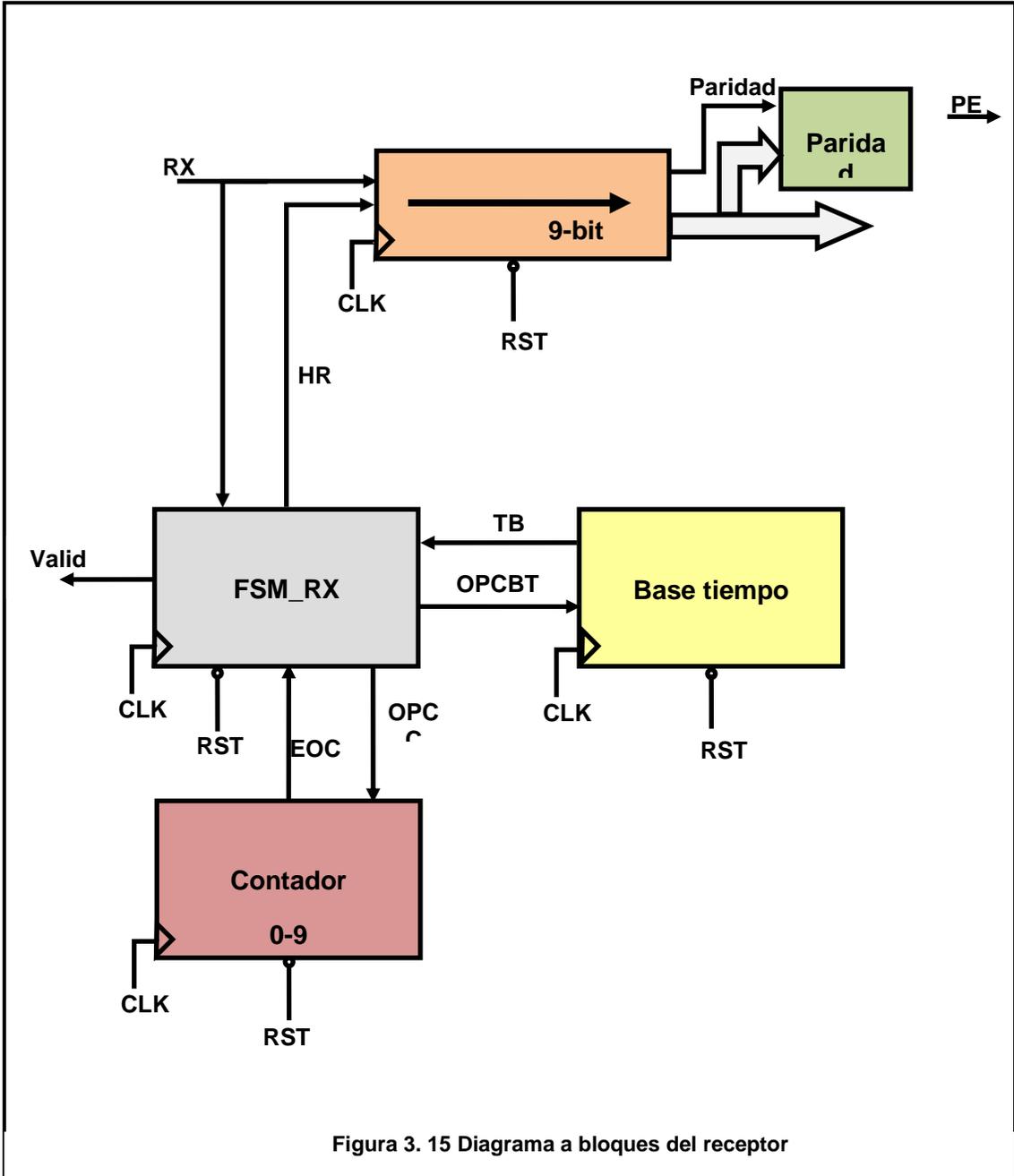


Figura 3. 15 Diagrama a bloques del receptor

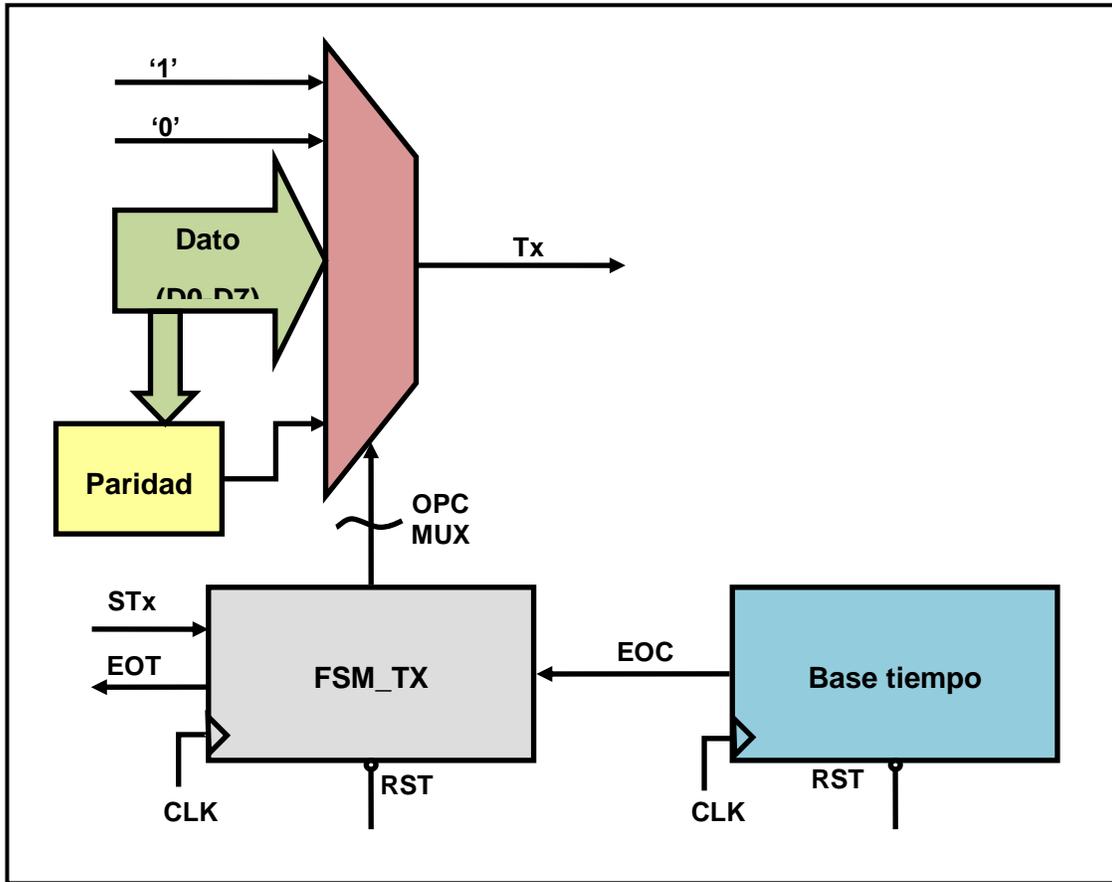


Figura 3. 16 Diagrama a bloques del receptor

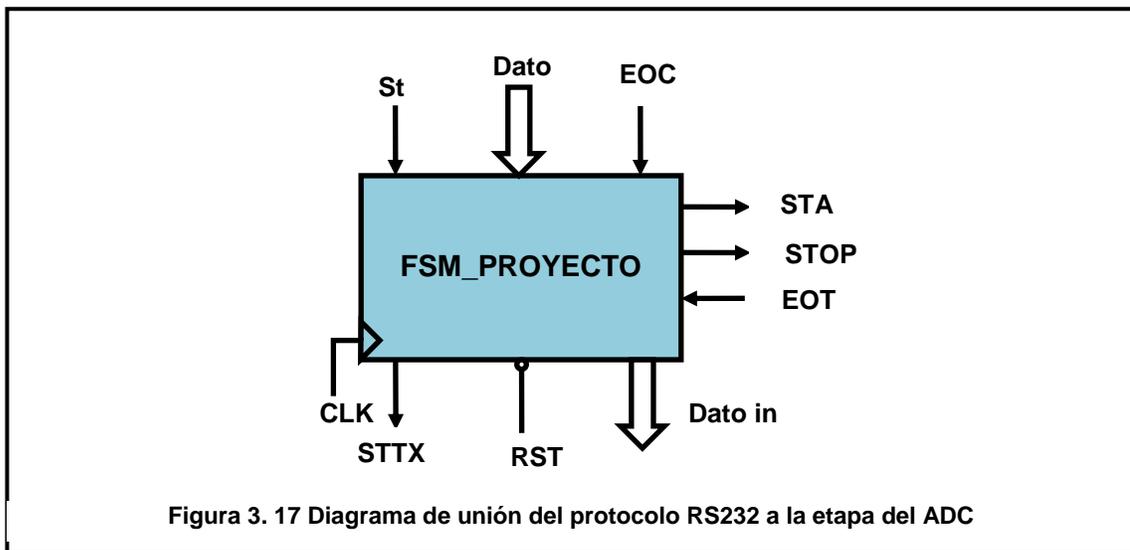


Figura 3. 17 Diagrama de unión del protocolo RS232 a la etapa del ADC

3.8.8. Etapa de potencia

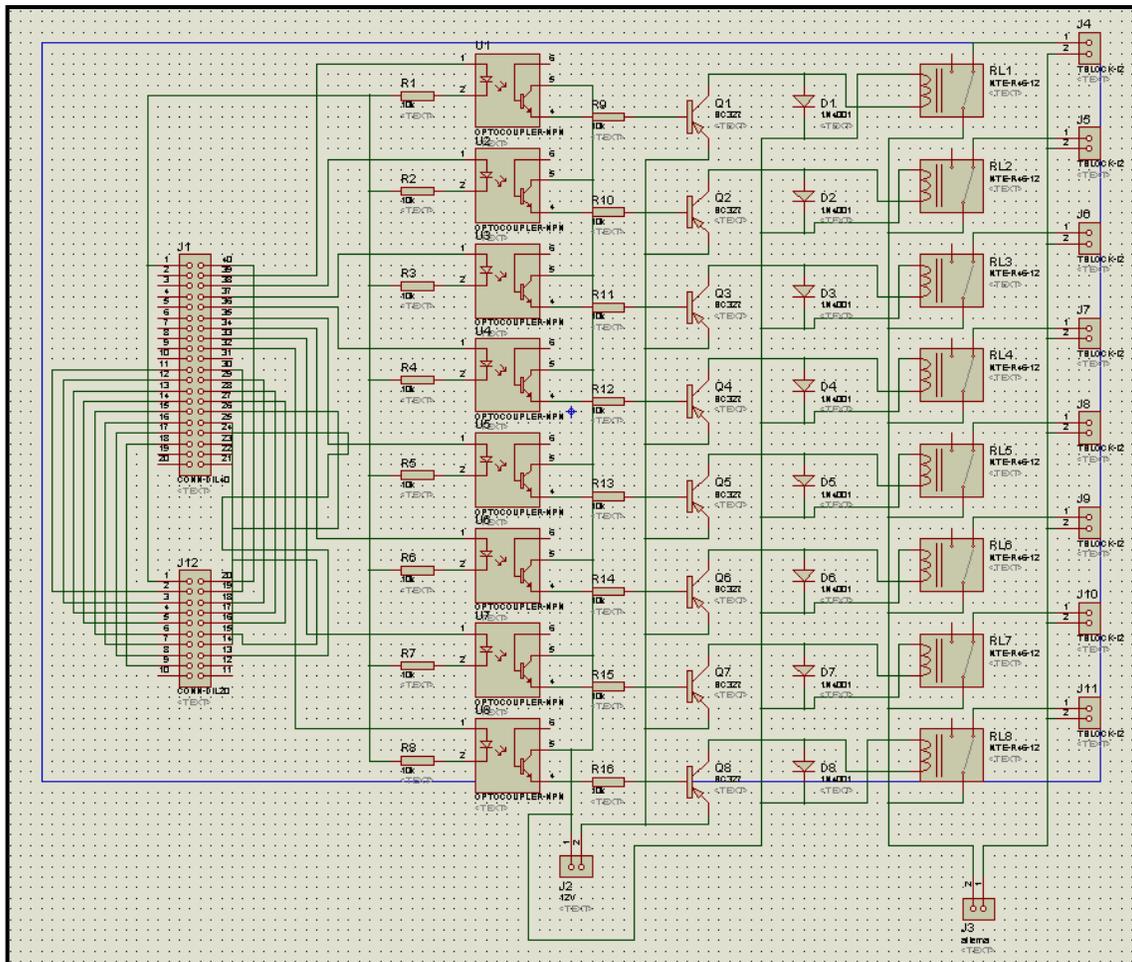


Figura 3. 18 Diagrama eléctrico de la etapa de potencia para activar bombas

Se realizó el PCB del diagrama que se observa en la Figura 3.18 con el cual se encienden y apagan los actuadores del sistema de riego, la etapa de potencia es controlada por el FPGA.

IV. RESULTADOS

4.1. Caracterización del suelo

Tabla 4. 1 Obtención de la CC y DA

	Recipiente			Promedio
	M1	M1a	M1b	
Cap. Campo	50.5%	49.838709 %	48.886798 %	49.741835 %
Dens. Aparente	0.994079 <i>gr/cm</i>	0.997003 <i>gr/cm³</i>	0.932387 <i>gr/cm</i>	0.974489 <i>gr/cm³</i>

Se conoce la cantidad de agua que puede retener el suelo que se utilizará para implementar el sistema de riego a desarrollar, así como la densidad aparente. Estas variables son necesarias para calcular la lámina de riego que se aplicara.

4.2. Curva característica del sensor

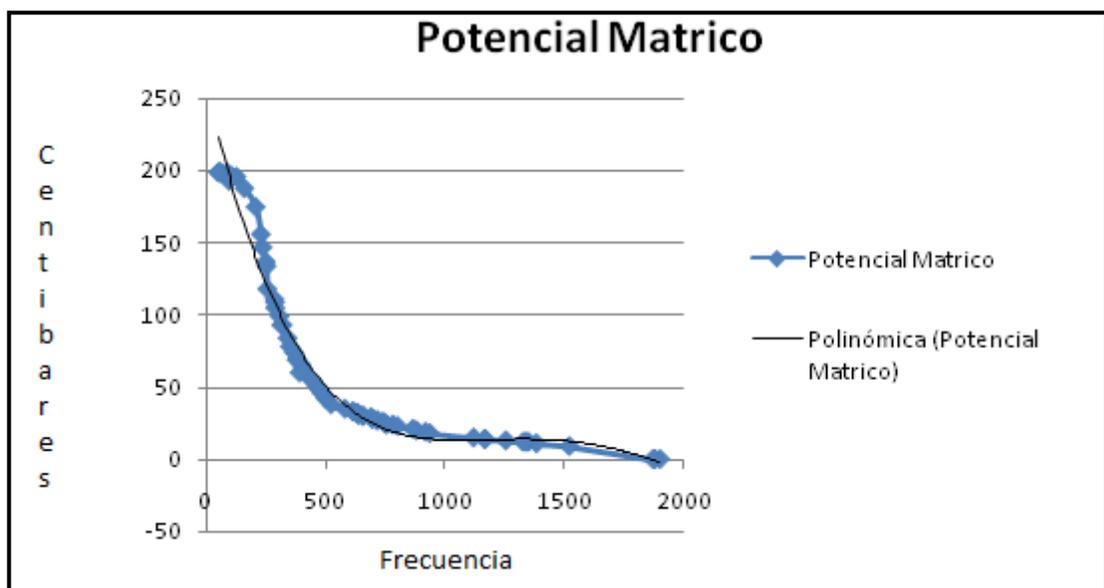


Figura 4. 1 Caracterización del sensor (Cbar vs Hz)

La caracterización del sensor consistió en tomar mediciones tanto de potencial mátrico como de frecuencia. Esta relación no se utilizó en el sistema realizado porque se optó por medir la resistencia del sensor y tomarla como variable en la toma de decisiones del sistema. Los valores de resistencias presentadas en la hoja de datos del sensor watermark no corresponden a los que tiene realmente, por lo tanto se caracterizó el datalogger watermark y los resultados obtenidos se compararon con su hoja de datos correspondiente. Estos últimos datos fueron favorables para la aplicación del sistema. Posteriormente mediante el análisis de los acondicionamientos de señales propuestos con una ecuación se relacionaron el potencial mátrico con resistencia, y posteriormente se infirió la correspondencia entre presión mátrica y voltaje. Dicho voltaje es el que entra en la tarjeta de adquisición del pic18f2550 para ser convertido de analógico a digital y enviarse inalámbricamente al FPGA. A continuación se muestra la tabla de datos que se obtuvo del experimento, así como la ecuación obtenida de la relación entre potencial mátrico y voltaje.

Tabla 4. 2 Caracterización del datalogger

Rs	Vo1	Vo2(Amplificado)	ADC	ADC(hexa)	ADC(bin)	Cbar
550	0.08842443	0.353697749	18.038	12.09E0	10010	0
850	0.13406940	0.536277603	27.350	1B.59A3	11011	5
1130	0.17513949	0.700557967	35.728	23.BA7C	100011	10
2000	0.29411764	1.176470588	60	3C	111100	15
3000	0.41666666	1.666666667	85	55	1010101	20
4150	0.54177545	2.167101828	110.522	6E.85AE	1101110	25
5086	0.63302798	2.532111919	129.137	81.2340	10000001	30
6076	0.72072499	2.882899981	147.027	93.0724	10010011	35
6740	0.77506899	3.100275989	158.114	9E.1D34	10011110	40
7510	0.83407374	3.33629498	170.151	AA.26AA	10101010	45
8500	0.90425531	3.617021277	184.468	B8.77D4	10111000	50
9200	0.95041322	3.801652893	193.884	C1.E261	11000001	55
10000	1	4	204	CC	11001100	60
10590	1.03458382	4.138335287	211.055	D3.0E1B	11010011	65
11400	1.07954545	4.318181818	220.227	DC.3A2E	11011100	70
12090	1.11572536	4.46290144	227.607	E3.9BA4	11100011	75
12740	1.1481615	4.592645999	234.224	EA.3996	11101010	80
13440	1.18143459	4.725738397	241.012	F1.033D	11110001	85
14400	1.22448979	4.897959184	249.795	F9.CBC1	11111001	90
15000	1.25	5	255	FF	11111111	95

Tabla 4. 3 Relación voltaje-potencial mátrico

Voltaje	Pot. Mátrico
0.35369775	0
0.5362776	5
0.70055797	10
1.17647059	15
1.66666667	20
2.16710183	25
2.53211192	30
2.88289998	35
3.10027599	40
3.33629498	45
3.61702128	50
3.80165289	55
4	60
4.13833529	65
4.31818182	70
4.46290144	75
4.592646	80
4.7257384	85
4.89795918	90
5	95

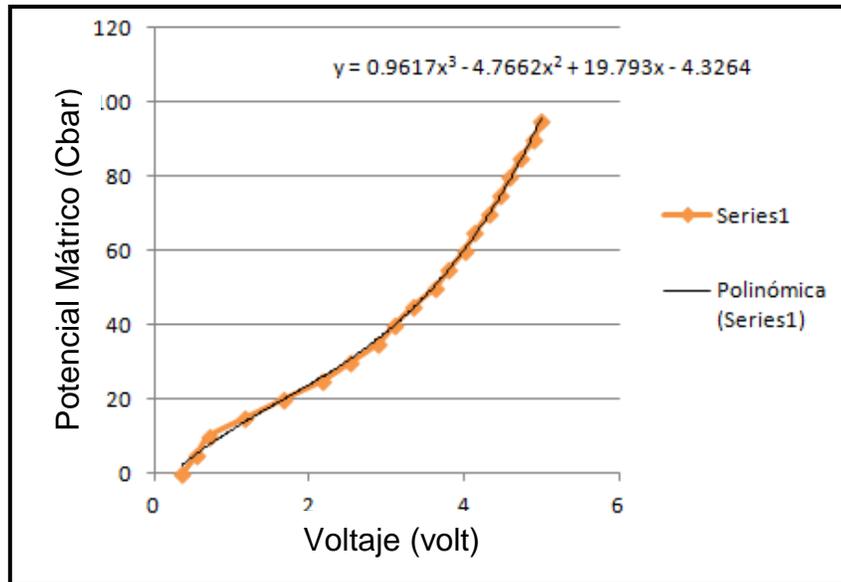


Figura 4. 2 Curva característica del datalogger

4.3. Instrumentación

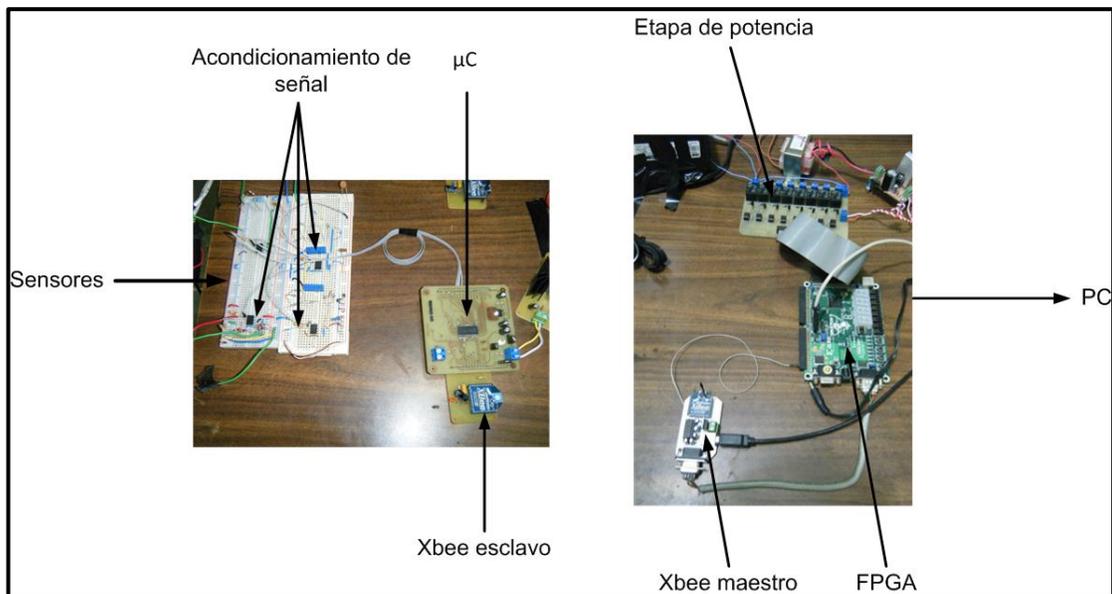


Figura 4. 3 Instrumentación del sistema

En la Figura 4.3 se puede observar la instrumentación del primer prototipo, este consta de sensores, etapa de acondicionamiento, tarjeta con μC y tarjeta con Xbee esclavo, etapas de potencia, un Xbee maestro y la unidad de procesamiento el cual es embebido en un FPGA. Opcionalmente los datos pueden ser enviados al FPGA para una mayor capacidad de almacenamiento de los mismos y para llevar una base de datos.

4.4. Interfaz gráfica

Se diseñó una interfaz gráfica en Labview, la cual genera archivos .txt en los que se almacenan tanto los datos de potencial mátrico medido por cada sensor como los promedios de los canales a fines de cada pic, arrojados por el FPGA. Los datos se grafican en centibares y en voltaje.

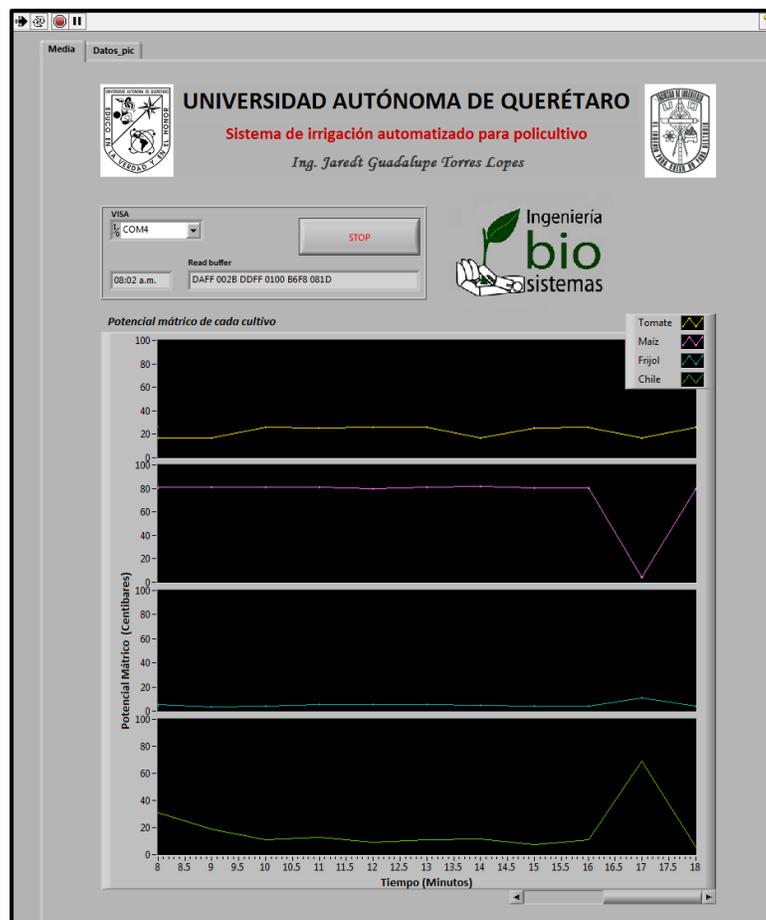


Figura 4. 4 Página de inicio de la interfaz

Los datos graficados corresponden al experimento realizado, sustituyendo los sensores por potenciómetros que simulan perfectamente el comportamiento obtenido con la caracterización del datalogger. Durante el desarrollo de esta prueba se corroboró que el sistema funciona adecuadamente, se varió la resistencia de los potenciómetros colocados en los canales número tres del adc de cada pic que corresponden en este caso a la señal denominada chile. De acuerdo a la literatura, el riego de este cultivo se debe iniciar cuando su potencial mátrico se encuentre alrededor de 35 cbar, por lo tanto se varió desde 0 hasta 80 cbar aproximadamente y viceversa. Se conectó una bomba de pecera a la etapa de potencia para visualizar la respuesta del sistema. El fpga respondió satisfactoriamente encendiendo la bomba cuando la media de los canales número tres alcanzó un voltaje de 2.82 v equivalente a 35 cbar; y también la bomba se apagó al disminuir el voltaje a 0.9 v, que es aproximadamente 10 cbar .

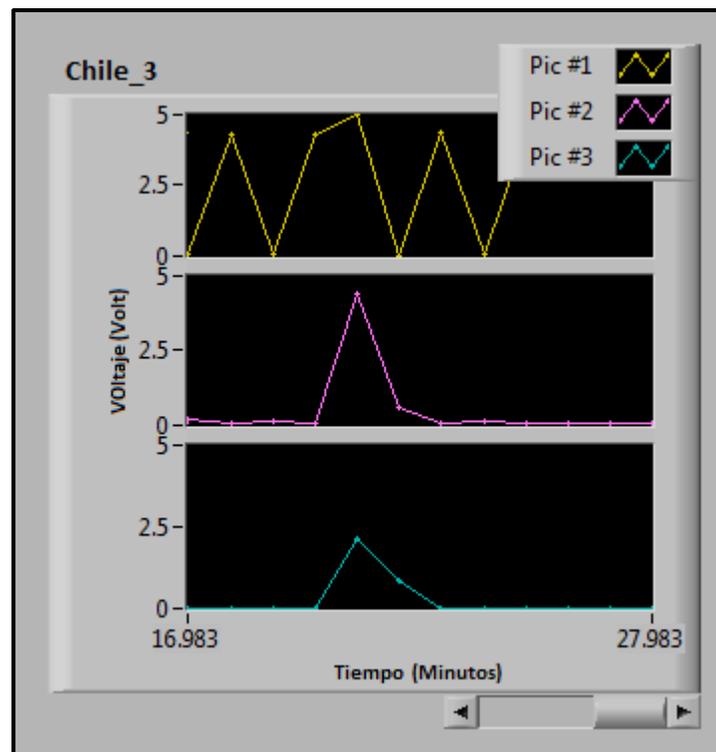


Figura 4. 5 Gráfica potencial mátrico del canal utilizado para chile

En la prueba realizada con los sensores, se utilizó el canal cero (simulando el comportamiento del tomate) de cada pic arrojó los siguientes datos:



Figura 4. 6 Gráfica potencial mátrico del canal dedicado para tomate

Como se observa en la Figura 4.6 el promedio del voltaje del canal cero, inició aproximadamente en 45 cbar. Posteriormente incrementó mientras el sensor se estabilizaba. La bomba se encendió en 30 cbar, que son los indicados para el tomate, y se apagó al disminuir la presión mátrica en los sensores.

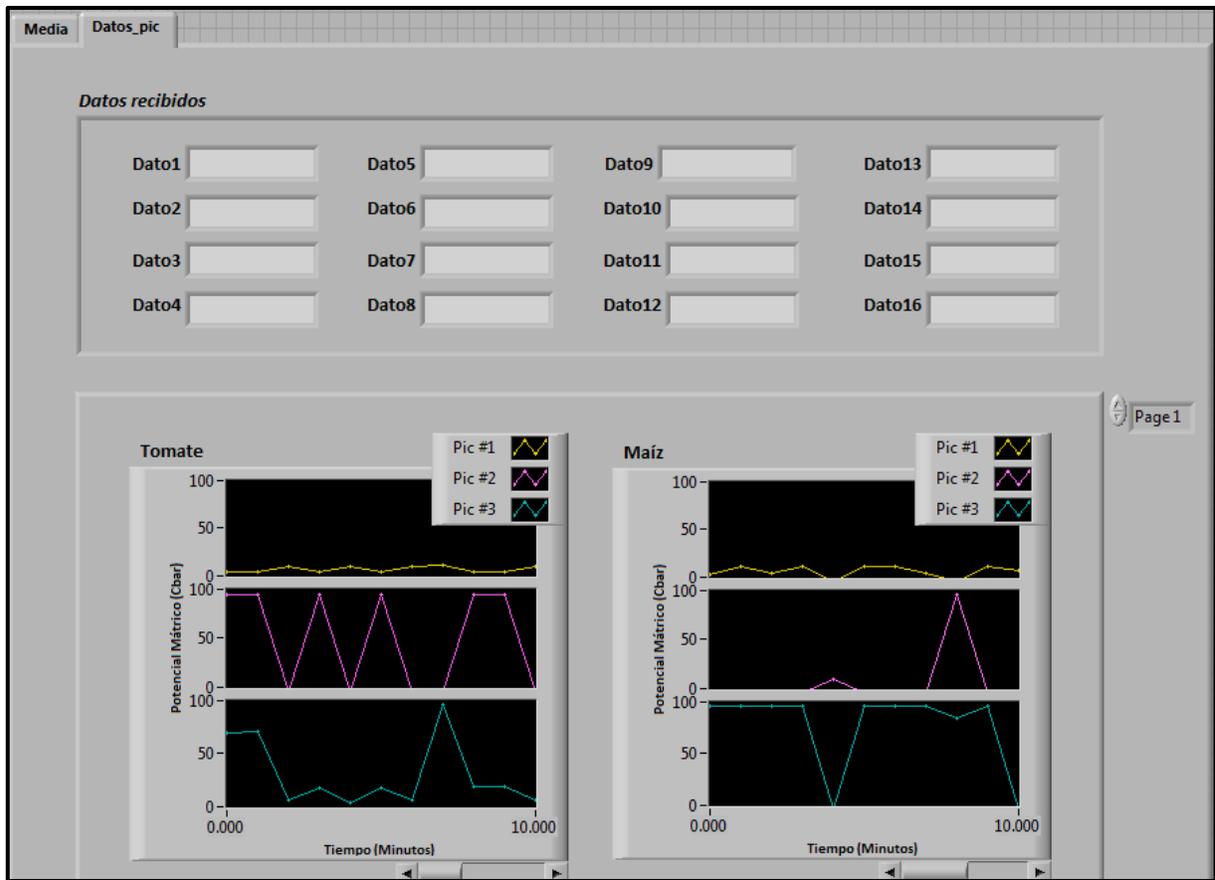


Figura 4. 7 Gráfica cada canal dedicado para tomate

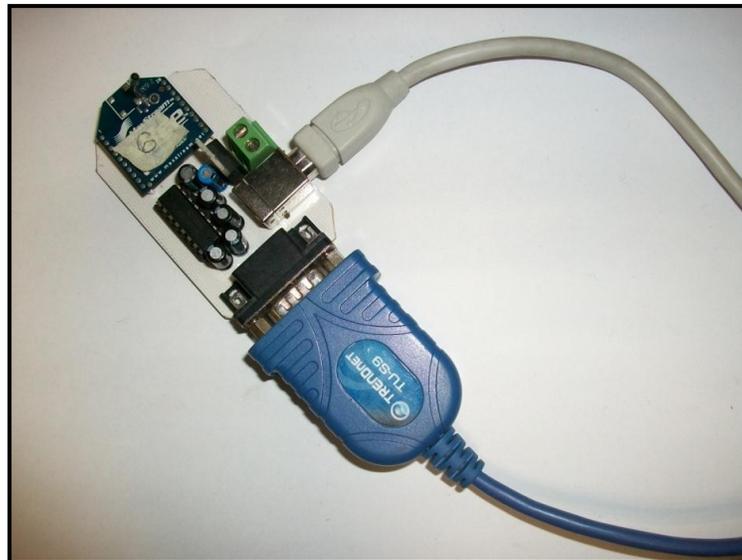


Figura 4. 8 Tarjeta XBee para PC

4.5. Etapa de potencia

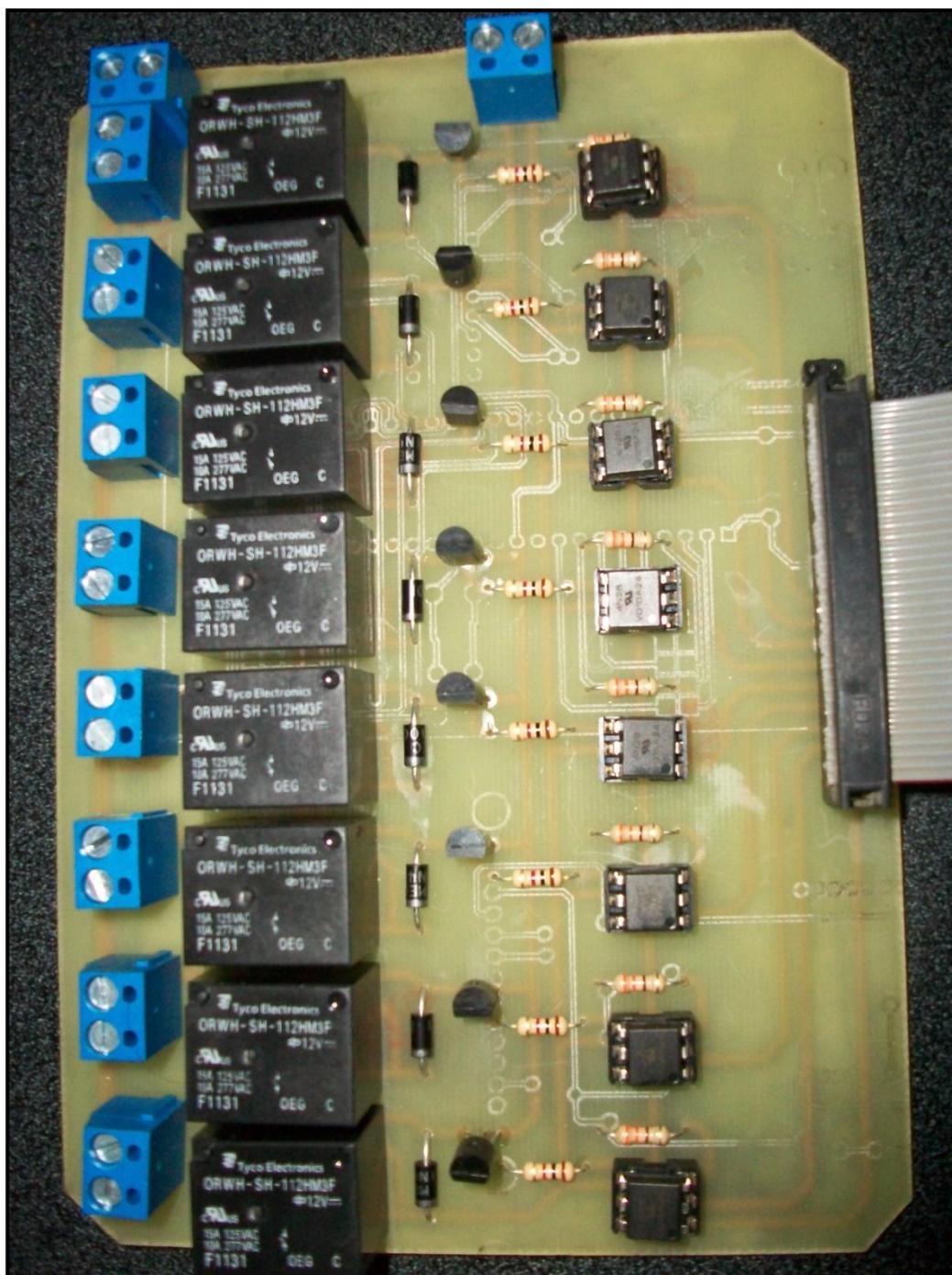


Figura 4. 9.- Circuito de potencia

Esta etapa se utiliza para activar tanto bombas como válvulas.

4.6. Sistema mecánico irrigación

En el lapso en el que se desarrollo el proyecto, se realizó la instalación de la tubería, bombas, cisternas y tubos venturi con los que se pretende implementar, dentro del invernadero, el sistema de irrigación automatizado para policultivo. En la Figura 4.10 y 4.11, se observa la distribución de la instalación hidráulica, que consiste básicamente en la tubería, bombas, tubos venturis y cisternas correspondientes utilizados para la dosificación de nutrientes en el sistema de irrigación por goteo.



Figura 4. 10.- Instalación de actuadores



Figura 4. 11.- Contenedor de gua

En la Figura 4.12 muestra el arreglo topológico del sistema de riego. El invernadero se dividió en dos partes iguales, en una de las cuales se conectaron dos regantes hacia la línea principal de riego por cada surco debido a la distribución de plantas que se planea tener con el policultivo. Se instaló una bomba para regar cada especie ya que con el sistema automatizado solo se regara a las plantas que lo requieran. En la parte restante (en la otra mitad de la superficie) del invernadero solo se regara con una bomba de mayor capacidad para tenerlo como referencia en el experimento.



Figura 4. 12.- Líneas de riego

V. CONCLUSIONES

Se logró diseñar un sistema automatizado que le da a las plantas seleccionadas la cantidad adecuada de agua para su correcto desarrollo (Imhoff *et al.*, 2010; Burt, 2008; León *et al.*, 2005; Mora_a, 2004; Palada and O'Keefe, 2001; Wagner *et al.*, 1989). En esta tesis se aplicaron conocimientos obtenidos a lo largo de la carrera y de la maestría, tales como: sistemas de adquisición de datos, electrónica digital, control, diseño de PCBs, comunicaciones, programación de FPGAs, PICs y Labview, instrumentación industrial, biosistemas, Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (RASPA), construcción de invernaderos, programación avanzada II, etc. generando así un proyecto multidisciplinario con aplicación en biosistemas.

Los sensores seleccionados son económicos por su simple principio de funcionamiento y los materiales con los que son diseñados, desafortunadamente son lentos en la adquisición. Aunque no son recomendables para aplicaciones de alta precisión, fueron seleccionados para este proyecto porque eran baratos, y tecnológicamente suficientes para la aplicación.

El método de control on-off se tomó como un método de aplicación relativamente sencillo, pero con errores admisibles en la aplicación puesto que la humedad en suelo es una variable de lento cambio. Se recomienda hacer mediciones cada 30 min o 1 hr para no llenar la memoria con demasiados datos que no cambiarán mucho de una medición a otra.

Se observó que los FPGAs tienen mejores cualidades que los pics para el manejo de sensores. Esto debido a la cualidad del procesamiento paralelo del FPGA gracias a la cual puede recibir en cualquier momento, mientras que los pics requieren de interrupciones. Además, los pics tienen un número reducido de entradas, mientras que los FPGAs cuentan con un mayor número de éstas. Sin embargo los pics son muy útiles para aplicaciones específicas simples, donde los FPGAs pueden salir sobrados

Aunque el sistema desarrollado no se implementó en invernadero por cuestiones de tiempo y de disponibilidad de algunos materiales, sí se realizaron algunas actividades referentes, por ejemplo: construcción del invernadero, análisis de suelo, cableado estructurado, cálculo e instalación de tubería, instalación de granja de bombas, etc. Estas acciones fueron de gran utilidad para otros proyectos de investigación de la facultad de ingeniería.

Tomando en cuenta que en la actualidad no existe tecnología de riego específica para policultivo; y ya que los cultivos no sólo requieren cierta cantidad de agua, sino que la aplicación de ésta debe dosificarse adecuadamente durante el tiempo que dura el ciclo vegetativo, desde la siembra hasta la maduración; se diseñó un sistema de riego automatizado capaz de cubrir los requerimientos hídricos de cada especie del policultivo con el fin de un óptimo aprovechamiento del agua.

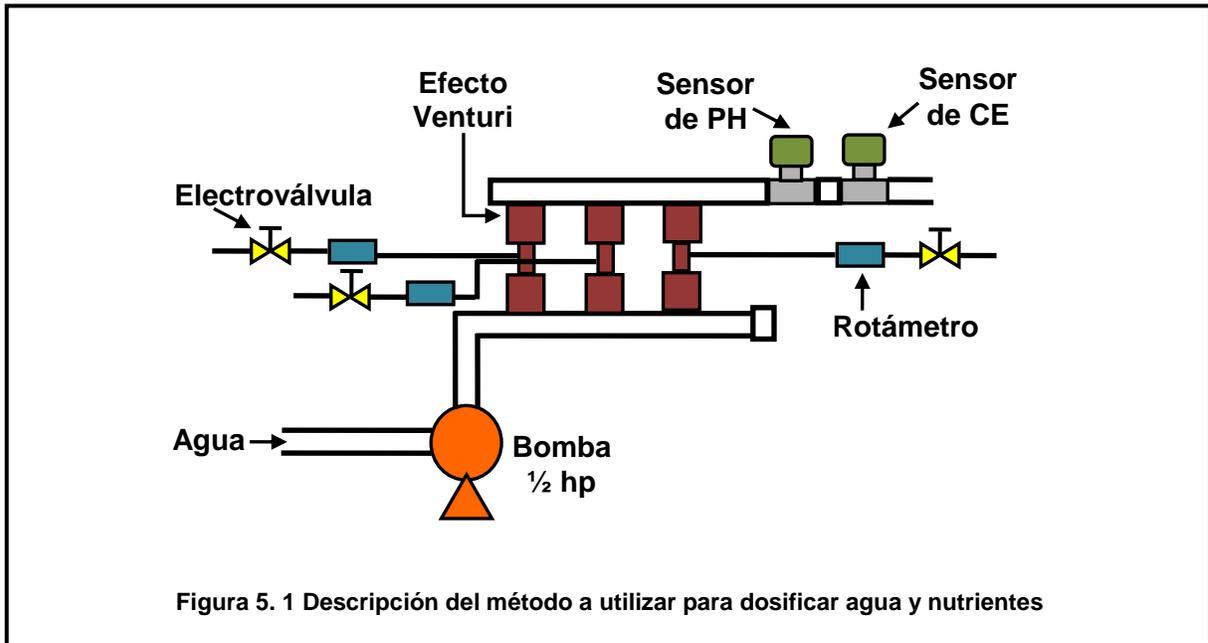
El sistema desarrollado de riego automatizado para policultivo compensa o corrige las pérdidas de agua por evaporación, lixiviación y pérdida de los nutrientes. Puesto que sólo aplica la cantidad de agua necesaria para cada cultivo, se eluden las enfermedades en la raíz de la planta al evitar que se pudra por el exceso de humedad, y se impiden daños a la planta por la falta de agua. Aunado a esto, si se cultiva bajo invernadero (condiciones protegidas) las plantas tendrían las condiciones adecuadas para que se obtenga un alto rendimiento en la producción.

5.1. Trabajo a futuro

Se recomienda instalar el sistema en un invernadero. Si en la siembra se tienen que cambiar las plantas sólo se tendrán que cambiar los puntos de comparación para el riego según las nuevas plantas.

El sistema de riego se puede conectar a otro sistema de control de invernadero. El control del riego se puede mejorar cambiando el tipo de sensores que se están utilizando por unos de respuesta más rápida. Además es recomendable medir más variables del invernadero, pero esto repercutiría en modificar el método de control utilizado.

Para obtener mejores resultados, se recomienda instalar un sistema que incluya fertirriego. Para que la distribución de nutrientes entre los cultivos sea eficiente se propone el siguiente arreglo de sensores y actuadores, mismo que no se realizó debido al costo de los dispositivos requeridos para la implementación.



Todas estas propuestas de trabajo a futuro coinciden con proyectos actuales del área de Biosistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acedo Sánchez, José. 2003. Control Avanzado de Procesos: teoría y práctica. Madrid : Díaz Santos.
- Acedo Sánchez, José. 2006. Instrumentación. España : Ediciones Díaz de Santos.
- Altera Section I. 2010. Cyclone II Device Family Datasheet; Altera Corp.: San Jose, CA, USA.
- Amir Cohen. Dispositivo restrictivo para flujo regulado, particularmente útil como un emisor de riego por goteo. Bernardo Gómez Vega. 9405690. 1997-08-27.
- Angeles Montiel, Vicente. 2002. Fundamentos de Hidráulica para diseño y revisión de Riego Presurizado(Fundamentos Teóricos). Chapingo : Universidad Autónoma de Chapingo.
- Angulo Bahón, Cecilio y Raya Giner, Cistróbal. 2004. Tecnología de Sistemas de Control. s.l. Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Askegaard, M.; Olsen, J.E.; Rasmussen, I.A. 1999. Agronomic considerations and dilemmas in the Danish crop rotation experiment. Designing and testing crop rotations for organic farming (Eds. Olsen, J.E.; Eltun, R.; Gooding, M.J.; Jensen, E.S. and Köpke, U.). Danish Research Centre for Organic Farming Report, vol. 1, pp. 49-62.
- Ayoola, O.T.; Makinde, E.A. 2008. Influence of cassava population density on the growth and yield performance of cassava - maize intercrop with a relayed cowpea. México: Tropical and Subtropical Agroecosystems, vol. 8, pp. 235-241.
- Balch, Mark. 2003. Complete Digital Design, a comprehensive guide to digital electronics and computer system architecture. s.l. : McGraw-Hill.
- Bastida Tapia, Aurelio. 2006. Manejo y Operación de Invernaderos Agrícolas. Chapingo: Universidad Autónoma de Chapingo.
- Bartra, Armando. 2009. Hacer milpa. México: Ciencias, vol. 92 – 93, pp. 42-45.
- Bello U., Marco Antonio y Pino Q., María Teresa. 2000. Metodologías de fertirrigación. Punta Arenas: INIA- Kampenaike. Boletín N° 19.
- Buendía-Espinoza, Julio C.; Palacios-Vélez, Enrique; Chávez-Morales, Jesús; Rojas-Martínez, Basilio. 2004. Impact of pressurized irrigation systems performance on productivity of eight crops, in Guanajuato, Mexico. Agrociencia, vol. 38, pp. 477-486.
- Burt, John. 2008. Growing capsicums and chillies. Farmnote. State of Western Australia.

- Cardenas-Lailhacar, B. y Dukes, M. D. 2010. Precision of soil moisture sensor irrigation controllers under field conditions. Florida, United States : Elsevier. Agricultural Water Management.
- Cobos-Castro, Linda Saray. 2009. Nutrición y Manejo de la Sanidad en Policultivo (*Capsicum annuum*, *Lycopersicum esculentum*, *Zea mays* y *Phaseolus vulgaris*) bajo condiciones de Invernadero. [Tesis]. Santiago de Querétaro : Universidad Autónoma de Querétaro.
- Cobos-Castro, Linda Saray; Guevara-González, Ramón Gerardo; Mercado-Luna, Adán; Ocampo-Velázquez, Rosalía Virginia; García-Rico, Enrique; Soto-Zarazúa, Genaro Martín; Herrera-Ruíz, Gilberto; Torres-Pacheco, Irineo. 2009. Nutrición y Manejo de la Sanidad en Policultivo (*Capsicum annuum*, *Lycopersicum esculentum*, *Zea mays* y *Phaseolus vulgaris*) bajo condiciones de Invernadero. Santiago de Querétaro.
- Creus Sole, Antonio. 2005. Instrumentación Industrial. España : Marcombo.
- Dunigan, C.J. 1969. Information dissemination and regional development through urban linkages in the Laguna Region of Mexico. Geography Department University of Tennessee. Knoxville, TN.
- E.i. du pont de nemours and company, design technology and irrigation limited. Dispositivo de irrigación. PA/a/2002/001249. 2007-03-22.
- Elsworth, Langdon R. and Paley, Walter O., 2009. Fertilizers: properties, applications and effects. Nova Science Publishers, Inc.: New York.
- Enríquez Harper, Gilberto. 2004. El libro práctico de los generadores, transformadores y motores eléctricos. México : Limusa.
- Ertek, A.; Sensoy, S.; Yıldız, M.; Kabay, T., 2002. Estimation of the most suitable irrigation frequencies and quantities in eggplant grown in greenhouse condition by using free pan evaporation coefficient. K.S. Univ. Life Sci. Eng. J., vol. 5, pp. 57–67.
- Ertek, Ahmet; Sensoy, Suat; Kücükçumuk, Cenk; Gedik, Ibrahim. 2004. Irrigation frequency and amount affect yield components of summer squash (*Cucurbita pepo* L.). Agricultural Water Management, vol. 67, pp. 63-76.
- Espinosa-Calderón, A. (2005). Manual de Prácticas para Instrumentación Industrial. Tesis, Instituto Tecnológico de Morelia, México.
- García-Hernández, J.L.; Valdez Cepeda, R.D.; Servín-Villegas, R.; Murillo-Amador, B.; Rueda-Puente, E.O.; Salazar-Sosa, E.; Vázquez-Vázquez, C.; Troyo-Diéguez, E. 2009. Manejo de plagas en la producción de hortalizas orgánicas. Yucatán, México: Tropical and Subtropical Agroecosystems, vol. 10, pp. 15-28.

- García Moreno, Emilio. 1999. Automatización de Procesos Industriales. Valencia : Universidad Politecnica de Valencia.
- Gideon Gilead. Dispositivo de irrigación. 0011764. 1993-12-17.
- Gómez-Rodríguez, Olga y Zavaleta-Mejía, Emma. 2001. La asociación de cultivos una estrategia más para el manejo de enfermedades, en particular con tagetes spp. Ciudad Obregón, México: Revista Mexicana de Fitopatología, vol. 19, pp. 94- 99.
- Goyal, Megh R.; Solomon, Kenneth H.; Ruiz Giraldo, Hernán; Lugo López, Miguel A., 1990. Manejo de Riego por Goteo. Puerto Rico: Universida, pp. 95-135.
- Gutierrez Martínez, A.; Aguilar Jiménez, C.E.; Galdamez Galdamez, J.; Mendoza Pérez, S.; Martínez Aguilar, F. B. 2007. Impacto Socioeconómico de los Sistemas de Policultivos Maíz-Frijol-Calabaza en la Frailesca, Chiapas, México. Almería : Seminario de Cooperación y Desarrollo en Espacios Rurales Iberoamericanos Sostenibles e Indicadores.
- Hulugalle, N. R. and Willatt, S. T., 1987. Patterns of water uptake and root distribution of chilli peppers grown in soil columns. Canadian Journal of Plant Science, vol. 67, pp. 531-535.
- Imhoff, S.; Kay, B.D.; Pires da Silva, A.; Hajabbasi, M.A., 2010. Evaluating responses of maize (*Zea mayz* L.) to soil physical conditions using a boundary line approach. Soil and Tillage Research, vol. 106, pp. 303-310.
- Inzunza-Ibarra, Marco A.; Monger, H. Curtis. 2005. Historical analysis of the irrigation evolution of the Laguna region of Mexico. TERRA Latinoamericana, Vol. 23, pp. 363-370.
- Jaime Sahagun Barragan. Mejoras en sistema integral de riego por goteo. 0168682. 1981-06-03.
- Kengni, L.; Vachaud, G.; Thony, J.L.; Laty, R.; Garino, B.; Casablanca, H.; Jame, P.; Viscogliosi, R., 1994. Field measurements of water and nitrogen losses under irrigated maize. Journal of Hydrology, vol. 162, pp. 23-46.
- Kolawole, Ogundari. 2009. Technical efficiency of farmers under different multi-cropping systems in Nigeria. México: Tropical and Subtropical Agroecosystems, vol. 10, pp. 117-120.
- León, María; Cun, R.; Chaterlán, Yohima; Rodríguez, R., 2005. Efficient use of water in ptotected tomato crop, results obtained in Cuba. La Habana: Ciencias técnicas agropecuarias, vol. 14, pp. 9-13.
- López-López, Rutilo; Arteaga-Ramírez, Ramón; Vázquez-Peña, Mario A.; López-Cruz, Irineo L.; Sánchez-Cohen, Ignacio. 2010. Husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) crop evapotranspiration estimated by soil matric potential. Mexico: Rev. Fitotec, vol. 33 (2):pp. 157 – 168.

- Loya-Ramírez, J.G.; García-Hernández, J.L.; Ellington, J.J.; Thompson, D.V. 2003. Impacto de la asociación de cultivos en la densidad de insectos hemípteros entomófagos. *Interciencia*, vol. 28, pp. 415-420.
- Machado, Rui M.A. and Oliveira, María de Rosario G., 2005. Tomato root distribution, yield and fruit quality under different subsurface drip irrigation regimes and depths. *Irrigation Science* 24: 15-24.
- Martín del Brío, Bonifacio y Sanz Molina, Alfredo. 2007. *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos*. México: Alfaomega.
- Meyers, W.K. 1994. *Forge of progress, crucible of revolt. The origins of the Mexican Revolution in La Comarca Lagunera, 1880-1911*. University of New Mexico Press. Albuquerque, NM.
- Microchip Technology Inc. 2009. PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet.
- Mora-Gutiérrez^a, Manuel. 2004. *Guía para producir frijol con fertirriego por goteo y labranza de conservación en Querétaro*. Querétaro: INIFAP Campo Experimental Querétaro. Folleto para productores N°1.
- Mora-Gutiérrez^b, Manuel. 2004. *Guía para producir maíz con fertirriego por goteo y labranza de conservación en Querétaro*. Querétaro: INIFAP Campo Experimental Querétaro. Folleto para productores N° 2.
- Mott, Robert L. 2006. *Mecánica de Fluidos*. Sexta. México: Pearson Educación.
- NAAN MECHANICAL WORKS. *Mejoras en aparato de irrigación por goteo*. 0014183. 1993-08-19.
- Noble, Abraham; P.S., Hema; E.K., Saritha; Shinoj, Subramannian. 2000. *Irrigation automation based on soil electrical conductivity and leaf temperature*. India: Elsevier. *Agricultural Water Management*, Vol. 45, pp. 145-157.
- Ogata, Katsuhiko. 2003. *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid: Pearson Educación.
- Palacios Vélez, Enrique. 2002. *¿Por qué, Cuándo, Cuánto y Cómo Regar? Para lograr mejores cosechas*. s.l. : Trillas, 2002.
- Palada, Manuel C. and O'Keefe, Daniela A., 2001. *Response of hot pepper cultivars to levels of drip irrigation in the Virgin Islands*. *Proceedings of the Caribbean Food Crops Society*, vol. 37, pp. 190-196.
- RAE. 2007. *Diccionario de la Real Academia Española*. www.rae.es/rae.html.
- Rodríguez Rodríguez, R., Tabares Rodríguez, J. M. y Medina San Juan, J. A. 1996. *Cultivo Moderno del Tomate*. 2da. Madrid: Mundi-Prensa.
- Rodríguez Suppo, F. 2003. *Riego por goteo*. México: A.G.T. Editor.

- Romero Troncoso, René de Jesús. 2007. *Electrónica digital y lógica programable*. Guanajuato: Universidad Autónoma de Guanajuato.
- Sainju, U.M.; Singh B.P.; Rahman S. and Reddy V.R. 2000. Tomato root growth is influenced by tillage, cover cropping and nitrogen fertilization. *HortScience*, Vol. 35 (1): pp. 78-82.
- Sánchez del C., F. 2005. *Perspectivas de la agricultura protegida*. Notas del Diplomado internacional en agricultura protegida. México : Universidad Autónoma de Chapingo.
- Sierra, A. 2007. *Principios y Prácticas para el Manejo de Nutrientes en la Producción de Hortalizas*. Florida: Institute of Food and Agricultural Sciences.
- Singh, S.D., Singh, Y.V. and Bhandari, R.C. 1989. Tomato yield as related to drip lateral spacing and fertilizer application on total and wetted area basis. *Can. J. Plant Sci.* 69: 991-999.
- Tapia, Aurelio Bastida. 2006. *Manejo y Operación de Invernaderos Agrícolas*. Chapingo: Universidad Autónoma de Chapingo.
- Thompson, R. B.; Gallardo, M.; Valdez, L. C.; Fernández, M. D. 2007. Determination of lower limits for irrigation management using in situ assessments of apparent crop water uptake made with volumetric soil water content sensors. *Almería: Elsevier, Agricultural water management*, Vol. 92, págs. 13 – 28.
- Thompson, R. B.; Gallardo, M.; Valdez, L. C.; Fernández, M. D. 2007. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. *Almería: Elsevier. Agricultural Water Management*
- Vuelvas Cisneros, Marco Antonio y Arreola Tostado, Jesús Manuel. 1993. *Cuando y cuanto regar*. [Folleto Técnico N° 1]. Guanajuato, Guanajuato: INIFAP-Campo Experimental Bajío.