124-1

TECNOLÓGICO DE MONTERREY®

TECNOLÓGICO DE MONTERREY®
BIBLIOTECA
Campus Ciudad de México

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Campus Ciudad de México

División de Ingeniería y Arquitectura

Ingeniería en Mecatrónica

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Automatización de un invernadero de Jitomates basada en lógica difusa

Autores: Pedro Parra Martí 373943

Salvador Felipe Aguirre Ríos 718677

Mariana Reyes Pérez 969751

Asesor: Dr. Pedro Ponce

México D. F. 2005.

EGIA.PROYE
SB126.5
P37
2005

rnb10766224

TECNOLÓGICO DE MONTERREY.

Autores:
- Pedro Parra 373943
- Felipe Aguirre 718677
- Mariana Reyes 969751

Asesor:
- Dr. Pedro Ponce

Automatizacion de un invernadero de jitomates

basada en lógica difusa

Definición y justificación del problema

Por medio de la lógica difusa se va a controlar un invernadero de jitomates.
La planta de jitomate es muy sensible, es un producto del consumo básico con precio muy fluctuante.

Objetivo general

Automatizar un invernadero de jitomates por medio de un controlador difuso.

Objetivo del semestre

Realizar el diseño y el prototipo del invernadero.

SENSORES

Honeywell HIH3602
Es un circuito integrado de 3 terminales que necesita una alimentación de 5V. Está referido a tierra y proporciona un voltaje proporcional a la humedad relativa.

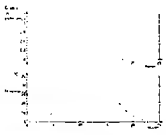
Lm35DH
Es un circuito integrado de precisión, cuyo voltaje de salida es proporcional a la temperatura en grados Celsius.

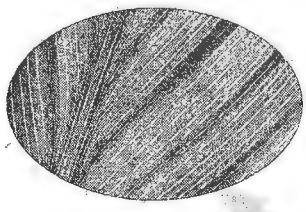
Fotorresistencias
El voltaje obtenido en las fotorresistencias será la señal de entrada para el microcontrolador.

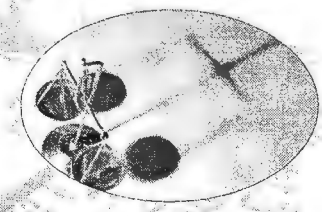
INVERNADERO

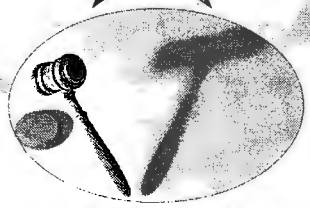
El sistema de hidroponía consiste en efectuar cultivos prescindiendo de la tierra, utilizando sustratos inertes (grava, arena, cascarillas, etc.) e implica la alimentación de la planta mediante una solución nutritiva disuelta en agua

VALORES DE REFERENCIA





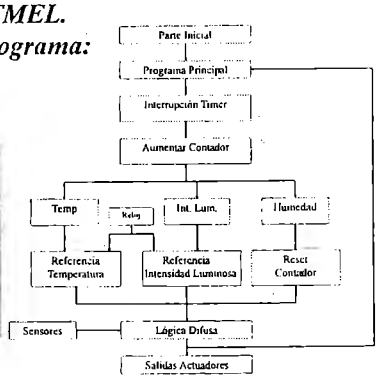




CONTROLADOR

Para el control del invernadero se selecciónó el microcontrolador AT90S8535 que es un microcontrolador de la familia de los AVR's de ATMEL.

Programa:

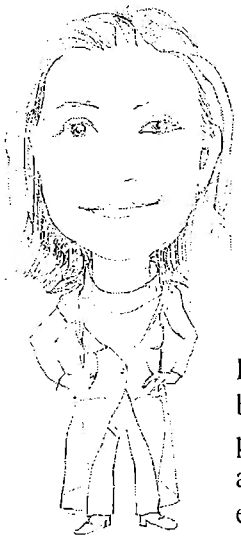


ACTUADORES

CONCLUSIONES

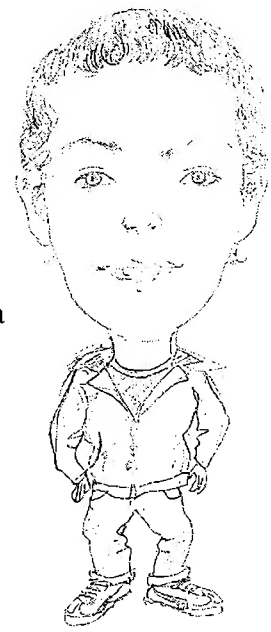
Este invernadero es reproducible y utilizable en prácticamente cualquier lugar con cualquier tipo de condiciones climáticas.
Trabaja las 24 hrs. del día con gran exactitud a diferencia del ser humano, además de que no requiere personal especializado mas que para la programación del controlador, lo que lo hace "independiente" (al invernadero) una vez instalado.
Al realizar una automatización, es conveniente que sea a gran escala para que sea rentable debido a los actuadotes y a la infraestructura necesaria.
Por medio de la lógica difusa se logra obtener la experiencia de expertos al alcance de cualquiera haciéndolo accesible para cualquier publico.

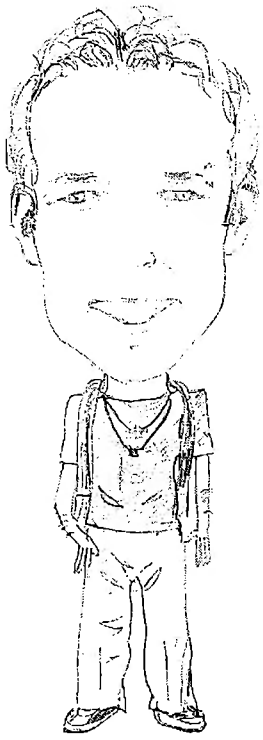
Agradecimientos:



MARIANA REYES. Agradezco muy especialmente a mi familia (papá, mamá, lalo, pilarica, bolo, coneja, pocky y chuck) que fueron los que siempre me apoyaron cuando se volvió pesado el proyecto. Gracias a mis compañeros de equipo por todas las canas que me sacaron, por las alegrías y peleas que tuvimos. Finalmente, muchas gracias a Pedro Ponce y a Flavio por su tiempo y paciencia.

FELIPE AGUIRRE. A mi Familia, gracias por brindarme la oportunidad de culminar un sueño, por darme la confianza necesaria para seguir adelante y realizar mis metas, pero sobre todo por estar conmigo en todo momento. Mamá: gracias a ti soy una mejor persona. Papá: gracias por alentarme a siempre seguir adelante. Brenda y Andrés: gracias por depositar su confianza en mi.
A nuestro Asesor Dr. Pedro Ponce, por su infinita paciencia, guía, dedicación y sabios consejos para la elaboración de este proyecto.
A Gloria, gracias por tu amor, apoyo y comprensión durante todo este tiempo. Siempre estarás en mí.
A mis Amigos, les agradezco sus consejos y su compañía en todo momento, en especial a Alejandro, Jorge, Ángel y Bob.
A mis compañeros de Equipo Pedro y Mariana, por su esmero y entusiasmo dedicado.
Gracias a todos ustedes, hoy no me imagino mi vida sin ustedes.





PEDRO PARRA. Quiero agradecer mucho el apoyo incondicional, la orientación y el cariño de mi familia, en la cual incluyo a mi abuela, que ha sido además de paciente y cariñosa, un gran ejemplo a seguir. Quiero agradecer a mis padres, por su esfuerzo, por sus sacrificios y por todas sus enseñanzas. Gracias por haber estado ahí para verme levantar y para aplaudirme cuando lo hago.

ÍNDICE

Objetivos y metas 3

Justificación 3

I. Introducción *3*

I.I. Estado del arte 4

II. Teoría Básica de Hidroponía y Lógica difusa. *4*

II.1 Hidroponia 4

II.2. Jitomate 6

II.3 Lógica difusa 8

II.3.1. Variables de entrada 13

II.3.2. Justificación de Reglas 16

II.3.3. Simulación 17

III. Estructura Física del Invernadero *20*

III.1. Diseño físico 20

III.2. Diseño electrónico 22

III.3. Flujo de aire 24

III.4. Análisis Mecánico 25

IV. Etapa de sensado *25*

V. Microcontrolador *29*

V.1. Programa 34

VI. Pruebas y Resultados *36*

VI.1. Sensores 36

VI.2. Actuadores 37

VI.3. Microcontrolador 40

VII. Estudio de mercado *43*

VIII. Conclusiones *45*

IX. Recomendaciones *46*

X. Anexos *47*

XI. Referencias *49*

Objetivos y metas

Objetivo general

- **Automatizar un invernadero de jitomates por medio de un controlador difuso.**

Objetivo del semestre

- **Realizar el diseño y el prototipo del invernadero.**

Justificación

El invernadero esta pensado para trabajar por medio de un sistema de hidroponía; Es una técnica muy eficiente para el cultivo de plantas. Con la ayuda de la lógica difusa pretendemos facilitar el cultivo de jitomates reduciendo la dependencia del ser humano durante el desarrollo del jitomate.

La lógica difusa puede tomar la experiencia de los expertos, esta se puede encontrar a través de expertos y libros entre otros.

Realizamos un control difuso que disminuye la intervención de la mano del hombre, controlando las ***variables más importantes para el crecimiento de una planta de jitomates dentro de un invernadero***. La lógica difusa es una herramienta muy poderosa para el control de sistemas no lineales de los cuales no se tienen un modelo matemático, en este caso, el crecimiento de una planta de jitomate es un comportamiento muy difícil de predecir e igualmente difícil de modelar.

I. Introducción

La finalidad de automatizar un invernadero de jitomates mediante lógica difusa es con el fin de contar con un invernadero independiente, con un microcontrolador y diversos sensores, que gobernados por un sistema difuso propuesto por expertos, sean los encargados de controlar la iluminación, temperatura y humedad del invernadero, manteniéndolo dentro de los parámetros deseados las variables a controlar.

Se están combinando dos técnicas para generar un mayor beneficio a un menor costo, es decir, para obtener una mayor cosecha con una menor inversión de recursos, tanto humanos como materiales. Además, se busca darle una cierta independencia a los invernaderos actuales. Se espera que este proyecto genere interés en el cultivo automatizado de jitomates para una mayor investigación y desarrollo de esta área en nuestro país.

Nuestro proyecto es pionero en nuestro Campus, este proyecto esta pensado en ayudar a incrementar las cosechas de jitomates en nuestro país y de esta forma lograr ayudar a nuestra comunidad que tanto lo necesita, esperamos esto sea posible en un futuro a corto plazo.

I.I. Estado del arte

Lo más reciente en el campo de la hidroponia es la automatización de la misma. El problema en ésta área es que los invernaderos son totalmente personalizados y las compañías que se dedican a elaborarlos, sólo manejan este esquema. El cliente da las dimensiones de su invernadero y especifica qué es lo que quiere automatizar y el presupuesto con el que cuenta. De hecho, en EE.UU. hay planes del gobierno para financiar este tipo de proyectos [7].

En México también está habiendo un gran desarrollo en esta área. En la Universidad de Chapingo se están desarrollando cultivos hidropónicos automatizados a distintas escalas, tanto para el autoconsumo como para la industria. Sin embargo se maneja a nivel prototipo y el proceso es lento [7].

En nuestro país se ha buscado el desarrollo de la agricultura con lógica difusa, pero no aplicando la automatización como tal. En este aspecto, casi todos son proyectos de investigación a los que no se les ha dado mayor aplicación ni difusión, más que como artículos de divulgación científica.

En el área comercial, Canadá es el país más avanzado en la automatización e industrialización de este tipo de cultivos, pero son manejados con control convencional. Sin embargo, se está desarrollando y fomentando investigación para generar nuevas tecnologías. Finalmente, en Japón se están manejando paredes de hidroponia en algunos establecimientos tipo supermercado. Básicamente utilizan la técnica de película NFT (se explicará esta técnica en el siguiente apartado de este documento) [7].

II. Teoría Básica de Hidroponía y Lógica difusa.

II.1 Hidroponia

La hidroponia es un método de cultivo en el cual no es necesaria la tierra como sustrato para el crecimiento y desarrollo de las plantas, en cambio se utiliza un medio acuoso del cual ellas toman los nutrientes y minerales que requieren.

La palabra hidroponia proviene del griego hydro: agua y ponos: labor o trabajo, literalmente, significa 'trabajo en agua'.

Si bien desde hace mucho (en 1699) Woodward admitió que es posible cultivar plantas sin tierra, se puede decir que la hidroponia es una técnica nueva, ya que no ha sido sino hasta en las últimas décadas cuando ha adquirido importancia [7].

Actualmente los países líderes en la hidroponía son Canadá, Holanda, Alemania y Estados Unidos. Aunque México aún no figura, se espera que en algunos años más ocupe una posición relevante.

Los métodos de cultivo hidropónicos actuales emplean diversos tipos de sustrato, como grava, arena, aserrín, cascarilla de cereales (salvado), arcillas expansivas y carbón, entre otros. A ellos se añade una solución nutritiva que contiene todos los elementos necesarios para el normal crecimiento y desarrollo de la planta que se va a cultivar.

Entre las características que convierten a la hidroponia en una buena opción de producción vegetal se encuentran:

Ventajas:

El espacio necesario es muy reducido	Es un sistema que, bien realizado, no es dañino al medio ambiente.
Se tiene gran control de las variables, una alta densidad de población y una fácil corrección de los niveles de nutrimentos.	Cuando se tiene un conocimiento de las necesidades de la planta, no es un sistema caro, y permite ir de lo básico a lo avanzado.
No se depende tanto de los factores meteorológicos	Se obtiene una mayor precocidad de las plantas
Se hace posible cultivar repetidamente una misma planta durante todo el año, lo que permite obtener varias cosechas.	Se ahorra agua, ya que no hay desperdicio.
Se logra bajar los costos.	No requiere de maquinaria.
Se disminuye la contaminación ambiental, el desgaste de los suelos y el riesgo de erosión	Ofrece de seis a nueve formas de cultivo

"Tabla II.1. Ventajas de la hidroponía"[2].

Existen tres niveles de la hidroponía: el de autoconsumo, el de comercio y el industrial. En general, para iniciar un cultivo el primer paso es poner a remojar la semilla 72 horas hasta que se obtenga un brote. A partir de esta fase y hasta que la planta tenga de dos a cuatro hojas, sólo se necesita agua. Posteriormente la semilla se siembra en el sustrato inerte y se nutre con aproximadamente 20 minerales diversos.

Un aspecto muy importante en la hidroponía básica es el de no desperdicio de agua. Con este sistema se trata de ahorrar al máximo el vital líquido. Éste se recicla o se utilizan sistemas de riego por goteo; por ejemplo, un volumen de 200 mil litros puede alcanzar para cinco hectáreas.

Una vez que se conocen las necesidades nutritivas de la planta, se le dan los nutrientes directamente en la raíz mediante una solución preparada. Se tienen también que conocer la temperatura ambiental y el pH del agua, adecuados para la planta. Éste último es un factor básico para el buen crecimiento de ella.

La hidroponía comercial representa un segundo nivel, pues demanda un mayor número de requisitos y se realiza en una extensión de por lo menos una hectárea. El tercer nivel es el de la hidroponia industrial, para la cual se contemplan extensiones de cinco hectáreas o más, y se necesita de invernaderos.

Existen diferentes técnicas de hidroponia:

- Película Nutriente (NFT, en inglés).- Consiste en la recirculación constante de la solución nutritiva en contacto con la parte baja de la raíz. La planta es sostenida por medios mecánicos.
- Aeroponia.- Es la alimentación por nebulización o rocío. Las plantas son suspendidas en un panel y las raíces están suspendidas en el aire.
- Cultivo vertical.- Es en bolsas colgantes o en tubos, a los cuales se les hacen perforaciones a los costados, donde se insertan las plántulas. El riego se hace por goteo o por una columna vertebral distribuidora. Este sistema no se puede hacer automático.

II.2. Jitomate

El jitomate es el segundo cultivo más importante en el continente Americano, después de la papa. Es una planta muy sensible a cambios de temperatura y humedad. De hecho, es una de las plantas comerciales más delicadas [5].

El jitomate tiene un mercado "cautivo" en México, al ser un ingrediente básico en platillos típicos caseros como sopas y salsas. También es importante hacer notar que se usa en la preparación de platillos originarios de otros países que han sido adoptados en el nuestro, como salsas mexicanas, hamburguesas, hot-dogs, pizzas, etc. y en la elaboración de productos procesados, como la salsa "catsup".

Al ser una planta sensible, necesita de cuidados especiales, por lo cual se encarece su precio. Los factores climáticos también son decisivos en crecimiento del jitomate. Es uno de los alimentos que más fluctúa en precios en el mercado a pesar de ser de consumo básico.

Por todo lo anterior, se decidió usar el jitomate en este proyecto, pues el que muchos factores adversos que pueden influir en forma negativa en su cultivo, puedan ser controlados en un invernadero cerrado, evitará muchas plagas y enfermedades, si no es que todas.

El tipo de jitomate que utilizamos es el jitomate saladet. Es el jitomate más utilizado para ensaladas y en general el de mayor consumo a nivel mundial. Se trata de un jitomate de tamaño medio y muy dulce. El nombre saladet viene del francés (ensalada), debido a que es muy utilizado en ensaladas.

Los principales aspectos en el cultivo de esta planta son [7] :

Requiere de un pH de 5.5 a 6	En cuanto al riego, 1m^2 de superficie debe de regarse con 3-4 litros en el verano y 2-3 litros en invierno
Su periodo crítico de hidratación es desde la floración hasta la pinta (cuando torna color rojo el jitomate)	Se incrementa el riego a medida que crece la planta
Cuando llega a 2 m. de altura y cuenta con 4-5 racimos desarrollados, se aplican riegos con igual frecuencia y volumen. Para acelerar la maduración del fruto se restringe el volumen de riego	La polinización se puede realizar con abejas o con vibradores y lo ideal es que se dé a una temperatura de entre 20 y 24 °C
Con respecto a la poda, se deben dejar 2 ó 3 tallos y 12-13 hojas, máximo, para que los nutrientes se vayan a los frutos y no a alimentar a hojas y tallos extras.	Se deben sujetar con tutores o palos guía para que la planta se enrede en ellos.
El tamaño de la raíz de jitomate en hidroponia es de 25-40 cm	En caso de que el tallo sufra alguna cortada o herida, ésta sana si se le pone cinta dhesiva
Su cultivo se da por transplante, es decir, primero se da la germinación en un sustrato con agua solamente y, ya que tiene 4-5 hojitas, se pasa al invernadero definitivo. Esto con el fin de garantizar una planta fuerte, ya que sólo las mejores serán las que se transplantarán al invernadero, para hacer eficientes los recursos.	En el caso del jitomate saladet (el que se utilizará en este proyecto) la variedad precoz tarda entre 50 y 65 días en dar frutos (sin madurar) mientras que la tardía tarda entre 120 y 150 días.
Hay distintas variedades de jitomates, como el bola, el saladet, el cherry, etc.	En general los jitomates tienen 2 tipos de variedades, la precoz y la tardía.
Tarda entre 5 y 6 días en germinar	Los frutos de esta variedad se clasifican: ◆ Pequeños si pesan entre 60 y 100 gr. ◆ Grandes si van de 180 a 200 gr.
El área ideal para sembrar jitomates es de 3 a 5 plantas por m^2	Las variables más importantes a considerar son la humedad, la temperatura y la intensidad luminosa

"*Tabla II.2.* Principales aspectos en el cultivo del jitomate"*[7].*

✓HUMEDAD [7]:

◆ La humedad relativa propuesta por expertos es del 50%-60%

La alta humedad relativa favorece el ataque de enfermedades fungosas. Si se llega a 80-90% la producción de hongos y parásitos es inevitable. Otro efecto del exceso de humedad ambiental es que las anteras se hinchan y no se rompen para liberar el polen, o se apelmazan, por lo que la fecundación no se realiza y disminuye por ello el número total de frutos por planta. La alta humedad relativa afecta también el peso promedio de los frutos y los rendimientos disminuyen en un 24% en relación a las condiciones óptimas. El fruto puede también sufrir deformaciones por polinización deficiente.

Si la humedad relativa es menor a 50% no hay una buena retención estigmática de los granos de polen y las flores se desprenden de la planta. Si disminuye a menos del 40% se provoca deficiencia de calcio, ya que este elemento se absorbe mejor cuando existe transpiración normal, misma que se da un porcentaje mayor de humedad.

INTENSIDAD LUMINICA [7]:

◆La intensidad luminosa propuestas por expertos es de 3000-6000 luxes. Para el jitomate, es necesario que la intensidad lumínica sea de 5000 luxes. La planta de jitomate se desarrolla mejor con intensidad lumínica alta. Cuando ésta es baja afecta a la apertura de estomas y disminuye su número por milímetro cuadrado. La mayor intensidad de fotosíntesis se logra en el rango de 3000 a 6000 luxes.

TEMPERATURA [7]:

◆ La temperatura ambiente ideal es de 10°C a 35°C.

La actividad fotosintética es más alta cuando en el suelo hay una temperatura entre 25°C y 30°C, y ésta actividad disminuye a temperaturas por debajo de 15°C o por encima de 35°C. La mayor producción de fruto se obtiene con temperaturas de entre 25°C a 30°C. La temperatura mínima en un sustrato mineral u orgánico debe ser de 12°C; la óptima entre 20°C y 24°C

Etapa de Crecimiento	*Temperatura °C*
Temperatura del suelo	*20-25*
Temperatura de germinación	*Mínima 10, máxima35 (de preferencia 20-30)*
Crecimiento de plántulas	*Rango 25-26*
Elongación del tallo	*Rango 17-30*
Crecimiento de brotes	*Rango 26-35 / 18-22*
Crecimiento vegetativo	*Rango 22-23*
Formación de flores	*Rango 20-26*
Formación de polen	*Rango 20-26*
Germinación del tubo polínico	*Rango 22-27*
Cuajado de fruto	*Rango 18-22*
Maduración del fruto	*Rango 24-28*
Maduración del fruto II	*Rango 18-24*

Tabla II.3. *"Temperatura contra desarrollo [1]."*

II.3 Lógica difusa

La lógica difusa puede emular a la lógica humana a diferencia de la lógica convencional y tomar decisiones acertadas, independientemente de la incertidumbre de la información.

Es una herramienta flexible que se basa en conjuntos difusos y reglas lingüísticas dictadas por expertos.

Para ejemplificar lo anterior, tomemos como ejemplo el controlar la velocidad de un automóvil. Ésta es una variable que puede tomar distintos valores de pertenecía entre varios conjuntos difusos, etiquetados como velocidad alta, media o baja, incluso se pueden usar intensificadores como lo son muy, muchísimo, etc.

Estas variables lingüísticas están regidas por reglas que dictan la salida del sistema, es decir a partir de esta información un conductor evalúa la magnitud de su acción. Si la velocidad es alta y el conductor decide frenar, éste presiona el freno mucho. Para el

conductor, el presionar el freno mucho o poco implica el utilizar su experiencia como conductor para evaluar la magnitud de su acción y no utiliza valores nítidos, en tomar esta acción.

En otras palabras, la lógica difusa es un conjunto de principios matemáticos, basados en grados de membresía o pertenencia, cuya función es modelar información. Este modelado se hace en base a reglas lingüísticas, que aproximan una función mediante la relación de entradas y salidas del sistema.
Esto se puede pensar como un mapeo difuso, esta lógica presenta rangos de membresía dentro de un intervalo entre 0 y 1, a diferencia de la lógica convencional, en el cual el rango se limita a dos valores, el cero, o el uno.

A través del uso de lógica difusa se puede representar la forma de la lógica humana. Por ejemplo, podemos decir que el día es caluroso, que el automóvil va muy rápido, etc., sin decir un valor preciso, se da a entender un rango de valores.

Siendo necesario automatizar un proceso (un invernadero), el cual es controlado por un trabajador, el sistema difuso tendrá la tarea de emular a este experto. Tomando en cuenta que el experto toma juicios en base a su criterio y a su experiencia, y tomando en cuenta que estos juicios y decisiones se dan de una manera lingüística como "alto", "lento", etc.., se puede apreciar que un sistema convencional no maneja este tipo de entradas, mientras que el sistema difuso sí.

Otra ventaja del sistema de control basado en lógica difusa es que no es necesario conocer un modelo matemático del sistema real a controlar, pues se puede ver como una caja negra a la cual se le proporcionan entradas, y, a través del sistema, esta planta generará la salida deseada. En el control convencional es necesario conocer la planta del sistema.

Para desarrollar un control de estas características es necesario un experto, en este caso el trabajador, del cual se tomará un record de las situaciones que se le presentan y la solución que él les da. Esta experiencia se traduce en reglas que usan variables lingüísticas.

Las partes básica de un controlador difuso son 3:

Fuzzificación: Es el nexo entre las entradas reales y difusas. Todas las entradas necesitan ser mapeadas de forma que las reglas puedan utilizarlas.

Reglas: Son una razón que debe servir de medida y a la que se han de ajustar las acciones para que resulten rectas. Ellas dictan la acción de control a tomar y se derivan de un experto. Estas reglas tienen la estructura de relaciones. La lógica difusa se basa en relaciones, las cuales se determinan por medio de cálculo de reglas "SI-ENTONCES" (con las cuales se pueden modelar aspectos cualitativos del conocimiento humano, así como los procesos de razonamiento sin la necesidad de un análisis cuantitativo de precisión). Un ejemplo de una regla sería:

Si la temperatura es alta, entonces se debe de encender el ventilador.

Defuzzificación: Toma un valor difuso de las reglas y genera una salida real .

Grado de Membresía o Pertenencia: Se puede definir como el grado de verdad de una entrada difusa. Si se define en base a la lógica tradicional, se puede decir que es el valor nítido que es compatible con una función de membresía.

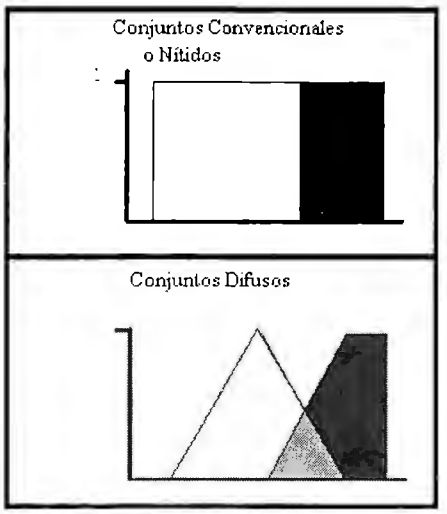


Figura II.1. *"Grados de membresía."*

Función de Membresía: Define un conjunto difuso, mapeando las entradas nítidas de su dominio a grados de membresía.

Pueden ser de distintos tipos:

Las de tipo Triangular:

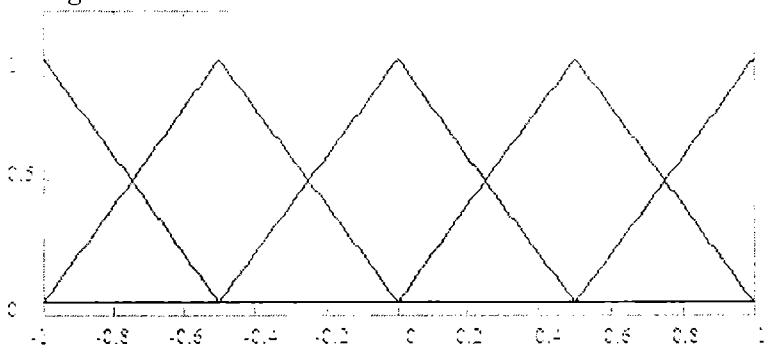


Figura II.2. *"Funciones triangulares."*

Las de tipo Gaussiana:

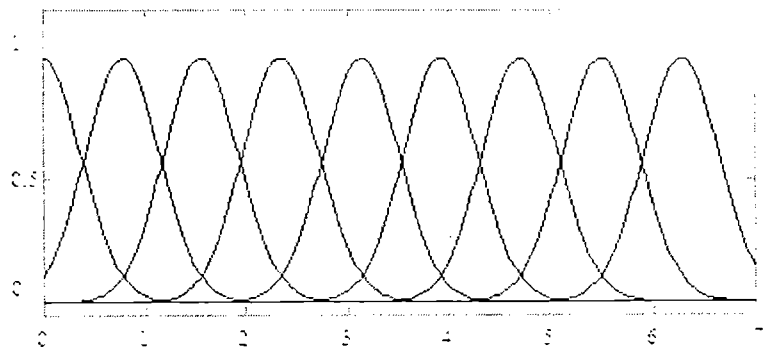


Figura II.3. *"Funciones gaussianas."*

Las de tipo Singleton:

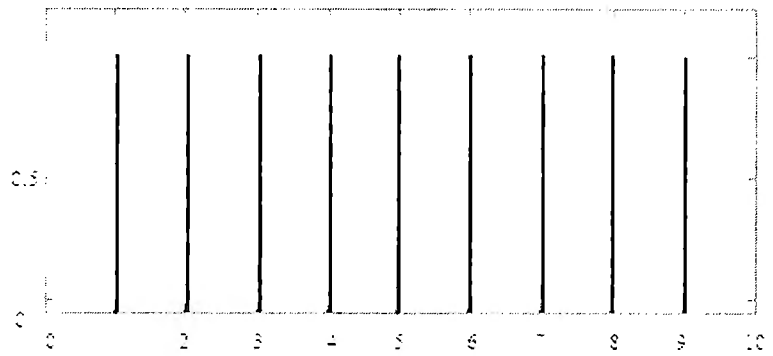


Figura II.4. *"Funciones Singleton."*

Universo Discurso: Es el rango de todos los posibles valores aplicables a un sistema variable, es decir, es el rango de valores que se van a manejar en mi sistema.

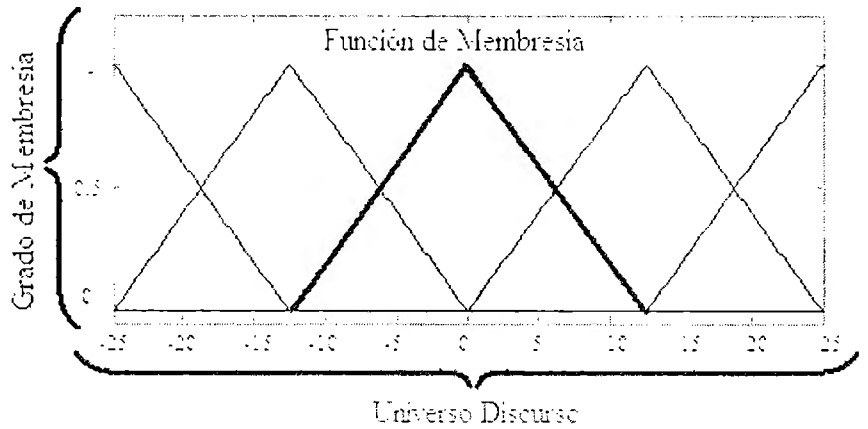


Figura II.5. *"Conceptos Básicos."*

En este trabajo se dará una breve explicación de lo que es la lógica difusa, aplicada a un sistema de control para la automatización de una hidroponia de jitomates.

Una de las bondades de los sistemas difusos es que no necesitan el modelado de una planta, tampoco necesitan la ejecución de la identificación en tiempo real. La esencia del control difuso es que convierte la estrategia de control lingüístico, la cual se basa en el conocimiento de un experto, en una estrategia de control automático.

Es de suma importancia tener presente el hecho de que los controles difusos se basan en reglas de control empíricas. El objetivo para esta parte es esbozar de una manera generalizada la lógica difusa.

Es necesario puntualizar de manera clara que se demostró en varios trabajos las ventajas que tiene un control difuso sobre un control convencional.

Un ejemplo de ello es que, de acuerdo al *paper "Climatic Control of a Storage Chamber using Fuzzy Logic"* la lógica difusa ha emergido como un método de control superior para los procesos que son matemáticamente difíciles de modelar. Este *papper* investiga el potencial de la lógica difusa para el control de un proceso. Un controlador de lógica difusa fue diseñado e implementado para una cámara industrial donde las

condiciones de la temperatura y de la humedad se tienen que mantener durante la operación. Los resultados de experimentos realizados y una comparación con un control PID, demuestran la superioridad en confiabilidad y robustez del controlador difuso bajo condiciones de funcionamiento normales y en presencia de disturbios [20].

Otro claro ejemplo se puntualiza en el *paper "Fuzzy Tuning Method for Simulation of Dynamic Processes"* donde se ha propuesto y se ha investigado un nuevo tipo de MIMO (*multi-input, multi-output*), el cual es un procedimiento difuso de la inferencia para la identificación sucesiva de un proceso dinámico de primer orden. Consiste en dos tipos de reglas difusas en las cuales se ajusta la ganancia K y la constante de tiempo T. Un nuevo procedimiento de *soft switching* especial llamado switch difuso fue propuesto en este *paper*. Este calcula en todo momento el grado de activación de la sintonía necesaria para ambos razonamientos difusos. Un examen a la planta fue usado como una evaluación con el fin de ver la verdadera aplicación y eficacia de éste método de razonamiento difuso. Los resultados arrojados en esta evaluación fueron satisfactorios [19].

Teniendo en cuenta esto, se tiene de manera clara porque optamos como una alternativa de solución manejar controladores difusos.

Para este punto es bien sabido que el modelado difuso es un método para describir las características de un sistema, usando reglas de inferencia difusas. Se hace especial referencia en el manejo de las reglas de control difuso, comúnmente extraídas de un experto y de la sintonización de éstas.

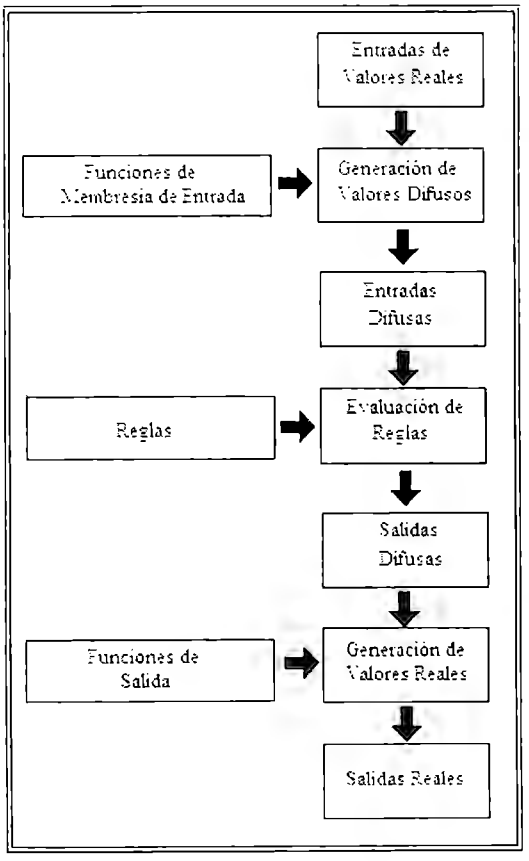


Figura II.6. *"Esquema básico de Lógica Difusa.*

II.3.1. Variables de entrada

Temperatura.- La planta de jitomate responde favorablemente a los cambios de temperatura y a transiciones diurnas nocturnas. Nuestra referencia de temperatura varía conforme variaría la temperatura en un día normal, es decir en la transición de mañana a medio día, la temperatura aumenta de 12 a 30 °C y en la noche decrece hasta llegar a 12 ° C. Para establecer nuestra referencia de temperatura, realizamos una campana a través de las siguientes reglas:

	Hora del día		Salida
Si	Madrugada (1)	Entonces	Y=0.7364*X+19.96
Si	Mañana (2)	Entonces	Y=2.4*X+32.04
Si	Medio día (3)	Entonces	Y=30
Si	Tarde (4)	Entonces	Y=-2.4*X+32.04
Si	Noche (5)	Entonces	Y=-0.7364*X+19.96

Tabla II.2. "Reglas para las temperaturas en el invernadero durante el día."

En la siguiente figura podemos observar las funciones de membresía para la variable de entrada tiempo. Justo en la parte inferior podemos observar la campana generada por la lógica difusa (el crecimiento de temperatura de 12 a 30°C).

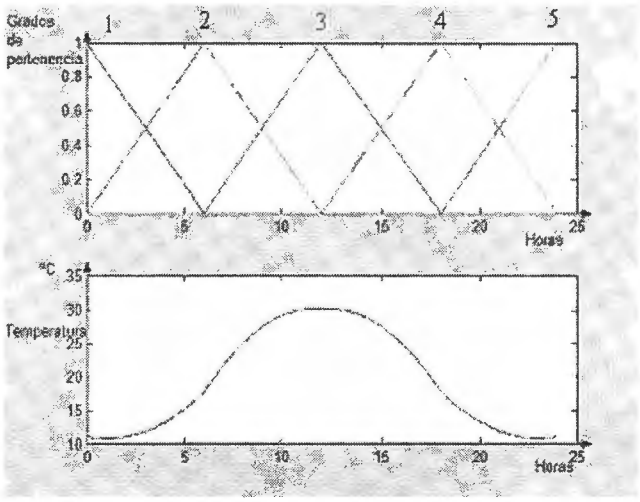


Figura II.7. "Funciones de membresía para alimentación contra horas del día."

Una vez que contamos con la referencia para la temperatura, lo que pretendemos hacer es realizar una comparación de la temperatura real con la temperatura de referencia para cada periodo de muestreo. Con este proceso intentamos efectuar las correcciones adecuadas para mantener las condiciones del invernadero bajo control. Ambas (la temperatura de referencia y la temperatura real) entran a un sistema de control de lógica difusa, el cual, por medio de reglas, activa ya sea un ventilador (cuando la temperatura real es mayor a la de referencia) o un banco de resistencias (cuando la temperatura real es menor a la de referencia).

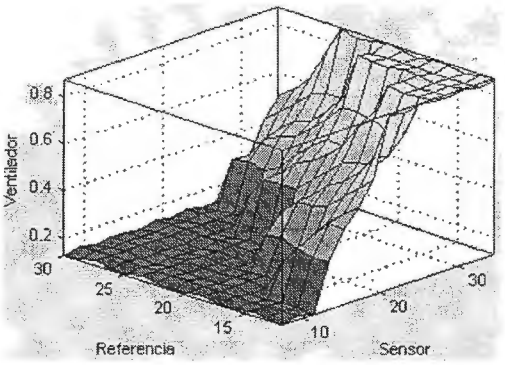


Figura II.8. "Contorno de ventiladores"

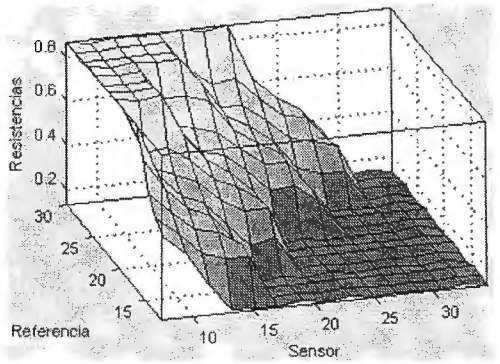


Figura II.9. "Contorno de Resistencias"

En las figuras II.8 y II.9 podemos ver el rango de acción de cada uno de los actuadores que controlan la temperatura para mantenerla en los valores de referencia. Como podemos ver, las dos gráficas tienen una acción inversa, ya que el ventilador funciona mientras las resistencias están apagadas a una temperatura superior a la de referencia. Por otro lado si la temperatura de referencia es mayor a la medida por el sensor, se accionan las resistencias. De esta forma tan simple y lógica pretendemos mantener una temperatura adecuada para la planta. Las dos gráficas fueron obtenidas a partir de 35 reglas validadas por expertos y libros de referencia (Ver anexos Tabla II.4.).

Luz.- Para establecer nuestra referencia de luxes, al igual que con la temperatura, realizamos una campana para simular las horas del día con luz, a través de las siguientes reglas:

	Hora del Día		Salida
Si	Madrugada (1)	Entonces	Y=624.9*X + 6381
Si	Mañana (2)	Entonces	Y=624.9*X + 6381
Si	Medio día (3)	Entonces	Y=6000
Si	Tarde (4)	Entonces	Y=-624.9*X + 6381
Si	Noche (5)	Entonces	Y=-624.9*X + 6381

Tabla II.3. "Reglas para luz en el invernadero durante el día."

La planta de jitomate se desarrolla mejor con intensidad lumínica alta. La mayor intensidad de fotosíntesis se logra en el rango de 3000 a 6000 luxes.

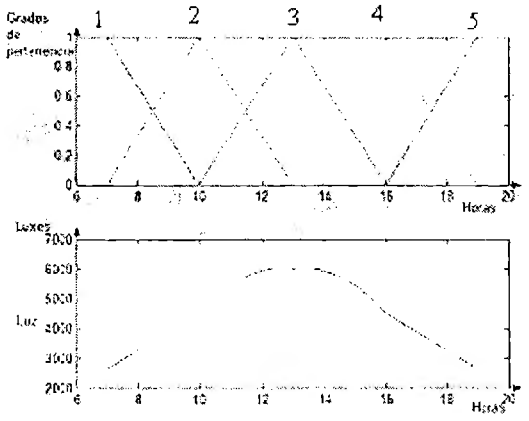


Figura II.10. "Funciones de membresía para luz contra horas del día."

Una vez que contamos con la referencia para la intensidad luminosa, al igual que con la temperatura, realizamos una comparación entre la intensidad lumínica real y la de referencia, para cada periodo de muestreo. Al entrar a nuestro sistema de lógica difusa, el cual, por medio de reglas activa un foco (para aumentar la intensidad lumínica si la referencia es mayor a la real)

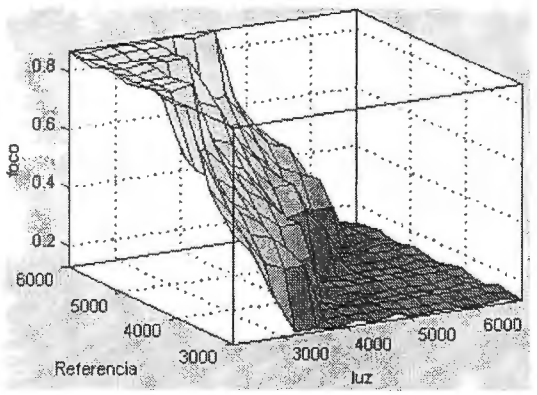


Figura II.11. *"Contorno de foco"*

En la figura II.11 podemos ver el rango de acción del actuador que controla la intensidad luminosa para mantenerla en los valores de referencia. Como podemos ver, la gráfica fue obtenida a partir de 35 reglas validadas por expertos y libros de referencia (Ver anexos Tabla II.5.).

Humedad.- A diferencia de la temperatura y la luz, la humedad es una variable que queremos mantener fija dentro del rango de 50 a 60 % de humedad relativa. Esto se debe a la naturaleza de la variable. En un día normal, la temperatura y la luz varían de acuerdo a la transición del día, pero la humedad no varía de acuerdo a estos factores. La humedad no sigue un patrón fijo.

Una humedad relativa baja causa disturbios en las flores y deficiencia de calcio en la planta.

	Humedad		Ventilador	Humidificador
Si	H-baja	Entonces	Vel-baja	Prendido
Si	H-alta	Entonces	Vel-alta	Apagado

Tabla II.4. *"Reglas para humedad en el invernadero durante el día"*

En el caso de la humedad, la lógica cuenta solamente con dos reglas ya que, como dijimos, queremos mantener el valor de humedad dentro del rango de 50 a 60 % de humedad relativa, así que cuando la entrada equivale a H-media (1) nos encontramos dentro de nuestro valor deseado.

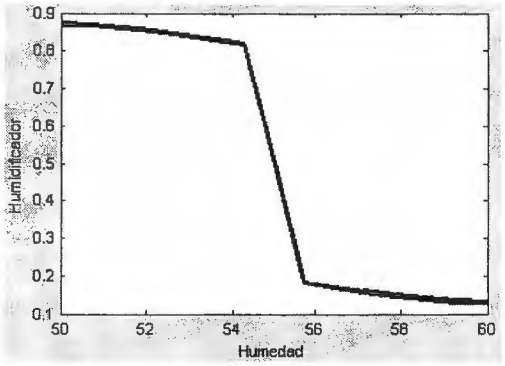


Figura II.12. "Gráfica de humidificador"

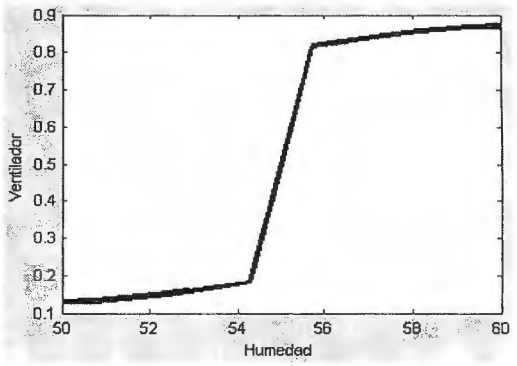


Figura II.13. "Gráfica de Ventilador"

En las figuras II.12 y II.13 podemos ver el rango de acción de cada uno de los actuadores que controlan la humedad relativa para mantenerla entre 50 y 60 % de humedad relativa. Como podemos ver, las gráficas tienen un comportamiento inverso. Cuando el humidificador esta accionado, el ventilador se encuentra apagado.

II.3.2. Justificación de Reglas

Las reglas se hicieron en base a las necesidades de una planta de jitomate. Como podemos ver, son reglas lógicas, que fueron obtenidas a partir de las especificaciones de los libros y expertos.

Para la temperatura obtuvimos los rangos de temperatura de entre 12 y 30°C, ya que la actividad fotosintética es más alta cuando en el suelo hay una temperatura entre 25°C y 30°C, y ésta actividad disminuye por debajo de 15°C, ó por encima de 35°C. La mayor producción de frutos se obtiene con temperaturas de entre 25°C a 30°C. La temperatura mínima en un sustrato mineral u orgánico debe ser de 12°C; la ideal debe de estar entre 20°C y 24°C. Debido a que la planta de jitomate responde favorablemente a los cambios de temperatura y la transición diurna-nocturna, manejamos una referencia de temperatura que fluctúa entre 12 y 30°C.

Para el jitomate, es necesario que la intensidad luminosa sea de 5000 luxes. La planta se desarrolla mejor con intensidad lumínica alta. Cuando ésta es baja, afecta a la apertura de estomas y disminuye su número por milímetro cuadrado. La mayor intensidad de fotosíntesis se logra en el rango de 3000 a 6000 luxes. Al igual que con la temperatura, la referencia de temperatura es manejada entre 3000 y 6000 luxes, esto es debido a la transición natural de un día.

Por otra parte la humedad es una variable que no fluctúa de una manera lógica a lo largo de un día. La humedad no sigue un comportamiento similar al de la temperatura y la luz (con sus excepciones), por lo que la vamos a manejar dentro del rango de 50 y 60 % de humedad relativa.

La ventilación dentro de los invernaderos influye de manera decisiva en la regulación de la temperatura, de la humedad relativa y del flujo de oxígeno y CO_2. La circulación del aire influye también en la sanidad de las plantas, en su intensidad de fotosíntesis y transpiración. Por esta razón utilizamos un sistema de ventilación que consiste en un ventilador y un extractor. El ventilador está colocado en la parte inferior del

invernadero, debido a que en esa parte se encuentran las raíces y una buena ventilación de éstas favorece el crecimiento de la planta. El extractor se encuentra ubicado en la parte superior y esto se debe a que el aire caliente tiende a subir, por lo que en esa posición se puede sacar el aire caliente y disminuir la temperatura considerablemente.

II.3.3. Simulación

Se tomaron 10 muestras para 10 valores de temperatura de referencia, es decir, se calculó la acción a realizar por los actuadores con 10 diferentes temperaturas, a partir de una temperatura de referencia.

Para las pruebas de temperatura utilizamos los valores de temperatura de referencia de: 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28 y 30 °C. Cada uno de estos valores fue comparado con una secuencia de valores de temperatura de un intervalo entre 9 y 32 °C. Los resultados son los siguientes.

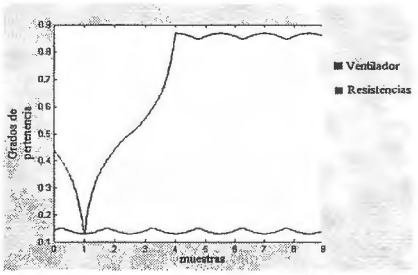


Figura II.14. "Temperatura de Ref. de 12°C"

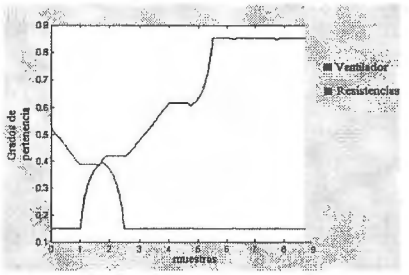


Figura II.15. "Temperatura de Ref. de 14°C"

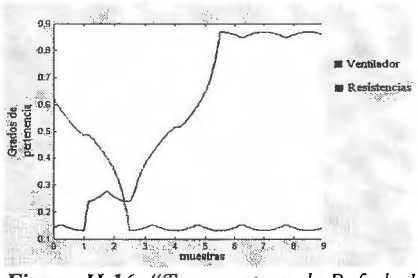


Figura II.16. "Temperatura de Ref. de 16°C"

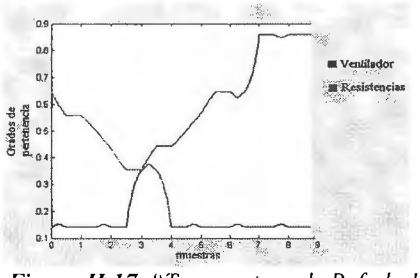


Figura II.17. "Temperatura de Ref. de 18°C"

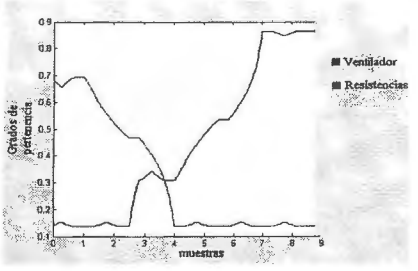


Figura II.18. "Temperatura de Ref. de 20°C"

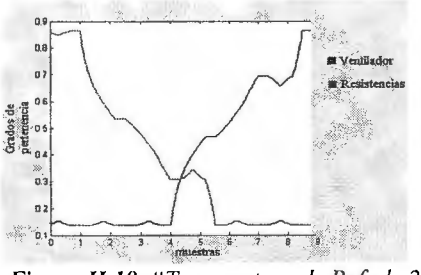


Figura II.19. "Temperatura de Ref. de 22°C"

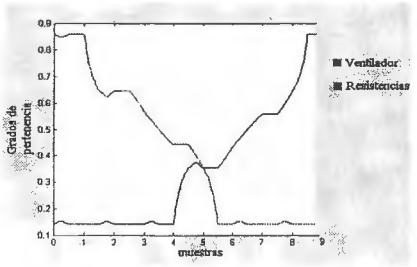


Figura II.20. "Temperatura de Ref. de 24°C"

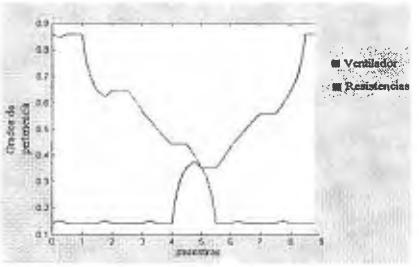


Figura II.21. "Temperatura de Ref. de 26°C"

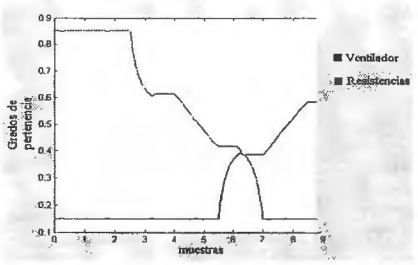


Figura II.22. "Temperatura de Ref. de 28°C"

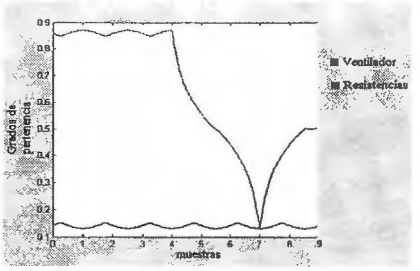


Figura II.23. "Temperatura de Ref. de 30°C"

Podemos observar en las gráficas anteriores que las curvas van cambiando conforme la referencia va aumentando.

Para las pruebas de luz utilizamos los valores de luminosidad de referencia de: 3000, 3300, 3600, 3900, 4200, 4500, 4800, 5100, 5400, 5700 y 6000 luxes. Cada uno de estos valores fue comparado con una secuencia de valores de luz de un intervalo entre 2700 y 6300 luxes. Los resultados son los siguientes.

Como trabajo a futuro se propone a manera de complemento para controlar la variable de luminosidad la implementación de unas persianas a manera de regular el flujo externo de luz natural.

A continuación se muestra la simulación de ésta propuesta:

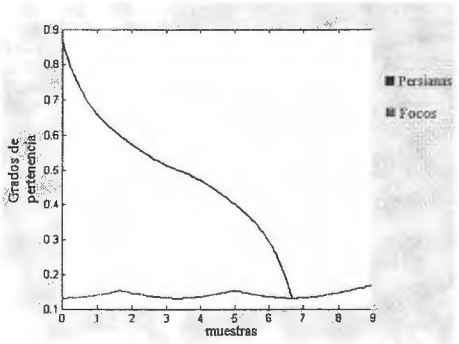


Figura II.24. "Luz de Ref. de 3000 luxes"

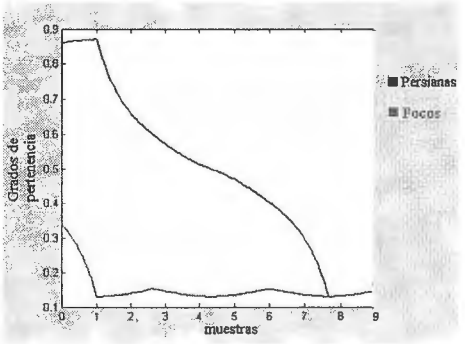


Figura II.25. "Luz de Ref. de 3300 luxes"

Figura II.26. "Luz de Ref. de 3600 luxes"

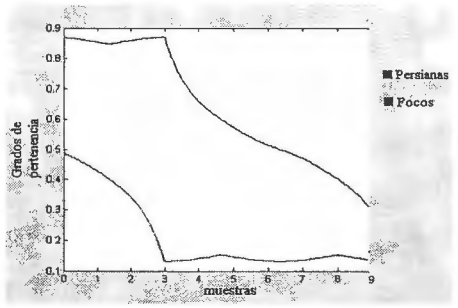


Figura II.27. "Luz de Ref. de 3900 luxes"

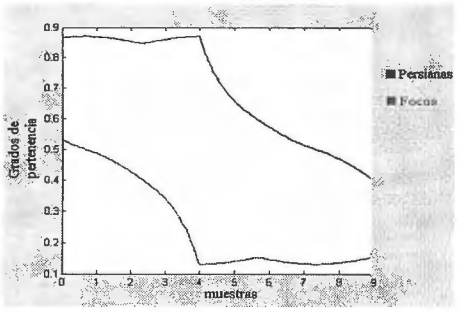


Figura II.28. "Luz de Ref. de 4200 luxes"

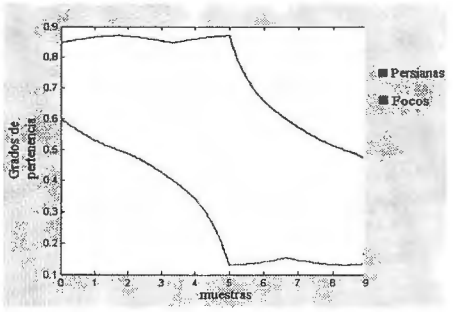


Figura II.29. "Luz de Ref. de 4500 luxes"

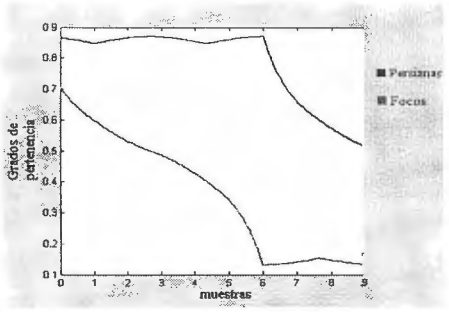


Figura II.30. "Luz de Ref. de 4800 luxes"

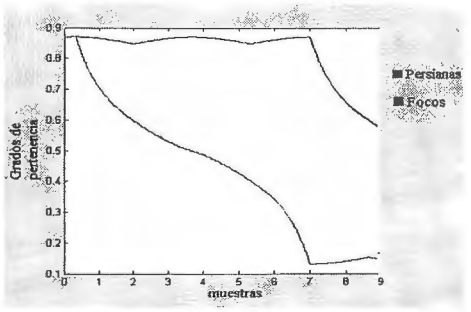


Figura II.31. "Luz de Ref. de 5100 luxes"

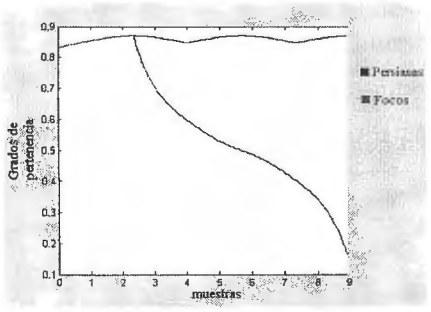


Figura II.33. "Luz de Ref. de 5700 luxes"

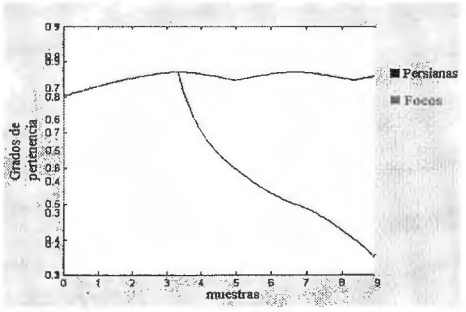


Figura II.34. "Luz de Ref. de 6000 luxes"

Debido a que la humedad es una variable que vamos a dejar fija, se realizó una sola gráfica de las acciones de los actuadores para 10 valores de humedad relativa, de un rango de entre 45 a 65 % de humedad relativa. Los resultados son.

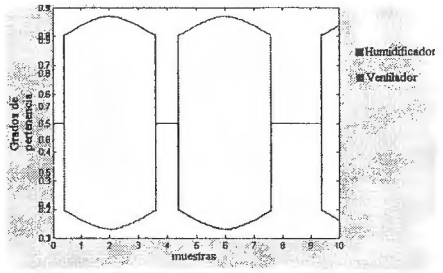


Figura II.35. "Gráfica de humedad"

III. Estructura Física del Invernadero

El invernadero esta formado por cuatro caras verticales y dos horizontales que forman un prisma cuadrangular de paredes de policarbonato y estructura de aluminio. El invernadero cuenta con sensores de humedad, temperatura y fotorresistencias que proporcionan la señal de las variables a controlar a un microcontrolador el cual gobierna los distintos actuadores que son: un ventilador, un extractor, un humidificador, un foco, una resistencia y una bomba para el suministro de nutrientes.

III.1. Diseño físico

La estructura del invernadero es un prisma cuadrangular de un metro cuadrado de base, que es una unidad estándar. La altura del invernadero neta, sin contar el espacio de circuitos y bases, es de 1 m., y esto se proyecta en base a la altura que alcanza una planta de jitomate. Se visualizó de manera modular.

Se realizó una investigación sobre las posibles paredes a utilizar para nuestro invernadero, y se optó por el policarbonato. El cual se vende en hojas de 7mm. De espesor de distintos colores. Es un material muy resistente y aislante térmico, además de que está hecho específicamente para domos y canceles.

Otro posible material a utilizar para las paredes es el acrílico, ya que también es resistente y guarda el calor, sin embargo, en cuanto al costo, es más elevado que el del policarbonato. Por ello se decidió finalmente utilizar el policarbonato.

Para la estructura se utilizaron soleras de un octavo de pulgada de aluminio, debido a que es un material resistente a ambientes húmedos, esto para evitar la corrosión.

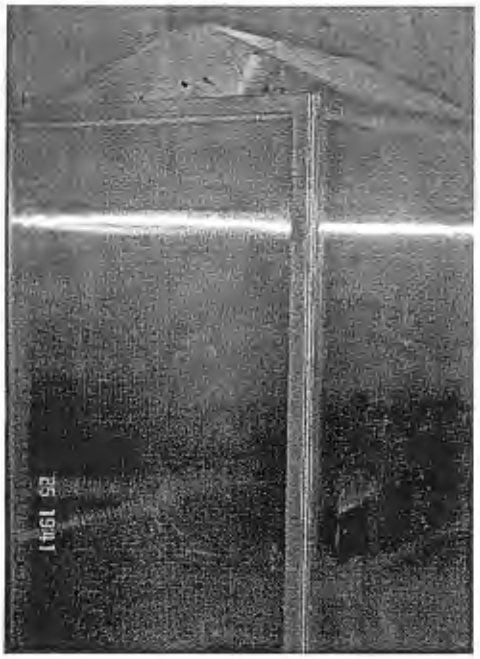


Figura III.1. "Prototipo del invernadero vista frontal"

Figura III.2. "Instalación de los componentes"

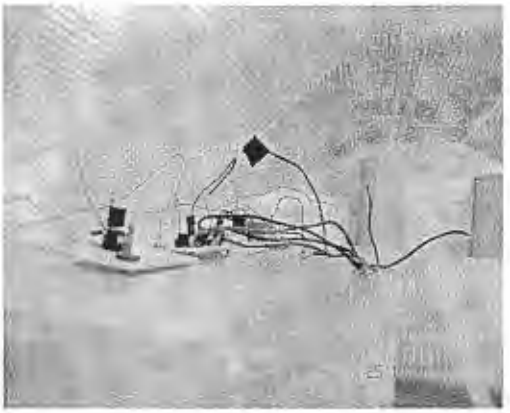
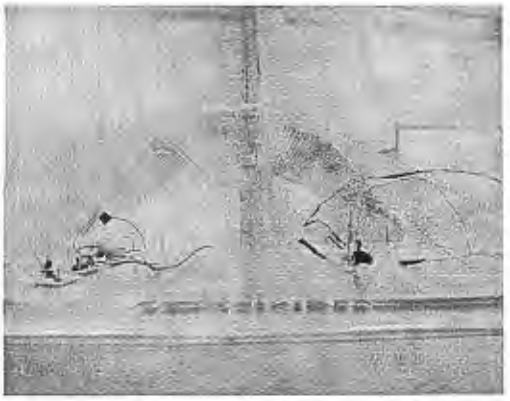


Figura III.3. y III.4 "Circuitos de sensado y acoplamiento a los actuadores"



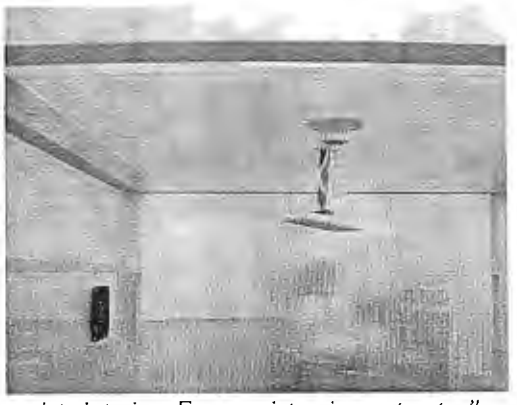


Figura III.5 y III.6 "Vista superior del invernadero.y vista interior; Foco, resistencia y extractor"

III.2. Diseño electrónico

Para sensar las variables (temperatura, luz y humedad) y recibir correctamente las señales, se eligieron los siguientes sensores:

SENSORES

Lm35DH

Es un circuito integrado de precisión, cuyo voltaje de salida es proporcional a la temperatura en grados Celsius. Tiene la ventaja de que no necesita calibración para dar una exactitud de +/- (¼) a una temperatura normal de un cuarto. Esta exactitud baja si es menor de –55°C o bien, pasa de +150°C.

Será necesario acondicionar la señal por medio de un circuito para tener el rango de voltaje de salida adecuado para su manipulación en el microcontrolador. Este circuito entrega una salida del LM35DH a una escala completa de 0.8 V a 5 V para un rango de temperatura de 2° a 50°C.
Se seleccionó este sensor debido a que ofrece una escala de medición dentro del rango de temperatura a registrar en l invernadero, es fácil de usar, tiene la precisión requerida para un ambiente que no cambia drásticamente y es muy accesible.

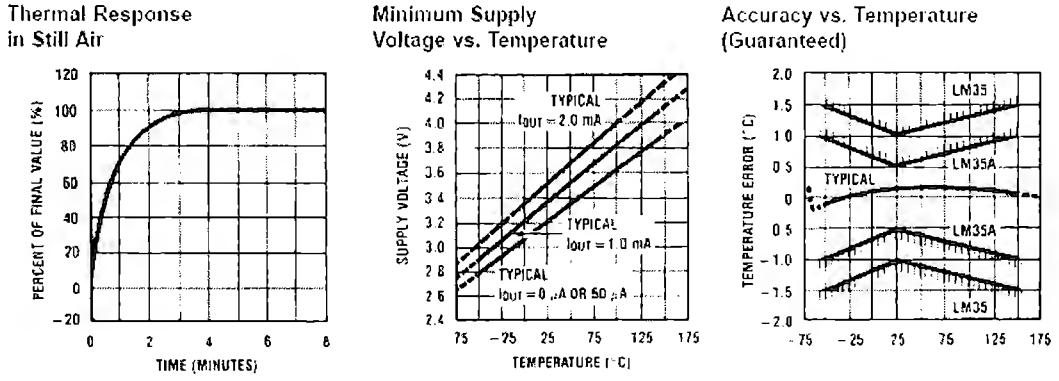


Figura III. 7. "Curva del sensor de temperatura."

En la figura II.3. del lado izquierdo podemos observar una gráfica del tiempo de respuesta del sensor para alcanzar el valor final de voltaje correspondiente a la temperatura sensada en un medio en donde no existe ninguna corriente de aire. Como podemos ver, se tarda alrededor de 3 minutos en alcanzar su valor de estado estable y darnos un valor en voltaje correspondiente a la temperatura dentro del invernadero. Por otra parte como veremos más adelante, estos 3 minutos es un tiempo más que suficiente para nuestro sistema ya que además de que la temperatura dentro del invernadero es una de las variables de transición lenta, 3 minutos se tarda el programa como período de sensado de temperatura. En la gráfica del centro podemos observar la correspondencia del voltaje de alimentación con el rango de temperatura a sensar, es decir, un rango correspondiente de voltaje de alimentación para un rango de temperaturas de sensado. En este caso podemos determinar el rango de temperaturas deseadas dentro del cual vamos a trabajar y correspondiente a ese rango, determinar el voltaje de alimentación de nuestro sensor. Por último en la gráfica de la derecha podemos observar el error de medición por parte del sensor en °C para el rango de temperaturas, con esto podemos

concluir que para nuestro rango de temperaturas dentro de las que vamos a trabajar, tenemos un error de +/- 1 °C. Ya que se tiene un controlador difuso, este error no es tan influyente en la salida del actuador, debido a que la decisión no es como en la lógica booleana en la cual así se tenga como valor 15.99999, para el controlador es 15, no así en la lógica difusa donde las transiciones de un valor a otro son más suaves. Como conclusión, podemos decir que se trata de un error despreciable para nuestro proyecto, ya que la diferencia de 1 °C para nuestro controlador, ni para la planta de jitomate, es crítica en su desarrollo.

Fotorresistencias

Para sensar la intensidad luminosa se usó un arreglo de fotorresistencias. Se hizo un circuito para determinar, experimentalmente, la relación entre el voltaje que tiene la fotorresistencia y su correspondencia en luxes. Para ello se sensó con un luxómetro, la intensidad luminosa del ambiente, y se tomaron los valores de voltaje que emitía el arreglo de fotorresistencias. El voltaje obtenido en las fotorresistencias será la señal de entrada para el microcontrolador.

Honeywell HIH3602

Es un circuito integrado de 3 terminales que necesita una alimentación de 5V. Está referido a tierra y proporciona un voltaje proporcional a la humedad relativa.
Vout = Vsupply (0.0062 (%RH) + 0.16)

Es necesario implementar un circuito de acondicionamiento de la señal para que el sensor mande las señales al microcontrolador en el rango adecuado. Se seleccionó este sensor debido a que es fácil de usar, tiene la precisión que requerimos y es relativamente accesible.

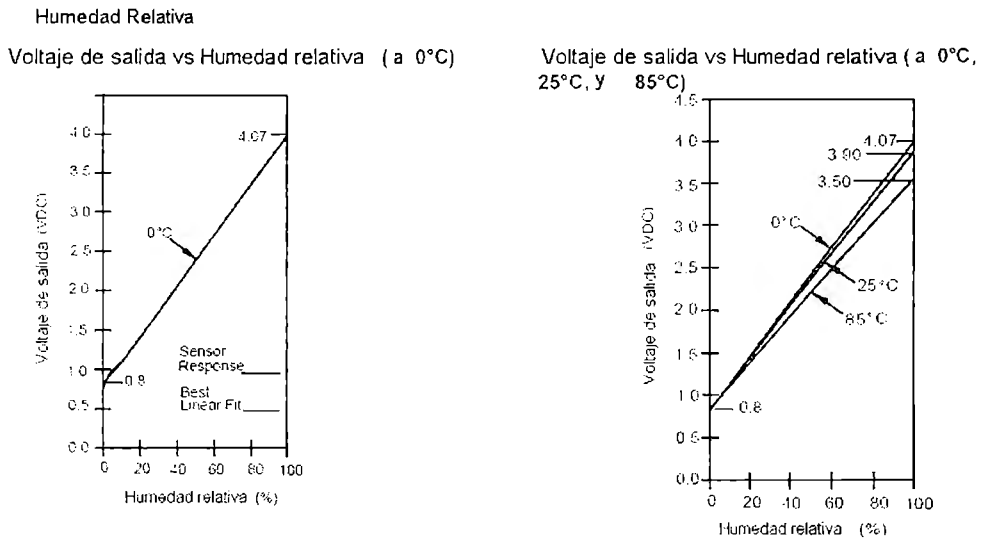


Figura III.8. "Curva del sensor de humedad."

En la figura III.2. izquierda, podemos observar la relación entre humedad relativa y voltaje de salida del sensor HIH Honeywell.

III.3. Flujo de aire

De todos los factores que debemos controlar dentro de nuestro invernadero, el más importante sin lugar a dudas es el aire que rodea al jitomate, ya que no podemos olvidar que al igual que cualquier ser vivo estos respiran, y realizan todas sus funciones fisiológicas en función de esta actividad. Lo ideal es que se renovara todo el aire, que rodea a un cultivo unas 45 veces en una hora. Es decir 75% del aire dentro del invernadero deberá de renovarse cada minuto.

El flujo de aire es uno de los factores importantes a considerar dentro del invernadero ya que con un buen flujo podemos regular con alta eficiencia la temperatura dentro del invernadero, por lo cual debemos colocar el extractor y ventilador en un lugar preciso para permitir el flujo de calor además de utilizar un ventilador y extractor con las características de potencia deseadas.

$$Q = v_s A_s \text{.....(1)}$$

$$h_B = \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right) + \frac{v_s^2}{2g} \text{.....(2)}$$

Donde:
Q : Volumen de Aire desplazado
As: Área del ventilador (área de salida)
Vs : Velocidad de salida del aire.
P_1: Presión 1 (interior).
P_2: Presión 2 (exterior).
γ: Densidad del fluido por la gravedad.
ρ: Densidad del fluido.
h_b: Altura manométrica.

Como queremos renovar el aire dentro del invernadero en 1 minuto 20 segundos. Es decir, los dos metros cúbicos de aire dentro del invernadero saldrán cada 1 minuto 20 segundos y serán remplazados por otros dos metros cúbicos de aire. Con esto podemos establecer nuestra Q como 1.5 m^3/min, es decir, el volumen de aire que sale cada minuto. Si definimos el área del ventilador como As (área de salida) tenemos que ésta es igual a:

$$A_s = \pi R^2 \text{.....(3)}$$

De la ecuación 3, sustituyendo y resolviendo para As obtenemos el valor de 0.0113 m^2. Con este valor obtenemos la velocidad de salida del aire vs= 132.74 m/min.

$$Pot = g\rho Q h_B \text{.....(4)}$$

$$\rho = 1.184 \frac{kg}{m^3}$$ [17]

Al sustituir los datos anteriores en la ecuación 4, obtenemos una potencia requerida de nuestro ventilador de 0.145 W.

III.4. Análisis Mecánico

Para el análisis de la estructura del invernadero se hizo un análisis de conexión con un perno simple sometido a cortante simple.

La estructura es de aluminio con cubierta de policarbonato, lo que la hace una estructura resistente pero muy ligera. Su peso total es de 25 Kg. Se hizo un análisis con una carga total de 50 kilogramos para tener un factor de seguridad de 2.

El esqueleto de la estructura es un pasador (tornillo) de acero, el cual soporta la estructura y une las piezas (barras de aluminio).

El pasador tiene un diámetro de 7mm. Cada metro de la barra de aluminio pesa 1.7 Kg. El pasador es de acero estructural con un esfuerzo de fluencia de 200 MPa y un esfuerzo último de 340MPa [18].

Para el cálculo del esfuerzo cortante del pasador:

$$\tau_{pasador} = \frac{P}{A} = \frac{P}{2\pi \frac{d^2}{4}} = \frac{123N}{0.007mm^2} = 1.6MPa.....(1)$$

Donde:
P: Presión
A: Area

El esfuerzo aplastante que se ejerce sobre el pasador es:

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{22.5}{35mm^2} = 0.7MPa.....(2)$$

En base a este cálculo se comprueba que el esfuerzo al que esta sometido el pasador-soporte del invernadero no es significativo y se corrobora la resistencia de la estructura.

IV. Etapa de sensado

La configuración de los circuitos de sensado para cada una de las variables a controlar dentro del invernadero, son circuitos que obtuvimos de diferentes fuentes, entre ellas destacan las hojas de especificaciones de ciertos sensores además de circuitos realizados en diferentes cursos de la carrera (electrónica aplicada, laboratorio de electrónica industrial).

VARIABLES DE ENTRADA

- TEMPERATURA

La temperatura se controla mediante un sensor LM35, el cual manda un voltaje al microcontrolador. Este voltaje es muy pequeño (10mV por grado centígrado) por lo que la señal se manda primero a un op-amp de instrumentación, el INA101, el cual no sólo amplifica la señal con una ganancia de 10 (previa configuración), sino que también cuenta con filtros integrados que evitan el ruido. La señal amplificada se transmite después al microcontrolador.

De esta forma podemos interpretar la señal de salida por medio de un convertidor analógico digital el cual viene integrado dentro del microcontrolador y realizar así, la etapa de corrección. El circuito que a continuación aparece, nos muestra a grandes rasgos lo que es nuestro circuito de sensado de temperatura.

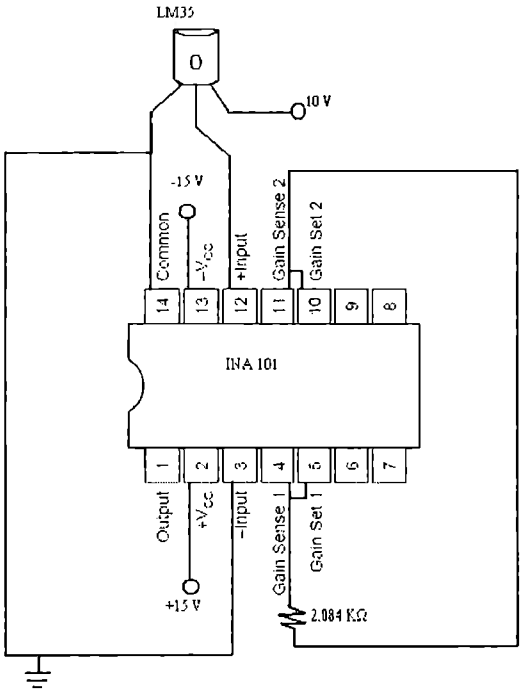


Figura IV.1.. "Circuito de temperatura"

- INTENSIDAD LUMINOSA

Se controla mediante la intensidad luminosa que emite un foco de luz natural. Éste se controla por medio del PWM que manda el microcontrolador. Este PWM se manda a un triac el cual regula al foco. Simulando así un "dimmer".

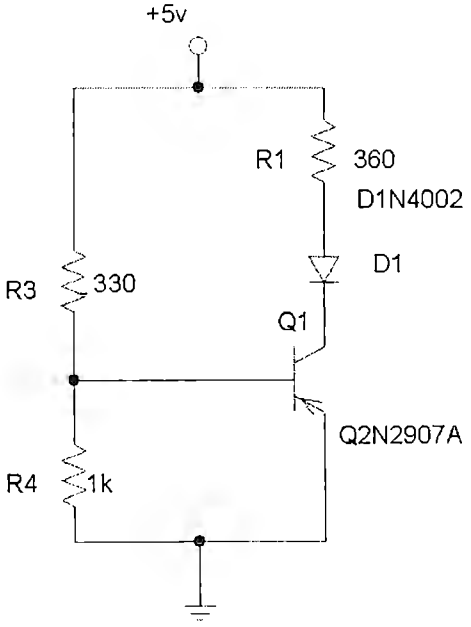
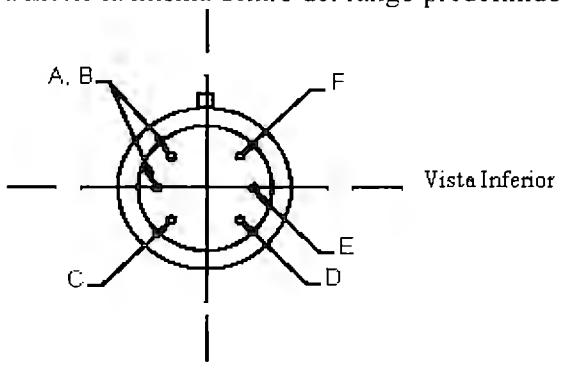


Figura IV.2. "Circuito de luminosidad"

- HUMEDAD

La humedad se mantiene constante y cuando sale de un rango, se activa o desactiva un humidificador para volver a meter la misma dentro del rango predefinido.



INTERNAL PIN CONNECTIONS

0,46mm [0.018 in] dia. lead gold plated (6 places)	
A, B	No connection
C	+VDC supply
D	(-) Power or ground
E	VDC out
F	Case ground

Figura IV.3. "Sensor de humedad"[16]

En el caso de este sensor se conecto directamente al microcontrolador ya que el rango de voltaje que maneja esta dentro de los parámetros aceptables (registrables) para el microcontrolador.

SEÑALES DE SALIDA

El micro asigna una salida (a cada variable) a la entrada recibida en base a las reglas de control, en este caso esta señal es un PWM con una frecuencia de 3.906 Khz. y un voltaje que va de 0-5 V DC.

En el caso de que la temperatura sea baja, se accionará un banco de resistencias, en el caso de que sea alta, se accionarán un extractor/ventilador. Si es la ideal, no se acciona ningún actuador.

En el caso de los actuadores de CD (corriente directa), el PWM se mandará a un optoacoplador, el cual mandará su salida a un transistor de potencia el cual funciona como un switch que permite el paso de la energía al actuador.

En el caso de los actuadores de CA (corriente alterna), el PWM se mandará a un optoacoplador, el cual mandará su salida a un triac el cual funciona como un switch que permite el paso de la energía al actuador.

Tecnológico de Monterrey, Campus Ciudad de México
Biblioteca

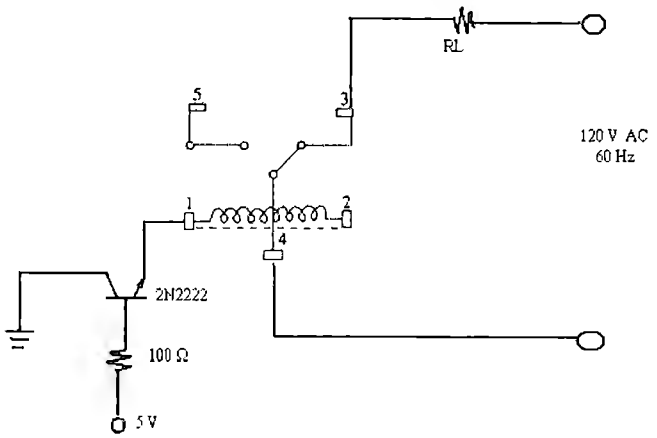


Figura IV.4. "Circuito corriente alterna para bomba de agua y humidificador"

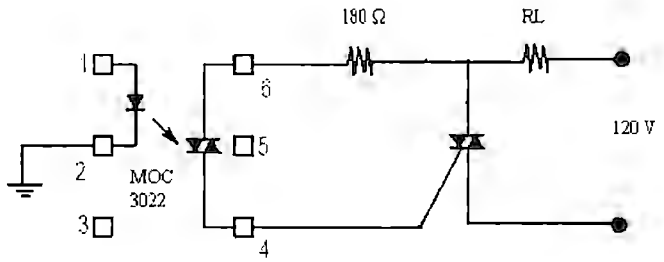


Figura IV.5. "Circuito corriente alterna foco y resistencia"

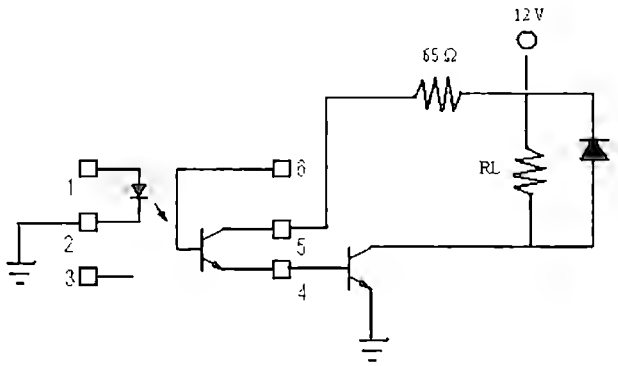


Figura IV.6. "Circuito corriente directa ventilador y extractor"

Los actuadores de CA son: Foco (Intensidad luminosa), resistencia (Temperatura), humidificador (Humedad) y bomba (Alimentación). Los actuadores de CD son: Ventilador y extractor (Temperatura)

V. Microcontrolador

Para la etapa de corrección o control de las variables del invernadero requerimos de la ayuda de un microcontrolador. Las características más importantes de las que requerimos para nuestro microcontrolador son: que cuente con un convertidor analógico digital, que tenga una gran capacidad de almacenamiento y que cuente con salidas PWM. La entrada analógica digital es muy importante ya que como entrada contamos con señales analógicas que corresponden a la salida de nuestros sensores, cada una de estas señales es discretizada respectivamente para ser procesada. Para la conversión de los valores análogos de temperatura, intensidad luminosa y humedad realizamos la medición de las variables y su correspondencia en voltaje. En la siguiente tabla podemos observar esta relación.

Variable	Valor	Equivalente en Volts
Temperatura	50°C	5 V
Intensidad Luminosa	6000 luxes	2.86 V
Humedad	100%	4.06 V

Tabla V.1. *"Correspondencias de las Variables"*

La discretización de cada una de las señales corresponde al rango de cada una de las variables y a la sensibilidad del sensor correspondiente.

La cuantificación es la discretización de la amplitud de la señal.

"quanta": Cantidad más pequeña que se puede diferenciar o distinguir.

$$Cuanta = q = \frac{Rango_máximo_de_la_dinámica}{Número_de_niveles} = \frac{\Delta}{2^n} \text{.....(1)}$$

Donde la n es el número de bits (binary digits).

A continuación podemos observar una tabla que nos muestra las características del conversor análogo digital del microcontrolador:

Símbolo	Parámetros	Condición	Min	Tipo	Max	Unidades
	Resolución			10		Bits
	Precisión Absoluta	VREF = 4 V ADC reloj = 200 Khz.		1	2	LSB
	Precisión Absoluta	VREF = 4 V ADC reloj = 1 MHz		4		LSB
	Precisión Absoluta	VREF = 4 V ADC reloj = 2 MHz		16		LSB
	Integral no-lineal	Vref > 2 V		0.5		LSB
	Diferencial no-lineal	Vref > 2V		0.5		LSB
	Error de cero			1		LSB
	Tiempo de conversión		65		260	µs
	Frecuencia del reloj		50		200	Khz.
AVcc	Voltaje análogo de entrada		Vcc + 0.3(1)		Vcc + 0.3(2)	V
Vref	Voltaje de referencia		2		AVcc	V
Ref.	Resistencia de entrada de referencia		6	10	13	kΩ
Vin	Voltaje de entrada		AGND		AREF	V
Aain	Resistencia de entrada analógica			100		MΩ

NOTA: (1) Mínimo para AVcc es 2.7V
(2) Máximo para AVcc es 6.0V

Tabla V.2. *"Conversor Análogo Digital del micro"*

La capacidad de almacenamiento alta por parte del microcontrolador es también un factor importante a considerar en la selección de este, debido a que requerimos de mucha memoria de programación ya que pretendemos hacer un invernadero multicultivos, es decir un invernadero en el cual podamos cultivar diversas plantas sin necesidad de modificar mucho la estructura y el funcionamiento. Cabe mencionar que esta posible expansión es meramente una opción para futuros proyectos ya que los objetivos de este semestre son el cultivar jitomates y lechugas en conjunto con un grupo de Ingenieras en Sistemas Eléctricos.

Las salidas PWM son igualmente necesarias para nuestro proyecto ya que el circuito utilizado controlador de los actuadores funciona por medio de una modulación de pulsos, los cuales nos determinan la intensidad de encendido de cada uno de los actuadotes. Para el circuito y especificaciones de cada uno de los actuadores consultar el siguiente apartado el cual muestra la etapa de potencia.

Además de los requerimientos anteriores, nuestro proyecto consta de una interfaz con el usuario la cual nos permite cambiar el tipo de cultivo, ajustar la hora del día y cada una de las variables a controlar dentro del invernadero, es decir podemos ver cualitativamente la temperatura, intensidad lumínica y humedad relativa dentro del invernadero. Todo esto con la ayuda de una pantalla de LCD y un teclado matricial con el cual se puede tener interacción con los puntos anteriores. El funcionamiento básico del teclado matricial y la pantalla LCD vienen explicados gráficamente a continuación.

Parte inicial:

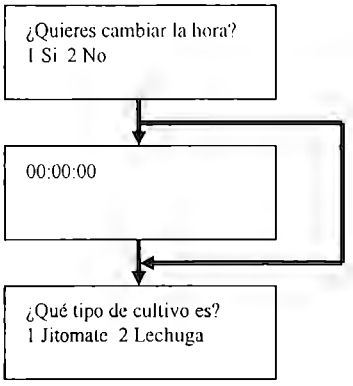


Figura V.1. *"Diagrama parte Inicial"*

Esta parte aparece cada vez que se enciende por primera vez el invernadero, es decir cada vez que se conecta o se cambia de cultivo. El primer cuadro de diálogo nos da dos opciones, la primera es ajustar la hora para que el invernadero cuente con la hora exacta ya sea por ser la primera vez que se enciende el microcontrolador o para ajustar ya sea el cambio de horario o algún desperfecto. La segunda opción es dejar la hora como esta ya sea porque se quiere iniciar a las cero horas o porque ya se había ajustado previamente, es decir la hora con la que cuenta el invernadero es la correcta y quedó almacenada en memoria debido a que el microcontrolador cuenta con un consumo bajo de energía y una pila de emergencia en caso de que se vaya la luz.

El segundo cuadro de diálogo se acciona cuando se eligió la opción número uno del cuadro anterior. Con esta opción se ajusta la hora con la ayuda del teclado matricial. Para ajustar cada uno de los dígitos, se presiona el número correcto seguido del signo gato (#), completado los dígitos correspondientes a horas y minutos, los segundos no tiene caso ajustarlos. Una vez que se oprima el último signo de gato después del último dígito de minutos, el reloj queda ajustado e inicializado.

El tercer cuadro de diálogo nos pregunta el tipo de cultivo a controlar dentro del invernadero. En este caso sólo presenta dos opciones, la primera nos corresponde a las especificaciones y requerimientos de la planta de jitomate y la segunda de la lechuga. Con esto el microcontrolador, con la ayuda de una base de datos, asigna valores a las variables requeridas de nuestra lógica difusa. Con todo esto se inicializa la etapa de control.

Una vez que el invernadero esta funcionando se cuenta con la opción de observar gráficamente cada uno de los valores de las tres variables dentro del invernadero. Esto se realiza con el teclado matricial y la pantalla de LCD. Para observar el valor de la temperatura dentro del invernadero, basta con oprimir la tecla 1, y enseguida aparecerá el valor de ésta variable en la pantalla. La intensidad lumínica corresponde al número 2 y la humedad relativa al número 3.

Tomando en cuenta todos los requerimientos anteriores se seleccionó el microcontrolador AT90S8535 que es un microcontrolador de la familia de los AVR's de ATMEL, que consta de:

- Memoria RISC
- Arquitectura Harvard
- Trabaja con un cristal de 0 a 8 MHz.
- Memoria de programa Flash de 8Kbytes
- Memoria EEPROM de 512 bytes
- Memoria SRAM interna de 512 Bytes.
- ADC de 8 canales y 10 bit.
- Interfaz Serial SPI Maestro –Esclavo.
- Dos Temporizadores / Contadores de 8 bits con Pre-escaler separado y modo de comparación.
- Un Temporizador / Contador de 16 bits con Pre-escaler separado, modos de captura y comparación y un PWM dual de 8, 9 y 10 bits.

La familia de AVR's combinan un enorme set de instrucciones con 32 registros de trabajo de uso general. Los 32 registros están directamente conectados con la unidad lógica aritmética (ALU) permitiendo a dos registros independientes ser utilizados en una sola instrucción ejecutada en un ciclo de reloj.

Es un microcontrolador robusto que nos permite programarlo a través del lenguaje C por medio de un programa llamado CodeVision C Compiler, el cual nos ofrece una interfaz amigable y la posibilidad de utilizar lenguaje C para programar sin tener que programar en lenguaje ensamblador. Esto nos facilita la programación y la utilización de este microcontrolador.

Con la ayuda de dos microcontroladores AT90S8535 el control de nuestro invernadero queda satisfecho. Utilizamos dos microcontroladores ya que el la capacidad de almacenamiento y control de puertos por parte de un solo microcontrolador fue evaluada como pobre y como medida de seguridad y de robustez decidimos utilizar dos microcontroladores, uno como maestro y el otro como esclavo.

Es decir uno de los microcontroladores va a ser utilizado como la base central (el que da las órdenes) y el otro va a ser controlador por éste. La siguiente tabla nos muestra la distribución de las tareas para cada uno de los microcontroladores.

Maestro	Esclavo
• Lógica Difusa • Reloj • Entrada (A/D) • Salidas PWM (3) • Pantalla LCD	• Teclado • Salidas PWM (3)

Tabla V.2. *"Microcontroladores"*

Para llevar a cabo el control y satisfacer las necesidades del sistema, necesitamos de 6 salidas de PWM que obtenemos con la conjunción de los dos microcontroladores, ya que cada uno cuenta con 3 salidas PWM. Para interconectar y coordinar el funcionamiento de maestro esclavo, ambos microcontroladores se comunicarán mediante SPI.

El funcionamiento de los dos microcontroladores como esclavo y maestro se lleva a cabo por medio de una interfaz que conecta a ambos microcontroladores de los cuales uno cuenta con el reloj de mando, es decir el maestro y el esclavo están regidos por los ciclos del reloj del microcontrolador maestro, el cual a su vez controla y da órdenes a ejecutar por el microcontrolador esclavo. Cuando el microcontrolador esclavo envía información al maestro, la acción se lleva a cabo por medio de una interrupción externa y viceversa (del maestro al esclavo).

El funcionamiento del reloj se lleva por medio de los timers y un registro de contadores. Cada interrupción del timer se realiza cada 2.5 ms, en el modo de 16 bits contando únicamente hasta el 10011100010000 (diez mil en binario), lo que incrementa un contador el cual cuenta 400 eventos que equivalen a un segundo. Cada vez que transcurra un segundo, se resetea el valor del contador y comienza a contar desde cero. Al igual que se resetea el contador de mili segundos, se incrementa un contador de segundos y sucesivamente el de minutos y horas, de tal manera de completar 24 horas. Todo esto utilizando un cristal de 4 MHz

El funcionamiento del sistema de control a groso modo sigue el siguiente esquema:

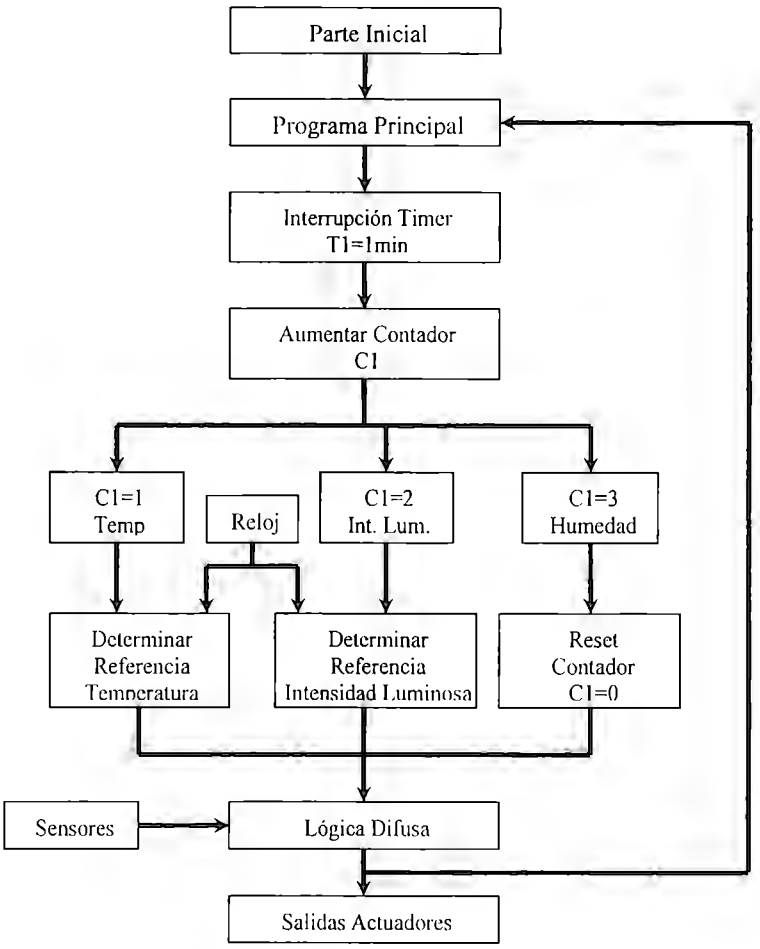


Figura V.2. "Diagrama de Control"

Como podemos ver en la figura V.2 el control y funcionamiento del microcontrolador se lleva a cabo cada interrupción del timer, es decir cuando el timer manda una bandera de overflow el microcontrolador realiza la primera parte del control. Dependiendo del valor del contador C1 se determina que variable sensar y la referencia para dicha variable.

Después se determina la corrección por medio de la Lógica Difusa y el programa regresa a su etapa de espera. El diagrama nos muestra los bloques por los que el micro determina y realiza el control de las variables del invernadero. El microcontrolador maestro es el que realiza los cálculos y manda el valor de salida al microcontrolador esclavo, el cual en base a ese valor determina la salida PWM. Para poder manipular los actuadores los pwm's operan a una frecuencia de 3.906KHz y tienen un voltaje que va de 0 a 5 V.

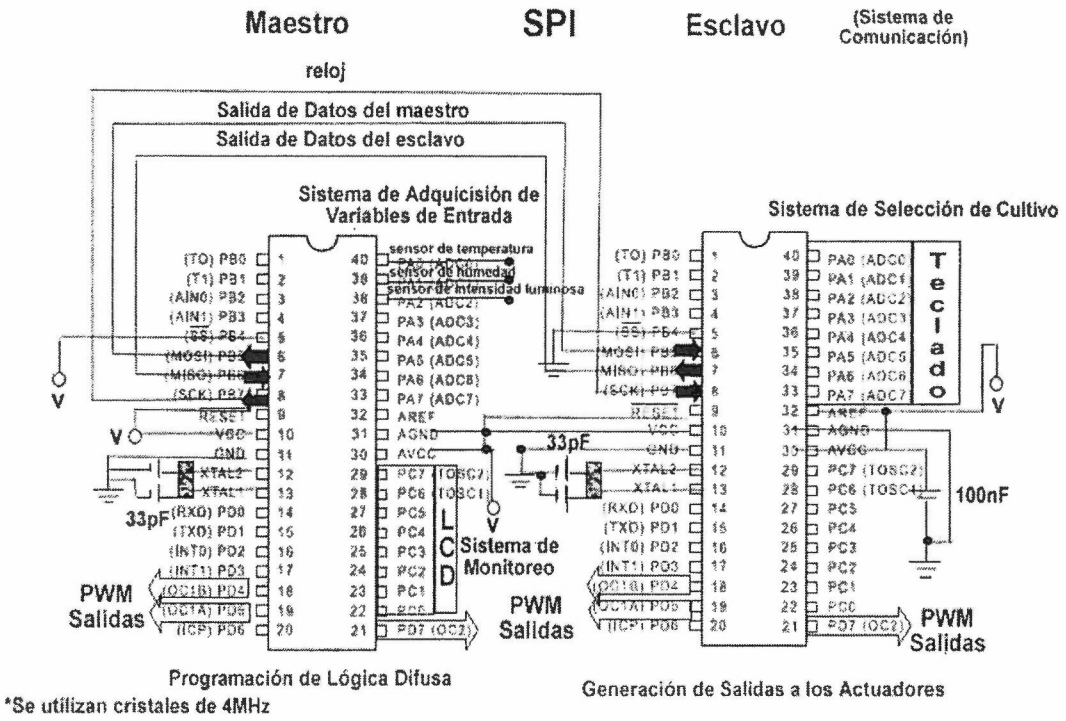


Figura V.3. "Diagrama de conexiones"

Debido a algunos problemas presentados a partir de la programación y pruebas con el microcontrolador AT90S8535, decidimos utilizar dos microcontroladores por separado. Esto se decidió debido al tamaño del programa de lógica difusa. Con esto dejamos la opción a futuro de la utilización de un microcontrolador más poderoso, con mayor capacidad de almacenamiento. El microcontrolador AT90S8535 no cumplió con la capacidad requerida de almacenamiento, por lo que optamos por utilizar un microcontrolador más poderoso ATmega32, el problema se presentó a la hora de realizar las pruebas, en las que nunca obtuvimos los resultados deseados. Así que al final decidimos utilizar el microcontrolador AT90S8535, con las variables por separado. Otro de los problemas presentados fue que el programa del jitomate para las variables de temperatura e intensidad lumínica se excedía la capacidad de almacenamiento del microcontrolador AT90S8535, por lo que únicamente se simularon los resultados, y se propone como un posible proyecto futuro el implementar el programa realizado en algún microcontrolador con mayor capacidad de almacenamiento.

V.1. Programa

La programación para el microcontrolador se realizó con la ayuda del software CodeVisionAVR, ya que tiene la ventaja de que transforma un código en C a código ensamblador, ésta opción facilitó mucho la programación. El código de programación tiene la siguiente estructura:

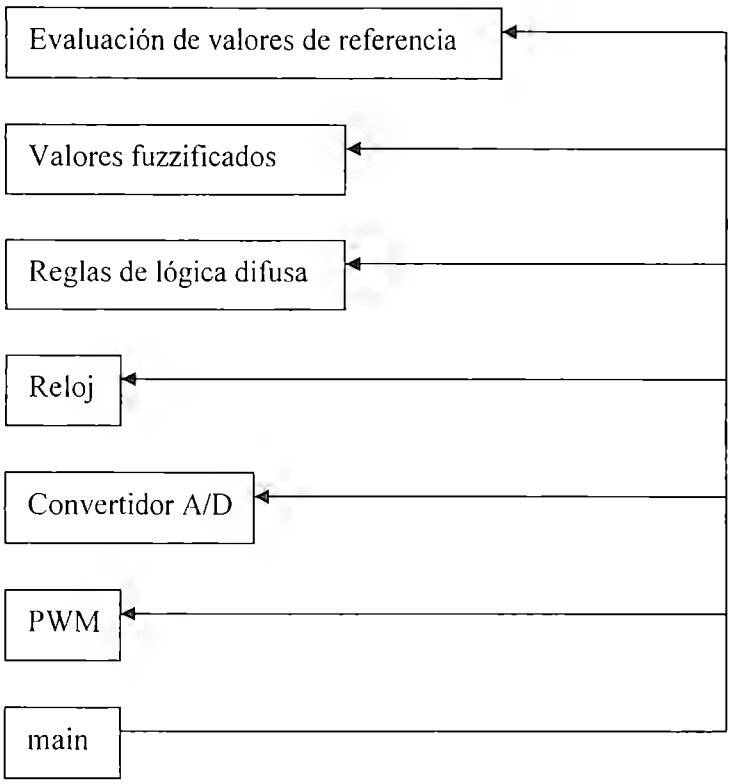


Figura V.4. "Programa"

Como podemos ver el main manda a llamar a cada una de las subrutinas conforme sean necesarias, cada una de estas subrutinas modifica variables globales que pueden ser utilizadas por cualquier otra subrutina.

La primera subrutina "Evaluación de valores de referencia", modifica dos variables globales (salida y salida1) correspondientes a los valores de referencia de temperatura e intensidad lumínica correspondientemente. Ésta subrutina obtiene los valores correspondientes a la hora del día que son previamente modificados por la subrutina "Reloj".

La subrutina "Valores fuzzificados" recibe los valores de salida y salida1 para obtener los arreglos de temperatura, humedad y luz. Es decir cada una de las subrutinas de cada variable modifica dos variables globales con excepción de la humedad que sólo modifica la variable global h. Éstas variables son arreglos que contienen la información de la función de membresía activada y sus grados de pertenencia. Como ejemplo podemos ver que para la temperatura tenemos como dos arreglos t[] y t2[]. "t[]" corresponde al arreglo que guarda la información de los valores de referencia, y t2[] corresponde al arreglo que guarda la información de los valores obtenidos a partir del convertidor análogo digital para la temperatura real.

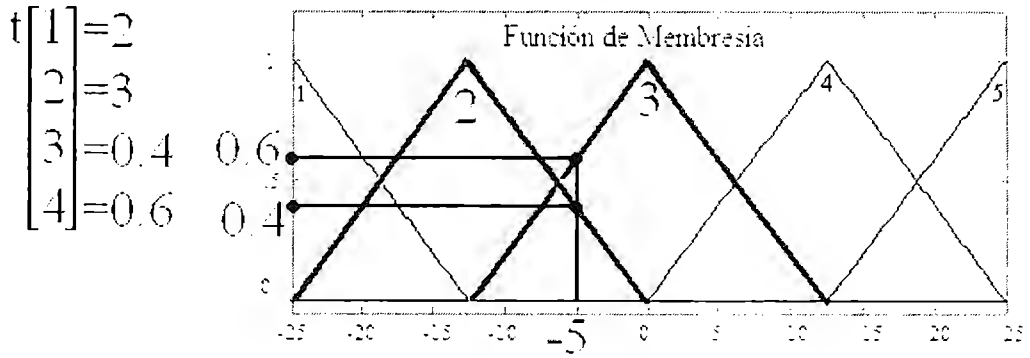


Figura V.3. "Arreglos"

En la figura anterior podemos ver la información contenida dentro de cada uno de los arreglos.

La subrutina "Reglas de lógica difusa" evalúa las reglas y determina la salida para cada uno de los actuadores, es decir lo que va a recibir la subrutina de PWM.

Como podemos observar el funcionamiento básico es muy simple y lleva un orden de precedencia que va determinando las correcciones y valores para cada uno de los actuadores del invernadero.

VI. Pruebas y Resultados

Una vez que contamos con los circuitos de los sensores y actuadores así como del programa del microcontrolador pudimos realizar las respectivas pruebas y comprobar el funcionamiento de cada una de las partes por separado. El conjunto se traduce en un invernadero para el cultivo de jitomates y lechugas (proyecto paralelo de un grupo de **ISE's**)

El proyecto consta de un invernadero, sensores, actuadores y un controlador difuso que rige todos estos componentes. Analizando esto se vio que se podía hacer más ambicioso el proyecto, pues agregando una programación paralela se puede aprovechar la infraestructura para otros tipos de cultivos. Con el fin de demostrar esta teoría otro equipo se encargo de hacer esta ampliación al proyecto original, aplicándolo para el cultivo de lechugas.

Al ser una programación paralela no influye directamente al proyecto original. Por lo que se manejó como dos proyectos independientes a pesar de ser complementarios.

VI.1. Sensores

Las pruebas para los sensores nos demuestran el funcionamiento de cada uno de éstos dispositivos, es decir nos traducen una variable física (temperatura, humedad o intensidad lumínica) a una variable eléctrica (voltaje). La equivalencia correspondiente la podemos observar en la tabla VI.2 de la sección anterior.
Las mediciones obtenidas a partir de los circuitos de temperatura y su correspondiente en voltaje los podemos observar en la siguiente tabla:

Temperatrua °C	Voltaje (V)
24.6	2.3
28	2.77
29.5	2.8
31	2.887
32.1	2.937
41.1	3.88
53.3	4.78
60.5	5.39
65.4	6.03
67.8	6.43

Tabla VII.1. *"Temperatura y voltaje"*

Los valores anteriores de temperatura fueron obtenidos con la ayuda de un termopar.

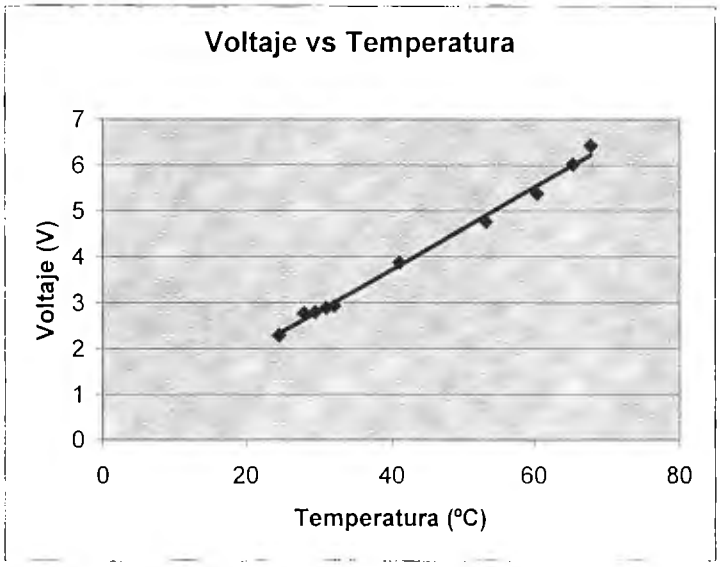


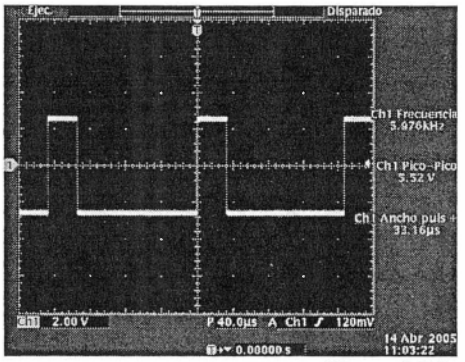
Figura VI.1. *"Temperatura vs voltaje"*

Como podemos observar en la Figura VII.1. el comportamiento de la temperatura con respecto al voltaje de salida es casi lineal y sigue el comportamiento de la ecuación V=0.0902(T) + 0.1121, donde T es la temperatura en grados centígrados y V es el correspondiente voltaje en Volts.

VI.2. Actuadores

Las pruebas para los actuadores fueron simuladas con la ayuda de un generador de funciones en el cual modificamos el ancho del pulso para simular la salida PWM del microcontrolador. Con esto pudimos comprobar el funcionamiento correcto de cada uno de estos dispositivos.

En las primeras imágenes podemos ver la salida del microcontrolador simulada en un PWM por medio de un generador de funciones. Las primeras tres imágenes corresponden al ancho de pulso bajo, medio y alto (33.3 micro segundos, 39.8 microsegundos y 60 microsegundos respectivamente).



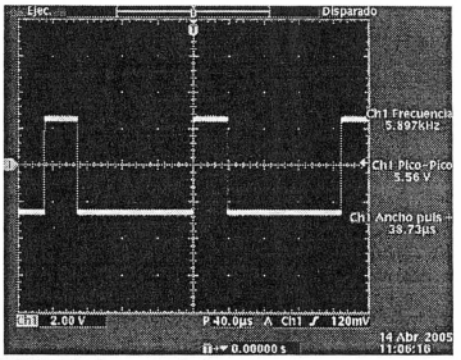


Figura VI.2. , VI.3. "PWM baja y media"

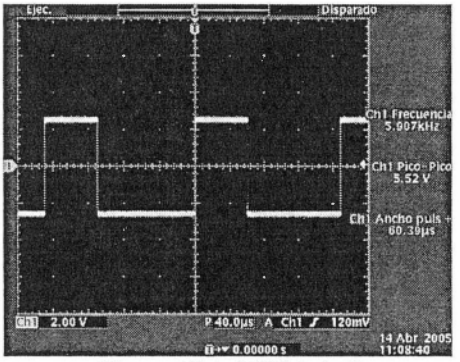
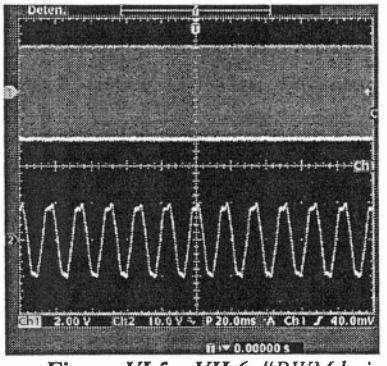


Figura VI.4. "PWM alta"

En las siguientes figuras podemos observar el comportamiento y ciclo de trabajo de los respectivos actuadores, las primeras tres figuras corresponden al funcionamiento de las resistencias y el foco. Cabe mencionar que la señal de entrada es una señal cuadrada con una frecuencia de 3.906 KHz a 1.18 Volts donde se varió el ancho de pulso para las condiciones alta, media y baja. En las figuras VII.8, VII.9. y VII.10. podemos ver la respuesta del ventilador y extractor para las mismas condiciones de entrada.



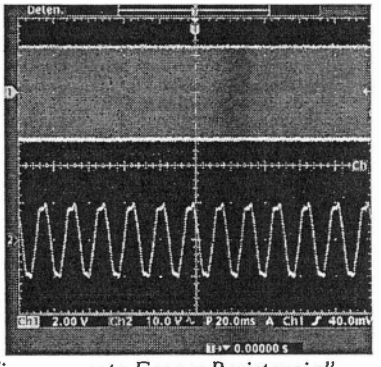


Figura VI.5. , VII.6. "PWM baja y media, respuesta Foco y Resistencia"

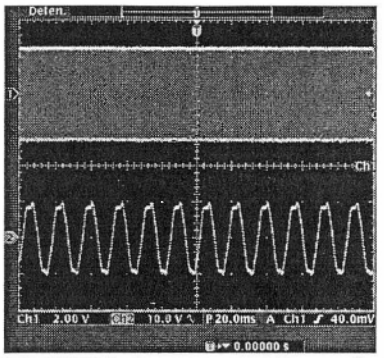
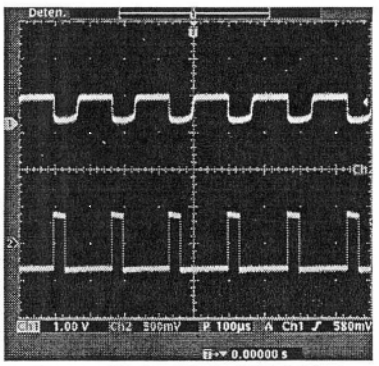


Figura VI.7. *"PWM alta, respuesta Foco y Resistencia"*



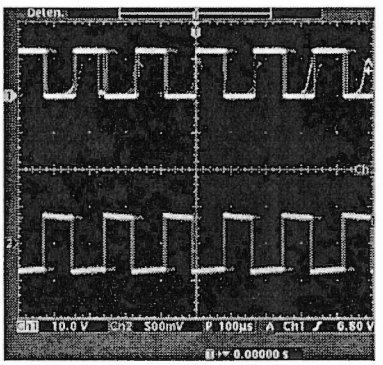


Figura VI.8. , VI.9. *"PWM baja y media, respuesta Ventilador y Extractor"*

VI.3. Microcontrolador

El caso del microcontrolador no fue una prueba física ya que para esto necesitaríamos juntar todos nuestros circuitos y al hacer esto no podríamos hacer correcciones directamente al programa, por lo que las pruebas se convirtieron en una simulación (debug) del programa que se iba a cargar en el microcontrolador. El programa fue debuggeado con la ayuda del software AVR Studio 4.

Name	Value	Type	Location
– adc_da	[...]	unsigned int[3]	0x0160 [SRAM]
[0]	500	unsigned int	0x0160 [SRAM]
[1]	600	unsigned int	0x0162 [SRAM]
[2]	400	unsigned int	0x0164 [SRAM]
– valor_	[...]	unsigned int[3]	0x0166 [SRAM]
[0]	24	unsigned int	0x0166 [SRAM]
[1]	6822	unsigned int	0x0168 [SRAM]
[2]	47	unsigned int	0x016A [SRAM]
vout	0.79069769	float	0x0158 [SRAM]
hout	1	float	0x015C [SRAM]
input_	0 ''	unsigned char	R7
xhum	47 '/'	unsigned char	R6
– h	[...]	float[4]	0x0148 [SRAM]
[0]	1	float	0x0148 [SRAM]
[1]	1	float	0x014C [SRAM]
[2]	1	float	0x0150 [SRAM]
[3]	1	float	0x0154 [SRAM]
fout	0	float	0x0144 [SRAM]
– t	[...]	float[4]	0x00FC [SRAM]
[0]	1	float	0x00FC [SRAM]
[1]	2	float	0x0100 [SRAM]
[2]	0.55555558	float	0x0104 [SRAM]
[3]	0.44444445	float	0x0108 [SRAM]
– t2	[...]	float[4]	0x010C [SRAM]
[0]	4	float	0x010C [SRAM]
[1]	5	float	0x0110 [SRAM]
[2]	0.4	float	0x0114 [SRAM]
[3]	0.6	float	0x0118 [SRAM]
– l	[...]	float[4]	0x011C [SRAM]
[0]	2	float	0x011C [SRAM]
[1]	3	float	0x0120 [SRAM]
[2]	0.8	float	0x0124 [SRAM]
[3]	0.2	float	0x0128 [SRAM]
– l2	[...]	float[4]	0x012C [SRAM]
[0]	7	float	0x012C [SRAM]
[1]	7	float	0x0130 [SRAM]
[2]	1	float	0x0134 [SRAM]
[3]	1	float	0x0138 [SRAM]
rout	0	float	0x013C [SRAM]
pout	0	float	0x0140 [SRAM]
xtemp	24 '/'	unsigned char	R4
xluz	6822 '/'	unsigned char	R5

Figura VI.10. "Simulación Microcontrolador"

Como podemos ver en la figura anterior, que corresponde a la simulación realizada para el microcontrolador ATmega32, podemos comprobar el buen funcionamiento de la lógica difusa.

```
Name        | Value
- adc_da [...]
    [0:500
    [1:600
    [2:400
```

En las primeras figuras aparecen los datos adquiridos por el convertidor análogo digital, éstos datos son convertidos a los valores reales para cada una de las variables en el arreglo "valor_", el primer valor equivale a la temperatura en grados centígrados que recibe el microcontrolador a partir del convertidor, el segundo valor equivale a la intensidad lumínica en luxes y el tercer valor equivale a la humedad relativa en porcentaje.

```
- valor_ [...]
    [0:24
    [1:6822
    [2:47
```

En los arreglos h[], t[], t2[], l[] y l2[] podemos ver los valores y las funciones de membresía activadas a partir de los valores de referencia y los valores obtenidos de los sensores. Los primeros dos números que aparecen dentro de cada uno de estos arreglos equivalen a las funciones de membresía activadas, es decir equivalen al encabezado de cada una de las funciones de membresía (Ej. 1=baja, 2=media, 3=alta...). Los últimos dos números equivalen a los grados de pertenencia correspondientes a las funciones de membresía.

```
- h      [...]        - l      [...]
    [0:1                  [0:2
    [1:1                  [1:3
    [2:1                  [2:0.8
    [3:1                  [3:0.2
  fout  0            - l2     [...]
- t      [...]             [0:7
    [0:1                  [1:7
    [1:2                  [2:1
    [2:0.55555558         [3:1
    [3:0.44444445
- t2     [...]
    [0:4
    [1:5
    [2:0.4
    [3:0.6
```

Éstos valores son evaluados por el bloque de reglas para cada una de las variable y de aquí se obtienen el valor de salida correspondiente a cada uno de los actuadores; vout (ventilador), fout (focos), rout (resistencias), pout (persianas) y hout (humidificador). Analizando los resultados obtenidos con los resultados propuestos en el semestre pasado podemos ver el éxito del programa.

```
vout  0.79069769
hout  1
fout  0
rout  0
pout  0
```

Podemos ver que con una temperatura de 24°C contra una de 14°C de referencia tenemos como salida de ventiladores prendida a 79% de su capacidad y una salida de resistencias de 0. Con esto podemos ver que, con los ventiladores encendidos pretendemos bajar la temperatura para llegar a 14°C.

```
- valor_[...]
    [0.24

  vout  0.79069769
  rout  0
```

Si tenemos un valor de luz de 6822 luxes contra un valor de referencia de 3900 luxes tenemos una salida de persianas de 0 y focos de 0. Es decir tenemos mucha luz y queremos cerrar las persianas y mantener apagados los focos.

```
- valor_[...]
    [1.6822

  pout  0
  fout  0
```

Si tenemos un valor de humedad de 47% de humedad relativa, accionamos el humidificador a su 100% de capacidad, con esto garantizamos que la humedad se mantenga en 55%, a pesar de que el ventilador este accionado por causas diferentes.

```
- valor_[...]
    [2.47

  hout  1
```

VII. Estudio de mercado

En México existen seis millones de hectáreas de riego y 15-16 millones de hectáreas de temporal. Por ello, la frontera productiva está muy limitada y los sistemas tradicionales de producción no alcanzan a cosechar lo que nuestro país necesita, en lo que a productos agrícolas se refiere.

Ante ello están surgiendo sistemas alternativos que pueden ayudar a cubrir el déficit en la producción de alimentos del país, como lo es la hidroponía. Ésta es una forma de producción que no necesita de suelos y por lo mismo no depende de fenómenos meteorológicos. Debido a esto, permite reducción de costos de manera considerable y cosechas fuera de estación, además de que brinda elevados rendimientos y alta calidad en los productos obtenidos a través de ella.

La hidroponía está representando una alternativa para comunidades que viven en extrema pobreza en diversos países latinoamericanos. Es una opción en donde se tienen dificultades para adquirir la canasta mínima básica y por ende no se cubren los requerimientos de la Organización Mundial de la Salud, que indica el consumo de hortalizas de 50 kilogramos por persona al año.

Actualmente, la FAO (Food and Agriculture Organization) es uno de los organismos internacionales que está implementando programas de hidroponía, a fin de mejorar la calidad de vida de la gente en condiciones de pobreza. Impulsa diversos cultivos en espacios de 40 metros cuadrados, dimensiones consideradas como una unidad económica mínima familiar en donde puede establecerse el sistema.

El establecimiento de estas unidades de producción se realiza con apoyo técnico de dicha organización y con materiales propios de la región, por lo que las inversiones son mínimas para las personas de escasos recursos [3].

La hidroponía tiene un carácter multidimensional, al aplicarse con técnicas sencillas y complejas, que pueden ser desarrolladas en los patios o azoteas de las casas o en zonas de producción comercial.

Un factor importante de la hidroponía es que, implementada de manera simple o compleja, da como resultado altos rendimientos, aún en las zonas donde escasea el agua o donde existe falta total de ésta, y, asimismo, donde los suelos han sido contaminados.

Un estudio económico reciente de una nueva compañía de granjas en Texas diseñó un plan para construir 43 invernaderos para producir tomates. El estudio incluyó un análisis económico excelente de las operaciones alternativas de la granja y concluyó que una empresa con invernaderos proporcionaría el giro más alto para su inversión. Las conclusiones fueron basadas, sobre todo, en los datos económicos obtenidos de una compañía de fabricación del invernadero con hidroponia. El plan se armó para tres plantaciones con una densidad de $13m^2$ por planta y una producción estimada de 13,5 kilogramos por planta cada año, debajo del caso peor y una producción de 21-23 kilogramos por espacio de la planta por año, debajo del mejor caso. Demostraron un análisis económico donde cada casa rendiría $10.660 dlls. en ganancias (sin quitar

impuestos) y un giro del 89% en su inversión. Un examen de la industria indica producciones de alrededor 9-14,5 kilogramos por espacio de la planta por año, pero toma 37 m^2 de espacio del invernadero para alcanzar estas producciones. En promedio, la producción de EE.UU. se calcula en 7-14 kilogramos por espacio de la planta por año con una densidad de planta de $9.37m^2$. Obviamente, existe una evidente ventaja económica al incorporar la industria del tomate de invernadero. Las producciones se relacionan directamente con la disponibilidad de la luz del sol y el que tan cerca estén una planta de otra [4].

Este proyecto trata de combinar dos campos que se están desarrollando de manera paralela en uno solo. Actualmente se están dando préstamos para planes como éste, que son de investigación, pero a la vez sirven para la industria. Este proyecto puede aplicarse en cualquiera de los 2 sectores, el familiar o de autoconsumo, si se emplea a un actuador distribuidor de los nutrientes para el sector familiar, o bien, si se usan como actuadores los controladores ambientales que mantendrán al jitomate en sus condiciones óptimas, para el sector industrial.

También hay que tomar en cuenta que se tiene un mayor control sobre posibles plagas, enfermedades y sobre la evolución de la planta. Además, se puede manejar en forma familiar o bien, hacer invernaderos para producciones en masa. Finalmente, hay que ver que ya se cuenta con las herramientas para hacer de esta técnica de cultivo una técnica popular.

VIII. Conclusiones

Este trabajo presenta la unión de diferentes disciplinas, como lo es la lógica difusa y la hidroponía. Así pues, en base a los resultados obtenidos se observaron varias ventajas respecto a la utilización de la lógica difusa para automatizar una hidroponía de jitomates. Dentro de los mayores beneficios encontramos el hecho de crear un invernadero semi-automatizado, (pues el abastecimiento de alimento, el encendido-apagado del sistema, así como la recolección, son aún realizadas por las manos del hombre) genera un beneficio a quienes lo implementan, pues se cuenta con un experto agricultor al cuidado de las plantas durante 24 horas al día sin el alto costo que ello implicaría.

Una de las herramientas utilizadas dentro del proyecto fue la lógica difusa, con la cual nos percatamos de sus cualidades y de sus carencias. Es una herramienta poderosa y muy versátil en el control y la aproximación de sistemas complejos. Nos permite controlar sistemas de los cuales no se tiene el modelo matemático. Nos proporciona valores de salida bastante acertados para llevar a cabo un buen control. Una de las dificultades en cuanto la aplicación de la lógica difusa, es el encontrar al experto capaz de expresar y transmitir su conocimiento para la generación del controlador difuso.

Con el controlador difuso se está registrando el conocimiento de un experto, lo que nos lleva a prescindir de la presencia física del mismo, incrementando la rentabilidad del sistema, pues sólo basta con asesorías de experto(s) para el registro del conocimiento durante la fase de generación del controlador y una vez terminada la base de conocimiento del sistema, ya no son necesarias futuras asesorías, pudiendo hacer copias de dicho conocimiento, generando así "expertos" a voluntad.

Este invernadero es reproducible y utilizable en prácticamente cualquier lugar con cualquier tipo de condiciones climáticas.
Trabaja las 24 hrs. del día con gran exactitud a diferencia del ser humano, además de que no requiere personal especializado mas que para la programación del controlador, lo que lo hace "independiente" (al invernadero) una vez instalado.

Debido a que el control es diseñado por profesionales en la materia, la productividad es mayor gracias al conocimiento. Se tiene cosecha todo el año, debido a que los frutos reciben los nutrientes justos de acuerdo a sus necesidades. Otra ventaja que se presenta al controlar el ambiente es que se reduce el riesgo de plagas. Este prototipo valida de manera contundente la aplicación a gran escala.

Los programas para el controlador difuso han sido probados y validados en base a la simulación usando el AVRstudio, que es un software especializado para hacer la simulación (debugeo) de los programas que se van a cargar en el micro, de esta forma se garantiza su funcionamiento. Se comprobaron con el funcionamiento y resultados de los programas realizados el semestre anterior, obteniendo resultados satisfactorios. Sin embargo la capacidad del microcontrolador no es suficiente para guardar todas las funciones de membresía, por lo que el proyecto queda abierto para la aplicación en dispositivos con mayor capacidad.

La hidroponia como método de cultivo es una técnica muy poderosa para cultivar casi cualquier tipo de hortaliza. Consideramos que se trata de un campo de investigación muy extenso del cual se ha explotado muy poco hoy en día. Al inicio de este trabajo nos encontramos en una disyuntiva entre controlar la alimentación o los factores climáticos dentro del invernadero, así como esta disyuntiva, se encontraron varias opciones en el control del mismo, lo cual nos indica la magnitud de crecimiento y posibles caminos para futuras investigaciones dentro de esta rama.

IX. Recomendaciones

En la parte del microcontrolador se dejo un espacio abierto a la implementación del programa de control y las variables del jitomate. Esto se debe a la capacidad del microcontrolador empleado para este prototipo, la cual resultó insuficiente para esta aplicación. Por lo tanto recomendamos la utilización e implementación de dispositivos con mayor capacidad de almacenamiento.

Se eligió el microcontrolador AT90S8535, pues las pruebas y el funcionamiento eran más fáciles de realizar. En el momento de implementar el programa en éste microcontrolador, descubrimos que no cuenta con la capacidad requerida para la programación de las funciones de membresía, pues su capacidad se limita a la de almacenar una sola variable, la cual no es cargada completamente.

El microcontrolador ATmega32 no fue utilizado ya que tuvimos muchos problemas para programarlo. De esta forma decidimos utilizar dos microcontroladores AT90S8535 por separado cargándoles únicamente los programas de control de lógica difusa de intensidad lumínica y temperatura de la lechuga y humedad relativa del jitomate, esto es debido al tamaño de los programas realizados, por lo que se recomienda usar el ATmega32.

En lo que se refiere a los actuadores, la elección de la resistencia fue muy acertada, lo mismo en el caso del foco y del humidificador. En el programa actual se maneja un PWM de 128 hasta 256 bits, sin embargo se recomienda que se amplíe el rango a utilizar desde 0 hasta 256 bits, esto con el fin de aprovechar la potencia de los actuadores desde su mínima expresión (apagado) hasta su máxima (potencia total), para que se ocupe en su totalidad.

X. Anexos

	Sensor	Referencia		Ventilador	Resistencias
Si	Muy-baja	Noche	Entonces	Vel-baja	T-media
Si	Muy-baja	Alba	Entonces	Vel-baja	T-alta
Si	Muy-baja	Mañana	Entonces	Vel-baja	T-alta
Si	Muy-baja	Tarde	Entonces	Vel-baja	T-alta
Si	Muy-baja	Medio-día	Entonces	Vel-baja	T-alta
Si	Baja	Noche	Entonces	Vel-baja	T-baja
Si	Baja	Alba	Entonces	Vel-baja	T-media
Si	Baja	Mañana	Entonces	Vel-baja	T-alta
Si	Baja	Tarde	Entonces	Vel-baja	T-alta
Si	Baja	Medio-día	Entonces	Vel-baja	T-alta
Si	Media-baja	Noche	Entonces	Vel-media	T-baja
Si	Media-baja	Alba	Entonces	Vel-baja	T-baja
Si	Media-baja	Mañana	Entonces	Vel-baja	T-media
Si	Media-baja	Tarde	Entonces	Vel-baja	T-alta
Si	Media-baja	Medio-día	Entonces	Vel-baja	T-alta
Si	Media	Noche	Entonces	Vel-alta	T-baja
Si	Media	Alba	Entonces	Vel-media	T-baja
Si	Media	Mañana	Entonces	Vel-baja	T-baja
Si	Media	Tarde	Entonces	Vel-baja	T-media
Si	Media	Medio-día	Entonces	Vel-baja	T-alta
Si	Media-alta	Noche	Entonces	Vel-alta	T-baja
Si	Media-alta	Alba	Entonces	Vel-alta	T-baja
Si	Media-alta	Mañana	Entonces	Vle-media	T-baja
Si	Media-alta	Tarde	Entonces	Vel-baja	T-baja
Si	Media-alta	Medio-día	Entonces	Vel-baja	T-media
Si	Alta	Noche	Entonces	Vel-alta	T-baja
Si	Alta	Alba	Entonces	Vel-alta	T-baja
Si	Alta	Mañana	Entonces	Vel-alta	T-baja
Si	Alta	Tarde	Entonces	Vel-media	T-baja
Si	Alta	Medio-día	Entonces	Vel-baja	T-baja
Si	Muy alta	Noche	Entonces	Vel-alta	T-baja
Si	Muy alta	Alba	Entonces	Vel-alta	T-baja
Si	Muy alta	Mañana	Entonces	Vel-alta	T-baja
Si	Muy alta	Tarde	Entonces	Vel-alta	T-baja
Si	Muy alta	Medio-día	Entonces	Vel-media	T-baja

Tabla II.4. "Reglas para la temperatura durante el día."

	Sensor	Referencia		Persianas	Foco
Si	Poca luz	Alba	Entonces	Abiertas	Medio
Si	Baja	Alba	Entonces	Abiertas	Apagado
Si	Medio baja	Alba	Entonces	Entre abiertas	Apagado
Si	Normal	Alba	Entonces	Cerradas	Apagado
Si	Medio alta	Alba	Entonces	Cerradas	Apagado
Si	Alta	Alba	Entonces	Cerradas	Apagado
Si	Mucha luz	Alba	Entonces	Cerradas	Apagado
Si	Poca luz	Mañana	Entonces	Abiertas	Prendido
Si	Baja	Mañana	Entonces	Abiertas	Medio
Si	Medio baja	Mañana	Entonces	Abiertas	Apagado
Si	Normal	Mañana	Entonces	Entre abiertas	Apagado
Si	Medio alta	Mañana	Entonces	Cerradas	Apagado

Si	Alta	Mañana	Entonces	Cerradas	Apagado
Si	Mucha luz	Mañana	Entonces	Cerradas	Apagado
Si	Poca luz	Media tarde	Entonces	Abiertas	Prendido
Si	Baja	Media tarde	Entonces	Abiertas	Prendido
Si	Medio baja	Media tarde	Entonces	Abiertas	Medio
Si	Normal	Media tarde	Entonces	Abiertas	Apagado
Si	Medio alta	Media tarde	Entonces	Entre-abiertas	Apagado
Si	Alta	Media tarde	Entonces	Cerradas	Apagado
Si	Mucha luz	Media tarde	Entonces	Cerradas	Apagado
Si	Poca luz	Tarde	Entonces	Abiertas	Prendido
Si	Baja	Tarde	Entonces	Abiertas	Prendido
Si	Medio baja	Tarde	Entonces	Abiertas	Prendido
Si	Normal	Tarde	Entonces	Abiertas	Medio
Si	Medio alta	Tarde	Entonces	Abiertas	Apagado
Si	Alta	Tarde	Entonces	Entre-abiertas	Apgado
Si	Mucha luz	Tarde	Entonces	Cerradas	Apagado
Si	Poca luz	Medio día	Entonces	Abiertas	Prendido
Si	Baja	Medio día	Entonces	Abiertas	Prendido
Si	Medio baja	Medio día	Entonces	Abiertas	Prendido
Si	Normal	Medio día	Entonces	Abiertas	Prendido
Si	Medio alta	Medio día	Entonces	Abiertas	Medio
Si	Alta	Medio día	Entonces	Abiertas	Apagado
Si	Mucha luz	Medio día	Entonces	Entre-abiertas	Apagado

Tabla II.5. *"Reglas para la luminosidad durante el día."*

XI. Referencias

[1] GIL Isaías; Sánchez Felipe; Miranda Ignacio. "Producción de Jitomates en Hidroponia Bajo Invernadero" Serie de Publicaciones Agribot, México 2003

[2] http://www.correodelmaestro.com/anteriores/2002/mayo/2nosotros72.htm

[3] Datasheet LM 231, National Semiconductor

[4] Laboratorio de Instrumentación y Mediciones

[5] El Financiero lunes 17 de Mayo de 1999. **"México puede solucionar el déficit de producción de alimentos mediante sistema de hidroponía"**

[6] PENA, José G. aggie-horticulture.tamu.edu/ greenhouse/**hydroponics**/economics.html. **"Consideraciones económicas, comercialización, y financiamiento de la producción vegetal del invernadero".**

[7] SAMPERIO Ruiz, Gloria. Un paso más en la hidroponia

[8] http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%B3gica_di fusa

[9] http://members.fortunecity.es/jalvarezg/

[10] http://www.hidoponia.itgo.com/Hidrop1.htm

[11] http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/restmp.html

[12] http://www.projar.es/pagi/h/nueve/9horti2.html

[13] http://contratos.uclm.es/1621_2004/prescri.htm

[14] http://www.hidroponia.org.mx/

[15] http://www.glosam.com/

[16] Datasheet HIH 3602

[17] Apuntes de clase Transferencia de Energía.

[18] Apuntes de clase Mecánica de materiales.

[19] Climatic Control of a Storage Chamber Using Fuzzy Logic, 11 20 - 11, 1995 Dunedin, New Zealand p. 141 Climatic Control of a Storage Chamber Using Fuzzy Logic Patrick P.K. Lim, Natalie R. Spooner, The IEEE Computer Society http://csdl.computer.org/comp/proceedings/annes/1995/7174/00/ 71740141abs.htm - 12.6KB - fuzzy: 29, logic: 26, control: 23, fuzzy logic...: 18

[20] Fuzzy Tuning Method for Simulation of Dynamic Processes 11 20 - 11, 1995 Dunedin, New Zealand p. 149 Fuzzy Tuning Method for Simulation of Dynamic Processes Gancho Vachkov , Sofia University of IEEE Computer Society http://csdl.computer.org/comp/proceedings/annes/1995/7174/00/ 71740149abs.htm - 12.4KB

[21] Datasheet INA101

[22] Datasheet LM35

[23] Datasheet MOC3022

[25] Datasheet MOC8101