



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA DE PUEBLA**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA,  
OPCIÓN INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**DISEÑO DE UN CONTROL  
ELECTRÓNICO  
AUTOMÁTICO PARA LA  
CONCENTRACIÓN DE  
DIÓXIDO DE CARBONO EN UN  
MICROCLIMA DE JITOMATE  
FUNDAMENTADO EN UN SISTEMA  
DINÁMICO**

**Presenta:**

**Ing. Nubia Ilia Ponce de León Puig\***

**Asesores:**

**Dr. José Eligio Moisés Gutiérrez Arias**

**Dra. Josefina Castañeda Camacho**

**Dr. Irineo López Cruz**



# Índice general

Agradecimientos	XIII
Resumen	XV
Abstract	XVII
Introducción	XIX
Antecedentes y Estado del Arte	XXV
<b>1. Marco Teórico</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. El Microclima de Jitomate . . . . .	1
1.3. Control Automático . . . . .	2
1.4. Control en Lazo Cerrado . . . . .	3
1.5. Sistemas en Espacio de Estados . . . . .	4
1.5.1. Definiciones . . . . .	4
1.5.2. Representación en Espacio de Estados . . . . .	5
1.6. El Problema del Control Óptimo . . . . .	6
1.6.1. El Modelo Matemático del Sistema . . . . .	7
1.6.2. El Criterio de Desempeño . . . . .	7
1.6.3. Restricciones Físicas . . . . .	8
1.6.4. Beneficios del Control Óptimo . . . . .	8
1.7. Establecimiento del Problema Fundamental del Control Óptimo . . . . .	8
1.7.1. Comentarios . . . . .	8
1.8. Optimización de Sistemas Dinámicos en Tiempo Continuo . . . . .	9
1.8.1. Condiciones Necesarias para una Solución . . . . .	9
<b>2. Modelo Dinámico del Cultivo de Jitomate y Modelo Dinámico del Microclima</b>	<b>11</b>
2.1. Introducción . . . . .	11
2.2. Modelo Dinámico del Cultivo de Jitomate . . . . .	11
2.2.1. Balance de Biomasa de Nutrientes . . . . .	13
2.2.2. Ecuación de Balance de Biomasa de Nutrientes . . . . .	18
2.2.3. Balance de Biomasa de Hojas . . . . .	18

2.2.4.	Ecuación de Balance de Biomasa de Hojas . . . . .	19
2.2.5.	Balance de Biomasa de Frutos . . . . .	19
2.2.6.	Ecuación de Balance de Biomasa de Frutos . . . . .	19
2.3.	Modelo Dinámico del Microclima . . . . .	20
2.3.1.	Balance de Energía del Dióxido de Carbono al Interior del Microclima . . . . .	20
2.4.	Representación General del Sistema Microclima-Cultivo en Espacio de Estados . . . . .	21
2.5.	Modelo Integrado Microclima-Cultivo . . . . .	22
<b>3.</b>	<b>Síntesis del Control Óptimo y Simulaciones de la Ley de Control</b>	<b>23</b>
3.1.	Introducción . . . . .	23
3.2.	Síntesis del Control Óptimo . . . . .	23
3.2.1.	Selección del Índice de Desempeño . . . . .	26
3.2.2.	Descripción del Método de Solución . . . . .	26
3.3.	Simulación del Comportamiento de las Variables de Estado Bajo la Ley de Control . . . . .	28
3.3.1.	Análisis Ante una Entrada Escalón . . . . .	28
3.3.2.	Análisis Ante la Entrada de Control Sintetizado . . . . .	29
3.3.3.	Análisis de la Cuarta Variable Adjunta . . . . .	30
3.3.4.	Temperatura y Radiación Solar Variables . . . . .	31
3.4.	Caracterización de la Señal de Referencia . . . . .	34
3.4.1.	Señal de Referencia en Diagrama a Bloques . . . . .	35
<b>4.</b>	<b>Sistema de Control para Regular la Concentración de Dióxido de Carbono</b>	<b>37</b>
4.1.	Introducción . . . . .	37
4.2.	Sistemas de Presión Neumáticos . . . . .	38
4.3.	Modelo Matemático de los Sistemas de Presión . . . . .	39
4.4.	Resistencia Neumática . . . . .	40
4.4.1.	Ley de Poiseuille . . . . .	40
4.5.	Capacitancia Neumática . . . . .	41
4.6.	Función de Transferencia del Sistema . . . . .	43
4.7.	Análisis de la Respuesta del Sistema Ante una Entrada Escalón . . . . .	43
4.8.	Sintonización del Control Clásico PI . . . . .	44
4.8.1.	Método de la Curva de Reacción de Ziegler y Nichols . . . . .	45
4.8.2.	Método de Sintonización Óptimal por LQR . . . . .	48
4.8.3.	Simulación del Comportamiento del Sistema con Control PI . . . . .	52
<b>5.</b>	<b>Diseño del Sistema Electrónico de Control</b>	<b>55</b>
5.1.	Introducción . . . . .	55
5.2.	Esquema General del Sistema Electrónico . . . . .	55
5.3.	Dispositivo de Medición: Sensor de Dióxido de Carbono . . . . .	56
5.3.1.	Descripción de las Terminales . . . . .	57
5.3.2.	Configuración del Sensor . . . . .	57
5.3.3.	Comunicación MODBUS . . . . .	58
5.3.4.	Acceso Directo a Memoria EEPROM y RAM Vía MODBUS . . . . .	58
5.4.	Dispositivo de Control: Microcontrolador Atmega 328p . . . . .	59

5.4.1. Microcontrolador Atmega328p . . . . .	60
5.5. Dispositivo Actuador: Válvula Reguladora de Presión. . . . .	61
5.5.1. Unidad de Control Electrónico ASCO . . . . .	62
5.5.2. Modulación por Ancho de Pulso PWM . . . . .	62
5.6. Diseño del Programa de Control . . . . .	63
5.6.1. Lectura de Dióxido de Carbono . . . . .	64
5.6.2. Señal de Referencia . . . . .	65
5.6.3. Rutina de Control PI . . . . .	66
5.6.4. Diagrama de Flujo Integrado . . . . .	66
5.7. Acondicionamiento de Señales . . . . .	67
5.7.1. Amplificador Operacional No Inversor . . . . .	69
<b>6. Pruebas y Resultados</b>	<b>73</b>
6.1. Introducción . . . . .	73
6.2. Pruebas Realizadas en Protoboard . . . . .	73
6.3. Pruebas Realizadas en Implementación . . . . .	77
6.4. Notas Finales Referentes a la Implementación . . . . .	80
6.5. Conclusiones . . . . .	81
6.6. Trabajo Futuro . . . . .	82
<b>A. Diseño Electrónico</b>	<b>83</b>
<b>B. Diseño del PCB</b>	<b>85</b>
<b>C. Listado de Componentes</b>	<b>87</b>
<b>D. Descripción de Terminales de Componentes</b>	<b>89</b>
D.1. Sensor K-30, 10,000 ppm CO <sub>2</sub> . . . . .	89
D.2. Atmega 328p . . . . .	89
D.3. Controlador de la Válvula ASCO . . . . .	90
D.4. Amplificador Operacional TL081 . . . . .	90
D.5. Reguladores de Voltaje . . . . .	90
<b>E. Implementación del Sistema Electrónico</b>	<b>93</b>
<b>F. Diseño e Implementación de la Fuente de Voltaje Simétrica 24v.</b>	<b>95</b>
<b>G. Participación en Congresos</b>	<b>97</b>
<b>H. Estancia Académica</b>	<b>105</b>
<b>I. Publicaciones</b>	<b>109</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>109</b>



# Índice de figuras

1.	Comportamiento del consumo de energía, consumo de CO <sub>2</sub> , producción y ganancia neta con diferentes estrategias de control en un microclima. . . . .	XX
2.	Elementos que componen el sistema de control automático de concentración de CO <sub>2</sub> . . . . .	XXI
3.	Estructura general de la tesis. . . . .	XXIII
1.1.	Representación general de los sistemas de control en lazo cerrado. . . . .	3
1.2.	Diagrama a bloques del sistema de control de dióxido de carbono en lazo cerrado. . . . .	4
1.3.	Diagrama a bloques del sistema de control lineal en tiempo continuo representado en espacio de estados. . . . .	6
2.1.	Flujo de información de entrada/salida en el modelo microclima cultivo. . . . .	21
3.1.	Comportamiento de la masa seca de los frutos (x, rojo), la masa seca de las hojas (o, verde), los nutrientes (+, negro) y la concentración de dióxido de carbono ( $\Delta$ , azul) ante una entrada escalón unitario. . . . .	29
3.2.	Comportamiento de la masa seca de los frutos (x, rojo), la masa seca de las hojas (o, verde), los nutrientes (+, negro) y la concentración de dióxido de carbono ( $\Delta$ , azul) durante dos semanas, con la entrada de control $u_{CO_2}^{vp}$ . . . . .	30
3.3.	Comportamiento de la cuarta variable adjunta $\Psi_4$ durante dos semanas. . . . .	30
3.4.	Comportamiento de la temperatura y la radiación solar en el microclima durante dos semanas. . . . .	31
3.5.	Variables de estado del sistema ante una entrada escalón unitario con temperatura y radiación solar variables. . . . .	32
3.6.	Variables de estado del sistema ante la entrada de control deducido con temperatura y radiación solar variables. . . . .	33
3.7.	Comportamiento de la cuarta variable adjunta $\Psi_4$ ante la entrada de control sintetizado con temperatura y radiación solar variables. . . . .	33
3.8.	Pruebas de ajuste de curva con diferentes grados de polinomio. . . . .	34
3.9.	Comparación de la señal de referencia con el ajuste de curva por polinomio. . . . .	35
3.10.	Diagrama a bloques para obtener la señal de referencia en Simulink. . . . .	36
3.11.	Señal de referencia del sistema en diagrama a bloques. . . . .	36
4.1.	Representación del sistema neumático dentro del sistema de control automático. . . . .	38
4.2.	Sistema de presión. . . . .	39

4.3. Diagrama a bloques de la función de transferencia sin retroalimentación, con entrada escalón unitario. . . . .	44
4.4. Respuesta del sistema en lazo abierto ante una entrada escalón. . . . .	44
4.5. Curva típica para el método de Ziegler-Nichols. . . . .	45
4.6. Curva de reacción del sistema ante una entrada escalón para el cálculo de los parámetros del controlador. . . . .	46
4.7. Respuesta del sistema en lazo cerrado con el control PI ante una entrada escalón. . . . .	47
4.8. Diagrama a bloques de un control PI. . . . .	48
4.9. Respuestas del sistema ante una entrada escalón con variaciones de la matriz Q. . . . .	51
4.10. Mejor respuesta del sistema ante una entrada escalón unitario con valor fijo de la matriz Q. . . . .	51
4.11. Diagrama a bloques del sistema completo, con la señal de referencia como entrada y el control PI sintonizado. . . . .	52
4.12. Respuesta del sistema con la señal de entrada y el control PI sintonizado por Ziegler-Nichols. . . . .	53
4.13. Respuesta del sistema con la señal de entrada y el control PI sintonizado por LQR. . . . .	53
5.1. Esquema general del sistema de control. . . . .	56
5.2. Sensor de CO <sub>2</sub> K-30. . . . .	57
5.3. Marco general de protocolo MODBUS. . . . .	58
5.4. Válvula proporcional solenoide ASCO. . . . .	61
5.5. Unidad de control para la válvula proporcional solenoide ASCO. . . . .	62
5.6. Modulación por ancho de pulso PWM con diferentes ciclos de trabajo. . . . .	63
5.7. Diagrama de flujo para la lectura de CO <sub>2</sub> por el sensor. . . . .	64
5.8. Diagrama de flujo para la señal de referencia. . . . .	65
5.9. Diagrama de flujo de la rutina de control PI. . . . .	66
5.10. Diagrama de flujo del programa de control completo. . . . .	67
5.11. Conexión del sensor de CO <sub>2</sub> al microcontrolador Atmega328p. . . . .	68
5.12. Diagrama para el acoplamiento de las señales dentro del sistema. . . . .	69
5.13. Configuración del amplificador operacional no-inversor. . . . .	70
6.1. Pruebas con el sensor para realizar lecturas de CO <sub>2</sub> y conocer el valor de la señal de referencia. . . . .	74
6.2. Implementación para verificar la acción de control en el sistema. . . . .	74
6.3. Pruebas para verificar la acción de control ante diferentes perturbaciones. . . . .	75
6.4. Implementación del amplificador operacional. . . . .	76
6.5. Resultados del amplificador con la acción de control. . . . .	76
6.6. Pruebas del sistema completo en protoboard. . . . .	77
6.7. Pruebas realizadas con la tarjeta electrónica. . . . .	78
6.8. Interfaz de usuario para el sistema de control de CO <sub>2</sub> en microclimas de jitomate. . . . .	78
6.9. Adquisición de datos leídos por el sensor en la interfaz de usuario. . . . .	79
6.10. Salida de control ante diferentes perturbaciones al sistema. . . . .	79
A.1. Diseño electrónico en Proteus. . . . .	83

B.1. Diseño electrónico para el circuito impreso. . . . .	85
B.2. Diseño electrónico impreso para placa. . . . .	86
B.3. Diseño del circuito impreso para placa, cara frontal. . . . .	86
D.1. Descripción de terminales del sensor. . . . .	89
D.2. Descripción de terminales del microcontrolador. . . . .	89
D.3. Descripción de terminales del controlador para la válvula. . . . .	90
D.4. Descripción de terminales del amplificador operacional. . . . .	90
D.5. Descripción de terminales del regulador de voltaje 5v. . . . .	90
D.6. Descripción de terminales de los reguladores de voltaje +15v, - 15v. . . . .	91
E.1. Circuito impreso en la placa de cobre. . . . .	93
E.2. Elementos soldados al circuito. . . . .	94
E.3. Tarjeta electrónica final. . . . .	94
E.4. Sistema de control integrado. . . . .	94
F.1. Diseño electrónico de la fuente simétrica de 24 volts. . . . .	95
F.2. Diseño del PCB para la fuente de voltaje simétrica de 24 volts. . . . .	96
F.3. Diseño para la impresión del PCB. . . . .	96
F.4. Implementación final de la fuente de voltaje simétrica de 24 volts. . . . .	96
G.1. Memorias de la conferencia. . . . .	97
G.2. Constancia de participación. . . . .	98
G.3. Reconocimiento al mejor trabajo de la sesión. . . . .	98
G.4. Constancia de participación. . . . .	99
G.5. Programa de las conferencias. . . . .	99
G.6. Memorias de la conferencia. . . . .	100
G.7. Constancia de participación. . . . .	100
G.8. Constancia de participación. . . . .	101
G.9. Libro de resúmenes del congreso. . . . .	101
G.10. Memorias de la conferencia. . . . .	102
G.11. Constancia de participación. . . . .	102
G.12. Memorias de la conferencia. . . . .	103
G.13. Constancia de participación. . . . .	103
H.1. Constancia de estancia de investigación. . . . .	105
I.1. Publicación en revista Iberoamericana de Sistemas, Cibernética e Informática. . . . .	109



# Índice de tablas

3.1. Funciones de los modelos dinámicos del cultivo y del microclima. . . . .	24
3.2. Parámetros físicos. . . . .	25
4.1. Valores para calcular la resistencia neumática del sistema. . . . .	41
4.2. Valores para calcular la capacitancia neumática del sistema. . . . .	43
4.3. Parámetros de controladores PID según el método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols. . . . .	47
4.4. Valores de ganancia proporcional y tiempo integral para el control PI. . . . .	47
5.1. Descripción de las terminales de entrada/salida del sensor. . . . .	57
5.2. Configuración de salida analógica por default para el K-30. . . . .	58
5.3. Comando para leer desde la memoria RAM del sensor. . . . .	59
5.4. Comando para leer un valor de CO <sub>2</sub> . . . . .	59
5.5. Características y especificaciones del Atmega 328p. . . . .	60
C.1. Componentes electrónicos usados en la implementación del sistema. . . . .	87



# Agradecimientos

En primer lugar agradezco y dedico esta tesis a mi mamá quien siempre me apoyó, confió en mi en todo momento y me dio fuerzas para continuar y seguir adelante cuando las cosas se complicaban. Gracias mamá por tu ejemplo y por siempre creer en mi como la mejor.

También agradezco a mi hermana, su apoyo incondicional y mi mejor consejera, quien nunca dudó de mi capacidad y siempre apoyó mis desiciones creyendo que era lo mejor para mí.

Agradezco a toda mi familia, que siempre demostró su orgullo por mi trabajo aunque a veces no entendían muy bien lo que estaba haciendo.

A mis compañeros de maestría que siempre me aconsejaron y estuvieron pendientes de mis resultados y de mi avance.

A mis asesores por sus consejos y tiempo y en especial al Dr. José Eligio Moisés Gutierrez Arias por su paciencia, su dedicación, sus palabras de apoyo, sus consejos y por permitirme involucrarme en un trabajo tan noble e importante.

A mi jurado por sus comentarios acertados que me ayudaron a mejorar el trabajo en todos los aspectos.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y a la Facultad de Ciencias de la Electrónica por ser mi segundo hogar desde licenciatura y por darme la oportunidad de continuar mis estudios de Maestría.



# Resumen

A lo largo de los años se han buscado métodos para mejorar las condiciones climáticas que requieren los cultivos utilizando invernaderos o microclimas. Estos son estructuras cerradas que permiten mantener dichas condiciones en estados requeridos por el cultivo. En este caso particular se trabajará con el cultivo de jitomate, ya que es uno de los productos agrícolas más importantes en nuestro país.

En el presente trabajo de tesis se consideran los modelos dinámicos del cultivo de jitomate y del microclima, con la finalidad de obtener una ley de control optimal que permita conocer el comportamiento óptimo de todas las variables involucradas en el sistema conjunto microclima-cultivo, y así, diseñar el dispositivo electrónico que controlará la concentración de dióxido de carbono en microclimas de jitomate.

De manera general, esta tesis se divide en dos partes principales: la primera consiste en el desarrollo y análisis de los modelos dinámicos del cultivo de jitomate y del microclima, posteriormente, a partir de la teoría del control óptimo se obtiene una ley de control que permite, resolviendo el sistema, conocer el comportamiento óptimo de las variables de estado del sistema, y principalmente de la variable que más interesa: la concentración de dióxido de carbono al interior del microclima. La segunda parte consiste en el diseño e implementación de un control clásico de tipo PI que permita controlar la concentración de  $\text{CO}_2$  al interior del microclima haciendo que el valor se mantenga igual o cercano a la señal de referencia.

El modelo dinámico conjunto microclima-cultivo está formado por las variables de estado involucradas en ambos sistemas, estas variables son: biomasa de frutos, biomasa de hojas, consumo de nutrientes y concentración de dióxido de carbono. A partir de la teoría de control óptimo y del sistema conjunto se selecciona una función de costos, la cual tiene la finalidad de minimizar el gasto por consumo de energía y maximizar la producción total de jitomate, después se obtiene un sistema de variables adjuntas que permite evaluar al sistema en las condiciones finales deseadas. Este procedimiento proporciona una ley de control que deberá depender de una o más variables. Después se resuelve el sistema de variables de estado junto con el sistema de variables adjuntas y el resultado es el comportamiento óptimo de todas las variables. Se hace el estudio de dicho comportamiento, en especial, el de la variable de estado de concentración de  $\text{CO}_2$ , ya que, este comportamiento será la señal de referencia que deberá seguir el sistema de control electrónico.

Una vez que se caracterizó la señal de referencia, se obtuvo el modelo matemático del sistema neumático constituido por la válvula proporcional y el tanque de almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Posteriormente se inició con la sintonización de un control clásico de tipo PI, se usaron dos métodos de sintonización, el primero fue el método de sintonización de Ziegler-Nichols conocido como el método de la curva de reacción, que consiste en el análisis de la respuesta del sistema en lazo abierto ante una entrada escalón para encontrar los parámetros que permiten calcular las ganancias del controlador. El segundo método fue el de optimización por LQR (*Linear Quadratic Regulator*), el cual se basa en seleccionar una función de costo para después, a partir de la solución de la ecuación de Riccati calcular las ganancias del controlador. Se hizo una comparación de resultados con los dos métodos para encontrar el que mejor comportamiento presenta para el control del sistema.

Finalmente se hizo el diseño del sistema electrónico el cual está basado principalmente en un sensor de CO<sub>2</sub>, la válvula proporcional solenoide y un microcontrolador que realizará la lectura de las mediciones hechas por el sensor, la rutina del control PI y posteriormente mandará la señal de acción a la válvula.

El presente trabajo muestra el prototipo de un dispositivo que controla la concentración de dióxido de carbono en microclimas de jitomate y pretende ser la base de un trabajo futuro más desarrollado en el que se pueda obtener un producto funcional para su aplicación en microclimas reales.

# Abstract

The tomato model has been developed and it is formed by the mass balances: the non-structural biomass (nutrients) and the structural biomass of fruits and leaves. Also, a model that describes the behaviour on carbon dioxide concentration inside greenhouse is obtained. From the two models we get a new complete crop-greenhouse model. This model allows to get an optimal control for the carbon dioxide enrichment in a tomato greenhouse which gives benefits, because it is possible to achieve a saving for energy consumption and more tomato production. The optimal control theory is applied to the crop-greenhouse integrated system, which is based on four state variables: the consumption of nutrients, the fruits and leaves growth and the carbon dioxide concentration. This work contributes with the optimal control law that gives the desired CO<sub>2</sub> concentration behaviour during the growth time for the crop. This behaviour will be a reference signal for the controller implementation in the electronic device. Then, a classical PI controller was synthesized using two methods: Ziegler-Nichols and optimal control by LQR. And finally one of two methods was selected to make the control inside electronic device. This work contributes with a prototype of an electronic device which makes the control of CO<sub>2</sub> concentration inside greenhouse using a sensor, a micro-controller and an actuator (valve).



# Introducción

Desde que el hombre descubrió la agricultura como una nueva forma de vida, se han buscado e implementado nuevos métodos para su optimización, esto quiere decir que, la importancia de encontrar nuevas formas para aumentar la producción de productos agrícolas ha sido de mayor importancia conforme ha evolucionado la sociedad. En este desarrollo, la tecnología siempre se ha visto involucrada, desde los tiempos en los que se usaban herramientas y animales para surcar el campo hasta el desarrollo de vehículos o dispositivos que facilitan el trabajo. En el riego de la siembra también ha habido un gran avance gracias a la tecnología, como por ejemplo el riego presurizado que se utiliza en hortalizas de varios países como Chile, España y México [1].

En este trabajo se involucra un elemento que ha permitido optimizar la producción de cultivos en todo el mundo desde los años 50's, los invernaderos (*greenhouses* en inglés), son estructuras cerradas, estáticas, que tienen la finalidad de mejorar las condiciones que el cultivo necesita para incrementar su rendimiento. Principalmente, los invernaderos son estructuras de vidrio o plástico, materiales que permiten aprovechar la radiación solar para mantener el interior a una temperatura diferente del exterior, esto provoca que todo lo que está al interior del invernadero emita radiación infrarroja que no sale del lugar. Entonces, como se puede deducir, un invernadero por sí sólo hace que exista cierta temperatura dentro del mismo, y si se hace uso de otros elementos como la apertura o cierre de ventilas se pueden controlar variables necesarias para el crecimiento del cultivo, como la misma temperatura, la humedad y la concentración de dióxido de carbono.

A un invernadero se le da el nombre de *microclima* cuando contiene elementos que permiten controlar diferentes variables físicas y que tienen la misma respuesta sin importar en donde se instale, esto significa que es posible producir diferentes tipos de cosechas durante todo el año sin importar las condiciones climáticas de la región.

Cualquier cultivo o planta necesita de ciertas condiciones ambientales para su producción, estas condiciones dependen del estado de las variables físicas que rodean al cultivo, como la temperatura, humedad y concentración de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Todas estas variables son esenciales para el crecimiento y buen desarrollo de cualquier planta, pero en este trabajo sólo se hablará de una de ellas: la concentración de  $\text{CO}_2$ .

Es bien sabido que el dióxido de carbono es necesario para que las plantas puedan realizar la fotosíntesis, y así obtener el carbono que necesitan para su crecimiento. La fotosíntesis es la

conversión de materia inorgánica en materia orgánica gracias a la energía que aporta la luz. De esta forma, las plantas crean su propio alimento haciendo un proceso químico basado en el dióxido de carbono.

El jitomate es un producto agrícola que pertenece al género *Lycopersicum*. Es un género pequeño constituido por el tomate y siete especies salvajes muy relacionadas. El lugar original de domesticación del tomate es incierto, pero las evidencias más importantes indican a México como este lugar. El jitomate es la aportación vegetal más grande de México. Es un producto que tiene gran aceptación en las diversas culturas del mundo, esto se evidencia por el hecho de ser el segundo producto agrícola más consumido a nivel mundial, por tener la característica de ser un producto que se puede consumir solo o en conjunto con otros alimentos. Su trascendencia en el contexto económico del país reside en su importante aportación de divisas y generación de empleos [2]. De esta forma se justifica la importancia de desarrollar este trabajo usando el cultivo de jitomate.

En los últimos años, al interior del estado de Puebla se ha promovido el cultivo protegido de jitomate como una alternativa para el desarrollo agrícola en los municipios de Aquixtla, Tetela de Ocampo, Zacatlán e Itacamaxtitlan. Principalmente, el municipio de Aquixtla cuenta con una superficie de cultivo de jitomate en invernadero de aproximadamente 19 hectáreas con un valor de producción en el 2012 de 52,000 millones de pesos mexicanos [5], lo que justifica la rentabilidad de este cultivo en dicho municipio y la importancia de implementar microclimas que controlen las variables que permitirán maximizar la producción.

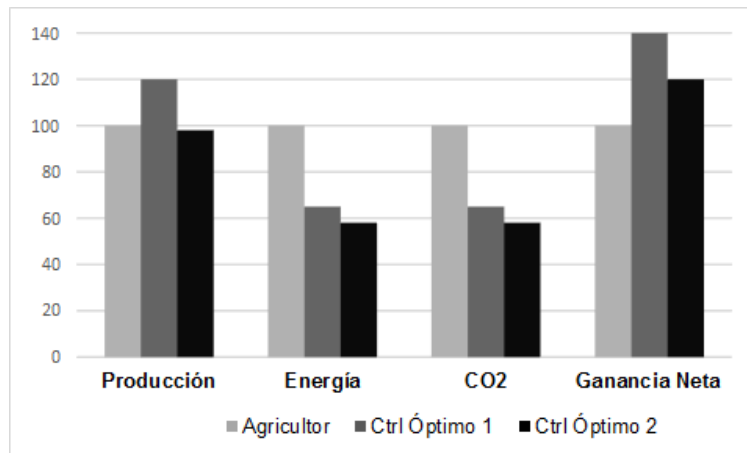


Figura 1: Comportamiento del consumo de energía, consumo de CO<sub>2</sub>, producción y ganancia neta con diferentes estrategias de control en un microclima.

En la figura (1) se comparan los beneficios de dos controles óptimos en cultivos de lechuga, contra la forma de control tradicional que utiliza el agricultor. Se puede observar que se tiene un ahorro considerable en gastos por consumo de energía y un beneficio neto maximizado cuando se aplican los controles óptimos [3].

El trabajo de tesis está basado en el desarrollo de una ley de control que regule la concentración de dióxido de carbono en un microclima de jitomate. El trabajo a realizar se dividirá en dos partes. La primera parte consiste en el diseño de la ley de control basado en el modelo dinámico del microclima y del cultivo de jitomate para obtener una señal de referencia, que será el comportamiento óptimo de la variable de concentración de dióxido de carbono. La segunda parte consiste en el diseño de un dispositivo electrónico que realice el control y siga la señal de referencia obtenida a partir del control óptimo. El sistema de regulación de  $\text{CO}_2$  constará de 3 partes principales: la etapa de suministro de  $\text{CO}_2$ , la medición del  $\text{CO}_2$  y la etapa de control. La etapa de suministro consiste de un tanque de almacenamiento conectado a una válvula reguladora, la medición se realizará con un sensor de  $\text{CO}_2$  y finalmente se tendrá un microcontrolador que obtendrá lecturas del sensor y realizará la acción de control sobre la válvula (Figura 2).

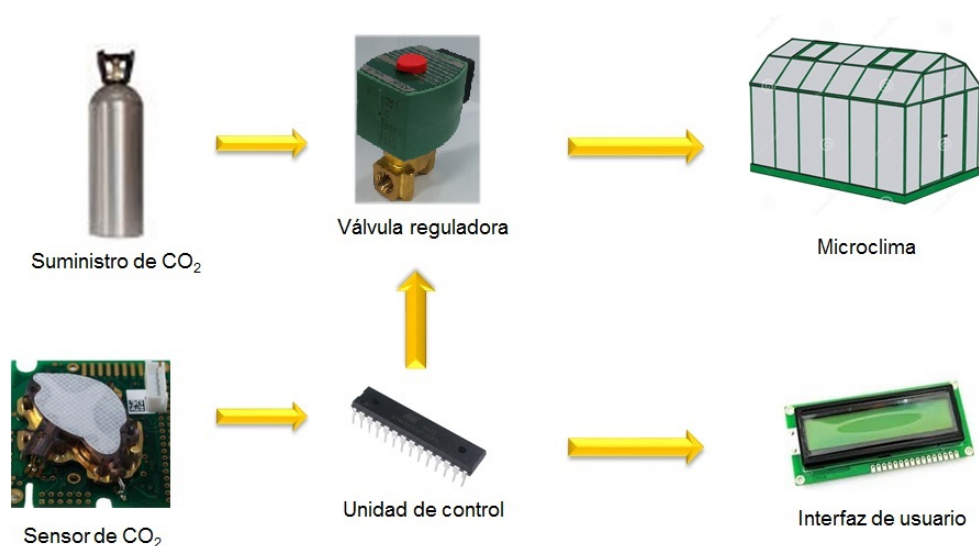


Figura 2: Elementos que componen el sistema de control automático de concentración de  $\text{CO}_2$ .

Los modelos dinámicos del microclima y del cultivo de jitomate ya se han estudiado anteriormente [3], y partir de ellos se han obtenido resultados independientes, esto quiere decir que nunca se han obtenido resultados con un modelo integrado por ambos modelos debido a su complejidad y al número de variables involucradas [4]. Los modelos estudiados con anterioridad serán la base para obtener un nuevo modelo integrado microclima-cultivo, y el reto será desarrollar una ley de control sobre ambos modelos, que proporcione la concentración de  $\text{CO}_2$  necesaria para el cultivo de jitomate en cada instante de tiempo.

En la figura (2) se muestran los elementos que compondrán al sistema de control de dióxido de carbono: el tanque de suministro de  $\text{CO}_2$  conectado a la válvula proporcional y la salida de la válvula conectada por tubería al microclima y el sensor de  $\text{CO}_2$  que tomará las mediciones que el microcontrolador interpretará para hacer la acción de control y mandar la señal a la

válvula.

Para la realización de esta tesis, el objetivo general es diseñar un control electrónico automático para la concentración de dióxido de carbono en un microclima fundamentado en el sistema dinámico del cultivo de jitomate y del microclima.

Del objetivo general se desglozan los siguientes objetivos particulares:

- Analizar los sistemas que regulan el flujo de CO<sub>2</sub>.
- Analizar el método para sintetizar el control óptimo.
- Diseñar una ley de control para la concentración de dióxido de carbono en un invernadero.
- Realizar la simulación de la ley de control.
- Diseñar y construir el sistema electrónico para el ajuste de la concentración de dióxido de carbono.

Para lograr los objetivos, se requiere en primer lugar, realizar un estudio de los modelos dinámicos, tanto del microclima como del jitomate. Posteriormente, obtener una ley de control óptimo sobre la concentración de CO<sub>2</sub> tomando en cuenta las variables del peso seco de la planta, el peso seco del fruto, la disponibilidad de nutrientes y la concentración de dióxido de carbono. Y por último, se trabajará en un dispositivo electrónico que realice el control de CO<sub>2</sub> que se obtuvo analíticamente anteriormente. El dispositivo electrónico estará integrado en una tarjeta, en ella se encontrará el dispositivo de control, la comunicación con el sensor y la válvula, y todos los acondicionamientos de señales requeridos por los dispositivos usados en la tarjeta. El primer paso para la integración del dispositivo electrónico será hacer una selección de los dispositivos que mejor se acoplen a las necesidades del sistema, como costos, tamaño o características técnicas.

El desarrollo del proyecto tiene como significado servir de base para futuras investigaciones y pruebas en microclimas reales. Se debe recordar que el jitomate es un producto importante para el país, por tal motivo, es necesario generar tecnología de alto nivel a bajo costo y que permita contribuir con la producción del cultivo, de aquí la importancia del trabajo descrito en este documento. Por otro lado, la investigación que se realizaría para desarrollar controles avanzados en microclimas implica un avance tecnológico y científico, ya que, en nuestro país no existen aún invernaderos o microclimas que tengan un sistema de control para la concentración de dióxido de carbono, esto quiere decir que, con la investigación realizada, Puebla se podría convertir en el pionero de esta nueva tecnología que cambiaría el rumbo del país.

La estructura del trabajo de tesis se divide en dos partes importantes. En primer lugar se tiene la parte analítica que consiste en el estudio de los modelos dinámicos del microclima y del cultivo de jitomate, posteriormente se integran ambos modelos con la finalidad de aplicar la teoría de control óptimo al sistema conjunto y así obtener una ley de control que permita conocer el comportamiento óptimo de las variables de estado. Este procedimiento se describe en los primeros capítulos. En el capítulo 2 se describen los modelos dinámicos del cultivo de

jitomate y del microclima y cómo interactúan entre sí para formar un modelo integrado. En el capítulo 3 se describe la síntesis del control óptimo para obtener una ley de control. Con esta ley de control se realizan simulaciones que permiten obtener el comportamiento óptimo de concentración de  $\text{CO}_2$  requerido por el cultivo, este comportamiento será la señal de referencia del sistema electrónico y a partir de esta se deriva el problema de subcontrol, el cual es la base de la segunda parte de la tesis.

La señal de referencia deberá ser seguida y alcanzada por un sistema de control automático basado en un diseño electrónico. La segunda parte de la tesis se desarrolla en los capítulos 4 y 5. En el capítulo 4 se obtiene una función de transferencia que describe el comportamiento del sistema neumático integrado en el sistema de control, dicha función de transferencia depende de las características del sistema neumático y del dióxido de carbono. Después, se sintoniza un control PI que provocará, a partir de la comparación del valor medido de  $\text{CO}_2$  con la señal de referencia, que se tenga una acción de control que logre obtener la cantidad óptima de dióxido de carbono requerida por el cultivo dentro del microclima. En el capítulo 5 se realiza la descripción del diseño electrónico basado en la selección de los componentes necesarios para el funcionamiento del sistema y del acomplamiento de estos componentes.

Finalmente, en el capítulo 6 se muestran los resultados obtenidos al realizar las pruebas con el dispositivo de control electrónico. En la figura (3) se ilustra la división del trabajo de tesis descrita anteriormente.

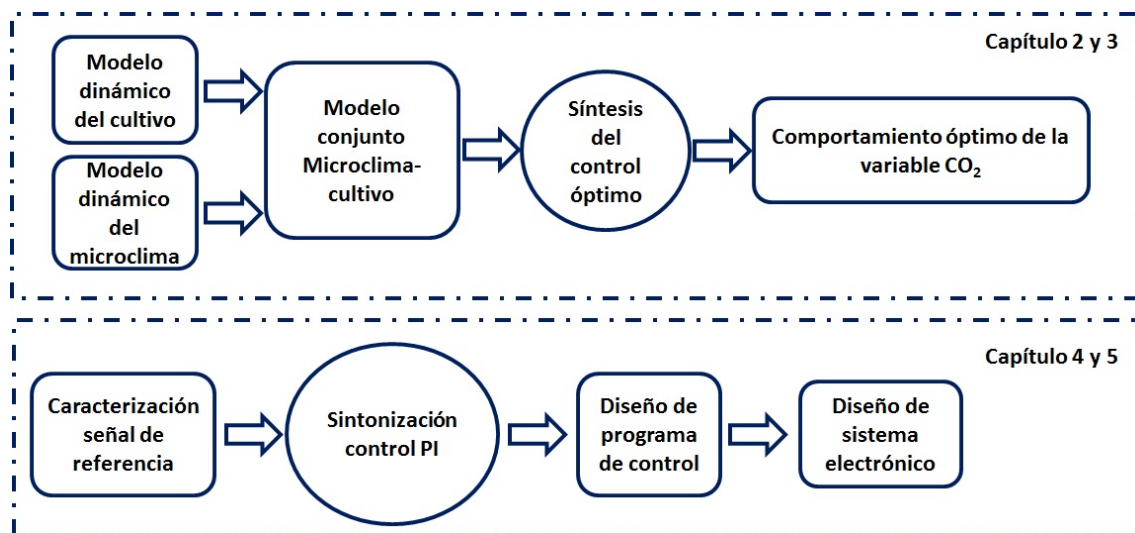


Figura 3: Estructura general de la tesis.



# Antecedentes y Estado del Arte

A lo largo del tiempo se han hecho muchos esfuerzos para desarrollar avanzados sistemas de control de clima en microclimas. En particular, se han propuesto diferentes métodos de control óptimo [4], [6], [7], [8], aunque esto no ha sido muy positivo, ya que los conceptos de control óptimo aplicados a sistemas no lineales resultan muy complicados. Sin embargo, se han propuesto algunas simplificaciones para reformular el problema general y obtener soluciones analíticas que resultan en un problema de control subóptimo [8].

El enriquecimiento de  $\text{CO}_2$  se practica comúnmente en los cultivos de microclimas con la finalidad de aumentar tanto el rendimiento como el beneficio. Algunos estudios han demostrado que las plantas de maceta, flores de temporada, verduras y plantas forestales respondieron al enriquecimiento de dióxido de carbono con aumento en el peso seco, altura de la planta, y en el número de hojas y ramas [9], el mismo estudio también informó que el enriquecimiento de dióxido de carbono aumentó la eficiencia del agua en aproximadamente un 30 por ciento. Otro estudio referente al beneficio del enriquecimiento de  $\text{CO}_2$  [10] demostró que el enriquecimiento impacta en los cambios físico-químicos y enzimáticos en el crecimiento del fruto del jitomate, como la firmeza o el color, en diferentes etapas de madurez.

Un algoritmo propuesto hace unos años considera un indicador de desempeño durante el periodo de crecimiento [3], sin embargo, únicamente usa la ecuación dinámica que describe el comportamiento de la masa seca total del cultivo, generaliza en cierta medida los algoritmos deducidos por otros estudios y procede en condiciones mucho más débiles. El método para calcular el nivel de enriquecimiento dinámico óptimo de  $\text{CO}_2$  es válido para una amplia clase de modelos utilizados que describen la tasa de producción, la materia seca, la fotosíntesis y la ventilación [11].

Se han desarrollado una serie de estrategias óptimas para el enriquecimiento de  $\text{CO}_2$  que sustentan la maximización de la ganancia efectiva que regresa a los productores proporcionada por el enriquecimiento de  $\text{CO}_2$ . El gasto neto debido al aumento del  $\text{CO}_2$  es un equilibrio entre el costo de enriquecer los cultivos y los ingresos de la venta de la cosecha. El costo de enriquecer el cultivo es la suma de dos términos: el costo debido a las pérdidas de ventilación de  $\text{CO}_2$  y costos adicionales, debido a la absorción por el cultivo de  $\text{CO}_2$  añadido [12].

En años anteriores se utilizó un modelo para la cinemática de crecimiento del fruto para predecir la distribución del tiempo de fotosíntesis en cosechas posteriores [13]. Esto se combina

con las predicciones, para convertir el CO<sub>2</sub> en un valor económico con base en el valor esperado del fruto.

Se conocen dos estrategias de control óptimo para el enriquecimiento de CO<sub>2</sub> [14]. La primera utiliza CO<sub>2</sub> puro de un tanque de almacenamiento y la segunda utiliza CO<sub>2</sub> contenido en los gases de escape de calderas de gas natural. En este trabajo la estrategia para el control óptimo mediante CO<sub>2</sub> puro se presenta y se compara con las estrategias utilizadas por los productores. En la actualidad, algunas de estas estrategias se han aplicado en cultivos de microclimas obteniendo resultados satisfactorios en cuanto a producción y ahorro se refiere.

Los microclimas de control automático para la concentración de CO<sub>2</sub> ya se están usando en algunos países del mundo, como Holanda, Alemania o Israel. En México, en el estado de Querétaro ya se cuenta con un sistema completo de control de clima (humedad, temperatura y CO<sub>2</sub>) en cultivos de jitomate y pimiento, pero es un sistema importado y se desconoce su ley de control o el método que aplicaron para el enriquecimiento de CO<sub>2</sub>.

El uso de microclimas automatizados presenta una gran importancia en muchos ámbitos de una sociedad, principalmente en el ámbito económico. Los países agrícolas tienen ventajas económicas al exportar los productos que cultivan, pero tienen todavía más ventajas si logran ser el principal exportador de dichos productos. Ahora, enfocándonos a nuestro país, resulta que México es el principal exportador de jitomate fresco a nivel mundial, con cerca del 20 por ciento del volumen y 25 por ciento del valor comerciados que se destinan principalmente a EUA [15]. Implementar estos invernaderos en todos los cultivos de jitomate de nuestro país implicaría aumentar la producción por metro cuadrado de jitomate y lograr así mejorar la economía del país.

# Capítulo 1

## Marco Teórico

### 1.1. Introducción

El primer capítulo describe de manera general las características del microclima de jitomate y tiene la finalidad de servir como introducción a las definiciones y conceptos que serán necesarios conocer para entender el desarrollo del trabajo de tesis.

En la primera parte se da la definición de control automático y se describen los sistemas de control en lazo cerrado. Después, se presenta la teoría de los sistemas en espacio de estados, ya que de esta forma es como se verá representado el sistema con el que se trabajará a lo largo de la investigación. También, en este capítulo, se presenta la teoría del control óptimo, misma que se usará para obtener una ley sobre la variable que se desea controlar, se establece el problema general de la teoría del control óptimo y se describen las condiciones necesarias que dan solución a dicho problema.

### 1.2. El Microclima de Jitomate

Un microclima es un biosistema complejo con características especiales, las cuales lo hacen un reto matemático. Un requisito para usar la teoría de control óptimo en el manejo de un microclima es tener modelos precisos de los componentes más relevantes del sistema. Las constantes de tiempo de las variables climáticas del microclima son pequeñas comparadas con aquellas del cultivo. Además, existe una considerable incertidumbre relacionada con los parámetros de los modelos dinámicos, las condiciones iniciales y el comportamiento de las perturbaciones o el clima externo que afecta al cultivo dentro del microclima.

La producción de jitomate en microclima ha atraído la atención en años recientes, en parte debido a un renovado interés en *cosechas alternativas*. Dicha atención está basada en la percepción de que los jitomates producidos en microclima son más atractivos económicamente hablando que aquellos cosechados de manera más tradicional. La popularidad también se debe a que el valor del jitomate de microclima es alto con respecto a su valor unitario, los costos de producción también son elevados. Los siguientes puntos ayudarán a esclarecer algunos aspectos de este cultivo [16]:

- El jitomate de microclima tiene requerimientos muy específicos, a diferencia de cultivos tales como la soya y el algodón, y no son ni siquiera similares a otros cultivos vegetales de campo. De hecho, un productor de jitomate en campo abierto tendría dificultades cultivando jitomate de microclima sin antes haber tomado un tiempo de aprendizaje. El jitomate de microclima debe ser considerado como un cultivo completamente distinto a otros cultivos de campo abierto.
- Debido a sus requerimientos específicos de crecimiento, el jitomate de microclima no puede ser denominado como cultivo fácil de cultivar. Es uno de los cultivos hortícolas más difíciles de producir con varios procedimientos que deben seguirse para asegurar un cultivo productivo y saludable.
- El tiempo necesario para obtener jitomate en un microclima es mayor por unidad que cualquier otro cultivo de campo. Las distintas prácticas semanales necesarias requieren una cantidad significativa de tiempo. La labor de mantenimiento requerida por microclima es de 20 horas-hombre por semana (para un invernadero promedio 8m x 30m).
- El microclima de jitomate necesita atención regular. A diferencia de otros cultivos de campo. Este cultivo debe ser examinado diariamente. Debido a que el sistema de crecimiento es complejo hay muchas cosas que podrían salir mal.
- El ambiente de un microclima está muy lejos de ser estéril. Existe un mal entendido en cuanto a la existencia de enfermedades y plagas. Mientras que el ambiente provisto por un microclima es ideal para cultivar jitomates, es aún mejor para propagar todo tipo de plagas de insectos y organismos que causen enfermedades a la planta. Debido a las condiciones de temperatura, humedad relativa y un follaje abundante, este tipo de amenazas es un factor muy importante a tener en cuenta.

Las características del microclima de jitomate permitirán junto con los conceptos de control automático, que se presentan a continuación, definir la forma en que se deberá obtener el control óptimo y su implementación en un sistema cómodo y amigable para los agricultores que interactuarán con él dentro del microclima.

### 1.3. Control Automático

El control automático ha desempeñado una función de suma importancia en el avance de la ingeniería y la ciencia. Es una parte importante de los procesos modernos, por ejemplo en procesos industriales, de manufactura, procesos aeroespaciales, militares y en procesos de agricultura. El control automático es esencial en el control numérico de máquinas-herramientas, en el diseño de sistemas de pilotos, en el diseño automotriz y en operaciones que involucran el control de variables como temperatura, humedad, presión y flujo. Se entiende por control automático el mantenimiento de un valor deseado de una variable dentro de un intervalo de tiempo, su funcionamiento se basa en medir el valor y compararlo con el valor deseado dentro

del intervalo aceptable utilizando la diferencia para proceder a controlarla [17].

En el caso del control automático de microclimas hay una gran posibilidad para el cultivo y la administración de recursos dentro del microclima, esto es indispensable para el ajuste de las variables de control en una forma automática. La razón de esto es que resulta casi imposible para el ser humano entender y manipular sistemas con más de dos procesos dependientes sin ayuda adicional. Por ejemplo, la apertura de una ventana con el propósito de reducir la humedad relativa en un invernadero también afectará la temperatura, esto provoca la necesidad de más mediciones. Por esta razón la introducción del control automático y controles por computadora en microclimas ha presentado un avance económico en la producción de los cultivos de microclima desde la segunda mitad del siglo veinte. Incluso los controles automáticos más básicos han aumentado las capacidades de la industria de los invernaderos alrededor del mundo. En adición, la disponibilidad de sistemas de control automático abren nuevos caminos para la optimización de cultivos de microclima.

## 1.4. Control en Lazo Cerrado

Un sistema que mantiene una relación entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control, se denomina *sistema de control realimentado* o *sistema en lazo cerrado* [17]. Los sistemas de control realimentados no se limitan a la ingeniería si no que también se encuentran en diversos campos, como por ejemplo el sistema en lazo cerrado de los sistemas de control de variables en invernaderos.

En un sistema de control en lazo cerrado se alimenta al controlador a partir de la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de retroalimentación. El controlador de un sistema en lazo cerrado tiene la finalidad de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente (cercano o igual a una señal de referencia) [17].

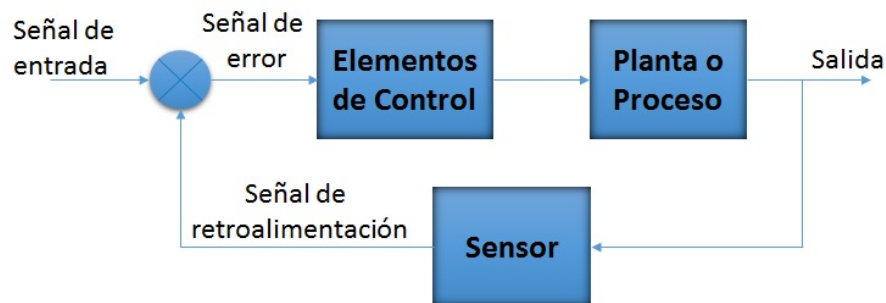


Figura 1.1: Representación general de los sistemas de control en lazo cerrado.

De una forma general, los sistemas de control en lazo cerrado se pueden representar en un diagrama a bloques como se observa en la figura (1.1), en este tipo de representación es fácil observar la señal de error que se obtiene a partir de la comparación de la señal de entrada y la medida del sensor. Como se puede deducir, en este tipo de sistemas es necesaria la existencia

de los elementos de medición (sensores), sin ellos el sistema no tendría un valor de comparación y el sistema se comportaría como un sistema en lazo abierto o sin retroalimentación.

En el caso particular de este trabajo se habla de un sistema de retroalimentación, pues, fundamentado en la teoría de control óptimo, se obtendrá una señal de referencia (cantidad de dióxido de carbono óptima al interior del microclima, requerida por el cultivo durante el periodo de crecimiento), que será comparada con la medición que realice el sensor de  $\text{CO}_2$ , se tiene también la planta o proceso (el microclima) y finalmente un elemento de control, que en este caso es la válvula de control, la cual regula el flujo de dióxido de carbono hacia el interior del microclima. En la figura (1.2) se muestra el diagrama a bloques del sistema de control de dióxido de carbono en lazo cerrado.

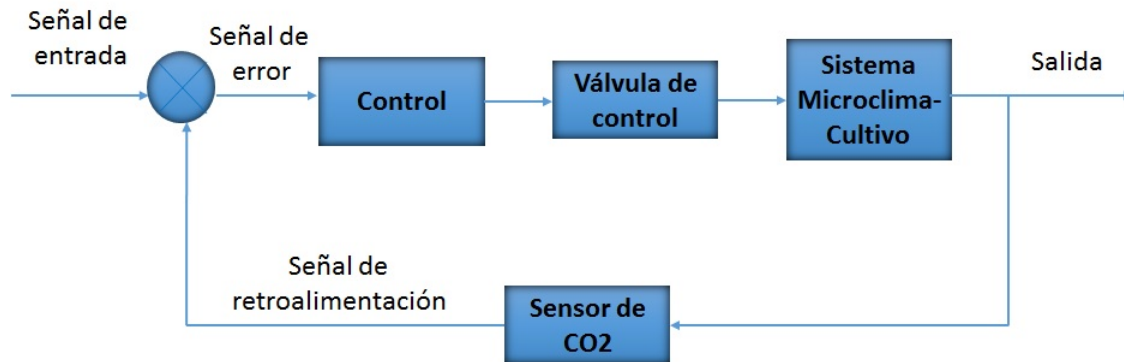


Figura 1.2: Diagrama a bloques del sistema de control de dióxido de carbono en lazo cerrado.

## 1.5. Sistemas en Espacio de Estados

Conforme avanza la tecnología, los sistemas que nos rodean se vuelven más complejos debido a los requerimientos de tareas complejas y de elevada precisión. Estos sistemas presentan la característica de tener entradas y salidas múltiples y pueden variar en el tiempo. Por tal motivo, desde 1960 se ha aumentado el acceso a computadoras de gran escala y se ha desarrollado la teoría de control moderna, que es un nuevo enfoque basado en el concepto de estado.

De acuerdo a la teoría de control que se utilizará, es necesario conocer la forma en que el sistema deberá ser representado en espacio de estados. A continuación se dan algunas definiciones que serán útiles a lo largo del documento [17].

### 1.5.1. Definiciones

**Estado.** El estado de un sistema dinámico es el conjunto más pequeño de variables denominadas *variables de estado* de modo que el conocimiento de estas variables en  $t = t_0$ , junto con el conocimiento de la entrada para  $t \geq t_0$ , determina por completo el comportamiento

del sistema para cualquier tiempo  $t \geq t_0$ .

**Variables de estado.** Las variables de estado de un sistema dinámico son las que forman el conjunto más pequeño de variables que determinan el estado del sistema dinámico.

**Vector de estados.** Si se necesitan  $n$  variables de estado para describir por completo el comportamiento de un sistema determinado, estas  $n$  variables de estado se consideran los  $n$  componentes de un vector  $x$ , tal vector se denomina *vector de estado*. Este determina de manera única el estado del sistema  $x(t)$  para cualquier tiempo  $t \geq t_0$ , una vez que se obtiene el estado  $t = t_0$  y se especifica la entrada  $u(t)$  para  $t \geq t_0$ .

**Espacio de estados.** El espacio de  $n$  dimensiones cuyos ejes de coordenadas están formados por el eje  $x_1$ , el eje  $x_2, \dots$ , el eje  $x_n$ , se denomina *espacio de estados*. Cualquier estado puede representarse mediante un punto en el espacio de estados.

### 1.5.2. Representación en Espacio de Estados

La representación de los sistemas en espacio de estados se basa en la descripción de su comportamiento en términos de ecuaciones diferenciales de primer orden, que se combinan en una ecuación diferencial matricial de primer orden. El uso de notación matricial simplifica la representación matemática de los sistemas.

Suponga que un sistema de entradas y salidas múltiples contiene  $n$  integradores. También suponga que existen  $r$  entradas  $u_1(t), u_2(t), \dots, u_r(t)$  y  $m$  salidas  $y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)$ . Se definen las salidas de los integradores como variables de estado:  $x_1(t), x_2(t); \dots, x_n(t)$ . A continuación el sistema se describe mediante ecuaciones diferenciales, de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ \dot{x}_2(t) = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ \dot{x}_n(t) = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \end{cases} \quad (1.1)$$

Las salidas  $y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)$  del sistema se obtienen mediante:

$$\begin{cases} y_1(t) = g_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ y_2(t) = g_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ y_n(t) = g_n(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \end{cases} \quad (1.2)$$

Es importante recordar que tanto las variables de estado  $x(t)$  y la señal de control  $u(t)$  dependen del tiempo. Las ecuaciones anteriores se convierten en:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, u, t) \\ y(t) = g(x, u, t) \end{cases} \quad (1.3)$$

Donde la primera ecuación es la ecuación de estado y la segunda es la ecuación de salida.

Si se linealizan las ecuaciones alrededor del estado de operación, se tienen las siguientes ecuaciones de estado y de salida linealizadas:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) \end{cases} \quad (1.4)$$

En donde  $A(t)$  se denomina matriz de estado,  $B(t)$  es la matriz de entrada,  $C(t)$  es la matriz de salida y  $D(t)$  es la matriz de transmisión directa. La representación en diagrama a bloques de la forma matricial para sistemas en espacio de estados se observa en la figura (1.3).

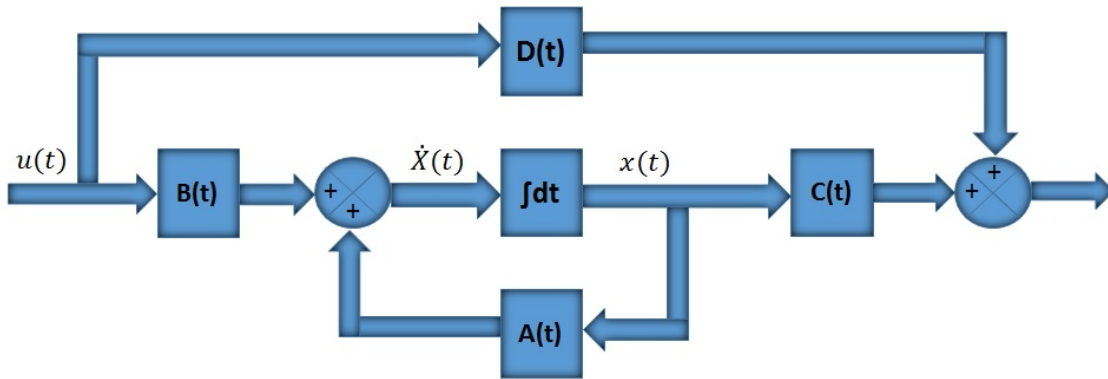


Figura 1.3: Diagrama a bloques del sistema de control lineal en tiempo continuo representado en espacio de estados.

## 1.6. El Problema del Control Óptimo

Los procesos físicos que tienen lugar en la tecnología son, por regla, controlables. Los controles pueden ser realizados de diferentes formas; es aquí donde surge la duda de encontrar el mejor control del proceso, o dicho de otra forma, el control óptimo del proceso. Por ejemplo, se puede hablar acerca de la optimización en la rapidez de realizar una acción de sensado, con la finalidad de controlar al sistema en un tiempo más corto con un mínimo consumo de energía [18].

El control óptimo es una técnica matemática usada para resolver problemas de optimización en sistemas que evolucionan en el tiempo y que son susceptibles de ser influenciados por fuerzas externas.

Para analizar y resolver problemas de control óptimo se requiere de una representación del sistema en espacio de estados. Este tipo de representación permite distinguir entre diferentes tipos fundamentales de variables y permite el uso de software para resolver el problema de control óptimo.

Se puede decir que el control de cualquier sistema, en este caso de un microclima se basa en tres cosas fundamentales, las cuales serán necesarias en todo momento para el desarrollo de

una ley de control óptimo: el modelo matemático del sistema, la selección de un funcional de desempeño y restricciones físicas.

### 1.6.1. El Modelo Matemático del Sistema

Si  $x_2(t), \dots, x_n(t)$  son las variables de estado (o estados) del proceso en el tiempo  $t$ , y  $u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)$  son entradas de control del proceso en el tiempo  $t$ , entonces el sistema puede ser descrito por  $n$  ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden como se muestra en (1.5).

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = f_1(x_1(t), \dots, x_n(t), u_1(t), \dots, u_m(t), t), \\ \dot{x}_2(t) = f_2(x_1(t), \dots, x_n(t), u_1(t), \dots, u_m(t), t), \\ \vdots \\ \dot{x}_n(t) = f_n(x_1(t), \dots, x_n(t), u_1(t), \dots, u_m(t), t), \end{cases} \quad (1.5)$$

Usando notación matricial es posible definir el vector de estados como sigue:

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} \quad u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_n(t) \end{bmatrix}$$

Donde el vector  $x(t)$  es el vector de las variables de estado del sistema y  $u(t)$  es el vector de entradas de control. Entonces, la ecuación de estados es:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \quad (1.6)$$

-La historia de los valores de entrada de control durante el intervalo  $[t_0, t_f]$  es denotada por  $u(t)$  y es llamada el control.

-La historia de los valores de los estados en el intervalo  $[t_0, t_f]$  es llamada trayectoria de los estados y es denotada por  $x(t)$ .

### 1.6.2. El Criterio de Desempeño

Se requiere de un criterio para evaluar el desempeño del sistema. Normalmente el funcional de desempeño está definido como:

$$J = \phi(x(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} L(x(t), u(t), t) dt, \quad (1.7)$$

donde  $t_0$  y  $t_f$  son el tiempo inicial y tiempo final,  $\phi$  y  $L$  son funciones escalares.  $t_f$  puede ser fijo (especificado) o libre. Comenzando en el estado inicial  $x(t_0) = x_0$  y aplicando la señal de control  $u(t)$  para  $t \in [t_0, t_f]$  se logra que el sistema siga alguna trayectoria de estados, entonces el índice de desempeño asigna un número real único a cada trayectoria del sistema.

Si  $J$  tiene las dos partes,  $\phi$  y la integral, se denomina representación de *Bolza*. Cuando  $J$  se compone sólo de la integral se denomina *Lagrangiano*. Una función de desempeño compuesta únicamente de  $\phi$  es de tipo *Mayer* [19].

### 1.6.3. Restricciones Físicas

Normalmente tanto los estados como los controles presentan restricciones físicas que deben ser especificadas.

- Una historia de los controles que satisface las restricciones durante el intervalo  $[t_0, t_f]$  se denomina control admisible.
- Una trayectoria de los estados que satisface las restricciones de las variables de estado en el intervalo  $[t_0, t_f]$  es llamada una historia admisible.

### 1.6.4. Beneficios del Control Óptimo

Los beneficios y dificultades asociados con el control óptimo en un microclima serán mencionados en esta sección.

Dando cualquier modelo de sistema de microclima y una función de costo asociada, el control está disponible para el control óptimo computarizado y un beneficio asociado maximizado. Para ello, se pueden hacer cambios para instancias como los parámetros del problema de costos de calefacción y precios de los actuadores, y así ver cómo esto tiene efecto en el control óptimo aplicado y en los beneficios maximizados. Esto es de gran interés y relevancia para los agricultores, quienes quieren reducir gastos por consumo de energía.

## 1.7. Establecimiento del Problema Fundamental del Control Óptimo

El problema fundamental del control óptimo consiste en determinar un control admisible  $u(t)$ , el cual provoque que el sistema representado en la ecuación de estados (1.6) siga una trayectoria admisible  $x$  que minimice la medida de desempeño (1.7). Así,  $u(t)$  es llamado el control óptimo y  $x(t)$  es una trayectoria óptima. La elección de un *vector de control*  $m$ -dimensional  $u(t)$  determina la tasa de cambio del vector de estados mediante la ecuación (1.6).

### 1.7.1. Comentarios

- Puede no saberse de antemano que un control óptimo existe, esto quiere decir que podría hacerse toda la síntesis del control óptimo y no llegar a una optimización de las variables como se desea.

- Si el control óptimo existe puede que este no sea único. Podrán existir incluso infinidad de respuestas óptimas y será decisión del diseñador quedarse con el control que más se acomode a sus necesidades.

## 1.8. Optimización de Sistemas Dinámicos en Tiempo Continuo

Un sistema dinámico en tiempo continuo es descrito mediante un *vector de estados*  $n$ -dimensional  $x(t)$  en el tiempo  $t$ . La elección de un *vector de control*  $m$ -dimensional  $u(t)$  determina la tasa de cambio del vector de los estados mediante la ecuación (1.6). El problema de optimización para este sistema consiste entonces en encontrar la trayectoria del vector de control  $u(t)$  para el intervalo  $t_0 \leq t \leq t_f$  para minimizar el índice de desempeño (1.7) [18].

### 1.8.1. Condiciones Necesarias para una Solución

Se añaden las restricciones (1.6) al funcional de desempeño (1.7) con un vector de multiplicadores de Lagrange variantes en el tiempo  $\Psi(t)$  con la finalidad de tener un nuevo vector de variables adjuntas para evaluar el sistema en las condiciones finales deseadas [20].

$$J = \phi(x(t_f)) + \int_{t_0}^{t_f} [L(x(t), u(t), t) - \Psi^T \{f(x(t), u(t), t) - \dot{x}\}] dt. \quad (1.8)$$

Después se define la función escalar Hamiltoniana  $H(x(t), u(t), \Psi(t), t)$  como

$$H(x(t), u(t), \Psi(t), t) = L(x(t), u(t), t) + \Psi^T(t) f(x(t), u(t), t). \quad (1.9)$$

Se integra por partes el término  $\Psi^T \dot{x}$  y se obtiene la siguiente expresión:

$$J = \phi(x(t_f)) - \Psi^T(t_f)x(t_f) + \Psi^T(t_0)x(t_0) + \int_{t_0}^{t_f} [H(x(t), u(t), \Psi(t), t) + \dot{\Psi}^T x(t)] dt. \quad (1.10)$$

Ahora, considérese una variación infinitesimal en  $u(t)$  denominada como  $\delta u(t)$ . Dicha variación produce una variación en la trayectoria de los estados  $\delta x(t)$  y una variación en la función de desempeño  $\delta J$ . Esta última variación puede ser calculada como sigue:

$$\delta J = \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} - \Psi^T \right) \delta x \right]_{t=t_f} + [\Psi^T \delta x]_{t=t_0} + \int_{t_0}^{t_f} \left[ \left( \frac{\partial H}{\partial x} - \Psi^T \right) \delta x + \frac{\partial H}{\partial u} \delta u \right] dx. \quad (1.11)$$

Para evitar tener que determinar las funciones  $\delta x(t)$  producidas por  $\delta u(t)$  se eligen los multiplicadores  $\Psi(t)$  de tal manera que los coeficientes de  $\delta x(t)$  y  $\delta x(t_f)$  en la ecuación (1.11) desaparezcan. Elijiendo entonces,

$$\dot{\Psi}^T = -\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{\partial L}{\partial x} - \Psi^T \frac{\partial f}{\partial x}, \quad (1.12)$$

con las condiciones de frontera,

$$\Psi^T(t_f) = \frac{\partial \phi}{\partial x}(t_f), \quad (1.13)$$

entonces, de la ecuación (1.11) se tiene que  $\delta J$  se transforma en:

$$\delta J = \Psi^T(t_0)\delta x(t_0) + \int_{t_0}^{t_f} \left[ \frac{\partial H}{\partial u} \delta u \right] dt \quad (1.14)$$

Si  $x(t_0)$  está especificada, entonces  $\delta x(t_0)$  lo está. Para una solución estacionaria se requiere  $\delta J = 0$  para una variación arbitraria  $\delta u(t)$ . Esto sucede solamente si se cumple la igualdad:

$$\frac{\partial H}{\partial u} = \frac{\partial L}{\partial u} + \Psi^T \frac{\partial f}{\partial u} = 0, \quad (1.15)$$

sobre  $t_0 \leq t \leq t_f$ . Esta ecuación es llamada la *condición estacionaria*.

Las ecuaciones para  $\dot{\Psi}^T$  (1.12),  $\Psi^T(t_f)$  (1.13) junto con la ecuación (1.15) son las ecuaciones de Euler-Lagrange del Cálculo de Variaciones [20].

Así entonces, para hallar la función vector de control  $u(t)$  que produce un valor estacionario de la función de desempeño  $J$  debe resolverse el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t), \\ \dot{\Psi}^T(t) = -\frac{\partial H^T}{\partial x}, \end{cases} \quad (1.16)$$

donde  $u(t)$  es determinado a partir de la condición estacionaria. Las condiciones de frontera para estas ecuaciones diferenciales están separadas, es decir, algunas están definidas en  $t = t_0$  y algunas en  $t = t_f$ . Luego entonces, son conocidas  $x(t_0)$  y  $\Psi(t_f)$ . Este es un *problema con valores en la frontera de dos puntos*. Nótese que las ecuaciones que describen a los estados  $x(t)$  y estados adjuntos  $\Psi(t)$  en la ecuación (1.16) están acopladas, dado que  $u(t)$  depende de  $\Psi(t)$  a través de la condición estacionaria y los estados adjuntos dependen de  $x(t)$  y  $u(t)$ .

Más adelante, en este documento y una vez obtenido el modelo dinámico conjunto microclima-cultivo, se utilizará el desarrollo anterior para sintetizar y obtener una ley de control óptimo que rijan el comportamiento de las variables de estado del sistema. Y posteriormente, dicha ley de control permitirá continuar con la implementación del sistema automático de control.

## Capítulo 2

# Modelo Dinámico del Cultivo de Jitomate y Modelo Dinámico del Microclima

### 2.1. Introducción

En este capítulo se desarrollan los modelos dinámicos del cultivo de jitomate y del microclima individualmente y se describen las variables de estado y parámetros involucrados en ambos modelos. Finalmente, se describe la representación general en espacio de estados del sistema conjunto microclima-cultivo y se explica de qué manera interactúan ambos sistemas entre sí.

Las ecuaciones que representan a los modelos dinámicos individualmente ya se han estudiado y obtenido con anterioridad en estudios referentes al control óptimo de microclimas [3]. El aporte de este trabajo de tesis consiste en integrar el modelo conjunto microclima-cultivo de tal forma que interactúen entre sí a través de las variables de estado, y a partir de este modelo obtener una ley de control óptimo sintetizando la teoría del control óptimo mostrada en el capítulo anterior.

### 2.2. Modelo Dinámico del Cultivo de Jitomate

El modelo en el espacio de estados del jitomate se formula a continuación de una manera genérica. Este es llamado modelo *hoja grande - fruto grande* porque no se hace diferencia entre el número de hojas y frutos.

El modelo describe la evolución de la biomasa de las hojas y de los frutos posteriores a que la planta ha comenzado a dar brotes (desde el primer fruto). Este modelo consta de tres estados principales relativos al cultivo, descritos a continuación [3].

- Balance de Biomasa de Nutrientes.

El balance de biomasa de nutrientes se refiere a la diferencia entre la cantidad de nutrientes que entran y salen de un sistema de cultivo. Esto permite estimar balances nutricionales

del cultivo a partir de los nutrientes extraídos del suelo por la planta para su desarrollo. La ecuación general que describe el balance de biomasa de nutrientes se expresa de la siguiente manera.

- Nutrientes:

$$\frac{dW_B}{dt} = P - G_V - \theta_V G_V - G_F - \theta_F G_F - R_{B,V} - R_{B,F}, \quad (2.1)$$

donde,

$P$  es la producción de nutrientes por fotosíntesis.

$G_V$  es la conversión de nutrientes a biomasa vegetal por crecimiento.

$\theta_V G_V$  es el uso de nutrientes como energía para propiciar el crecimiento vegetal.

$G_F$  es la conversión de nutrientes en frutos por crecimiento.

$\theta_F G_F$  es el uso de nutrientes como energía para propiciar el crecimiento del fruto.

$R_{B,V}$  es el consumo de nutrientes para el mantenimiento de las partes vegetales.

$R_{B,F}$  es el consumo de nutrientes para el mantenimiento de los frutos.

- Balance de Biomasa de Hojas.

Como consecuencia de la actividad fotosintética de los vegetales, se forma una masa viviente a la que se denomina biomasa. La biomasa de hojas se refiere a la cantidad de hojas que el cultivo desarrolla gracias al proceso de fotosíntesis dentro un clima favorable a lo largo de todo el crecimiento del cultivo. La ecuación que representa el balance general de biomasa de hojas en el cultivo de jitomate es la siguiente.

- Hojas:

$$\frac{dW_V}{dt} = G_V - R_{V,V} - H_L, \quad (2.2)$$

donde:

$G_V$  es la conversión de nutrientes a biomasa vegetal por crecimiento.

$R_{V,V}$  es el uso de la biomasa para mantenimiento cuando hay una carencia de nutrientes.

$H_L$  es la tasa de deshoje.

- Balance de Biomasa de Frutos.

De igual forma que en el caso de la biomasa de hojas, el balance de biomasa de frutos se refiere a la cantidad de frutos desarrollados por el cultivo a partir de la actividad fotosintética. La ecuación general de biomasa de frutos se expresa de la siguiente forma.

- Frutos:

$$\frac{dW_F}{dt} = G_F - R_{F,F} - H_F, \quad (2.3)$$

donde:

$G_F$  es la conversión de nutrientes a biomasa de frutos por crecimiento.

$R_{F,F}$  es el uso de la biomasa para mantenimiento cuando hay una carencia de nutrientes.

$H_F$  es la tasa de cosecha.

### 2.2.1. Balance de Biomasa de Nutrientes

Los nutrientes son producidos por la fotosíntesis. La tasa global de fotosíntesis en el follaje expresada en peso seco por unidad de área es  $P$ . De igual forma, los nutrientes son convertidos en hojas y frutos. Tanto hojas como frutos tienen una demanda de nutrientes, misma que será satisfecha si existe una cantidad de nutrientes suficiente. Además de las hojas, el crecimiento también se da en otras partes de la planta como el tallo y las raíces.

Se denota la demanda de crecimiento de hojas y frutos por unidad de área como  $G_L^{dem}$  y  $G_F^{dem}$  respectivamente, entonces la cantidad de nutrientes convertidos en masa estructural por crecimiento es:  $h \frac{G_L^{dem}}{z} + G_F^{dem}$ .

Donde  $h$  es un factor de cambio que depende de la cantidad de nutrientes disponibles para el cultivo y  $z$  es la representación de la parte vegetal del cultivo descrita más adelante en este capítulo.

Denotando como  $W_B$  el total de nutrientes en el follaje de la planta, expresado como peso seco por unidad de área, se tiene la siguiente ecuación de balance de masa:

$$\frac{dW_B}{dt} = P - h\{\cdot\} \left( \frac{(1+\theta_V)}{z} G_L^{dem} + (1 + \theta_F) G_F^{dem} \right) - h\{\cdot\} \left( \frac{R_L}{z} + R_F \right). \quad (2.4)$$

donde,

$\theta_V$  son los nutrientes requeridos por la parte vegetal.

$z$  es el modelo de la parte vegetal.

$\theta_F$  son los nutrientes requeridos para el crecimiento del fruto.

$G_L^{dem}$  y  $G_F^{dem}$  son las demandas de crecimiento de hojas y frutos respectivamente.

$R_F$  y  $R_L$  son las demandas de respiración de frutos y hojas respectivamente.

$h\{\cdot\}$  es un factor que depende de la cantidad de nutrientes disponibles.

#### 2.2.1.1 Tasa Global de Nutrientes Producidos por Fotosíntesis.

La fotosíntesis depende de la radiación activa fotosintética ( $PAR$ )( $I^{PAR}$ ) y de la concentración de  $CO_2$ . En plantas jóvenes la fotosíntesis es proporcional al área de hojas por unidad de área en el microclima. En etapas posteriores al desarrollo de la planta, la fotosíntesis es prácticamente independiente.

Se introduce el factor  $f_m\{\cdot\}$  como un *factor de madurez*. Este es cercano a cero cuando la planta es joven y se aproxima a uno cuando la planta ha madurado. El parámetro  $p_m$  es el peso seco de la hoja y  $m$  es un parámetro adimensional. En consecuencia el factor de madurez se expresa como sigue:

$$f_m = \frac{(W_L/p_m)^m}{1 + (W_L/p_m)^m} \quad (2.5)$$

donde,

$W_L$  ( $kg[dw]m^{-2}[gh]s^{-1}$ ), es la biomasa estructural de las hojas.

$p_m$  ( $kg[dw]m^{-2}[gh]s^{-1}$ ), es el peso seco de la hoja cuando  $f_m\{\cdot\} = 0,5$ .

$m$ , es un factor adimensional.

$f_m\{\cdot\} = 0$  cuando la planta es joven y  $f_m\{\cdot\} = 1$  cuando la planta ha madurado.

La tasa fotosintética está dada por  $P$ , el cual se refiere a la cantidad de nutrientes producidos por fotosíntesis, dicho elemento es de suma importancia, ya que, involucra la concentración de dióxido de carbono y al mismo tiempo éste se encuentra en el modelo dinámico del microclima que se describirá más adelante.

La expresión que describe a  $P$  es la siguiente:

$$P = P^{max} \left( \frac{I^{PAR}}{I^{PAR} + K_I} \right) \left( \frac{C_{CO_2}}{C_{CO_2} + K_C} \right) f_m\{\cdot\}. \quad (2.6)$$

Los términos de esta ecuación se explican a continuación.

$P^{max}$  ( $kg[dw]m^{-2}[gh]s^{-1}$ ) Es la tasa fotosintética máxima del follaje.

$I^{PAR} = f_{PAR/I} \tau_r I_o$  es la intensidad de luz a nivel de la cosecha (proporcional a la radiación global).

donde:

$f_{PAR/I}$  ( $Wm^{-2}[gh]$ ), es la fracción PAR de la radiación global.

$\tau_r$ , es la transmitancia del techo.

$I_o$  ( $Wm^{-2}[gh]$ ), es la radiación global proveniente del exterior.

$K_I$  ( $W[PAR]m^{-2}$ ) es la intensidad de luz PAR (Radiación Activa Fotosintética) a media saturación.

$K_C$  ( $W[CO_2]m^{-3}$ ) es la concentración de  $CO_2$  a media saturación.

$C_{CO_2}$  ( $kgm^{-3}$ ) es la concentración de  $CO_2$ .

### 2.2.1.2 Sustracción de Nutrientes para el Crecimiento de la Planta.

De la ecuación que describe el balance de biomasa de los nutrientes (2.4) se tiene la siguiente expresión que está relacionada con la sustracción de los nutrientes que la planta requiere para su crecimiento:

$$h\{\cdot\} \left( \frac{(1 + \theta_V)}{z} G_L^{dem} + (1 + \theta_F) G_F^{dem} \right) \quad (2.7)$$

Para la expresión anterior se da el significado de cada elemento.

$h\{\cdot\}$ , parámetro variable en función de la abundancia de nutrientes. Los valores que este parámetro puede tomar son dos:  $h\{\cdot\} = 0$ , cuando hay una carencia de nutrientes y  $h\{\cdot\} = 1$ , para abundancia de los mismos.

$1 + \theta_V$ , tasa de requerimiento de nutrientes de la parte vegetal, donde  $\theta_V$  es la cantidad de nutrientes requeridos por la parte vegetal para producir una unidad estructural.

$1 + \theta_F$ , tasa de requerimiento de nutrientes del fruto, donde  $\theta_F$  es la cantidad de nutrientes requeridos por los frutos para producir una unidad estructural.

Modelo de la parte vegetal:

$$z = \frac{W_L}{W_L + W_{stem} + W_{roots}} \quad (2.8)$$

donde:

$W_L$  ( $kg[dw]m^{-2}[gh]s^{-1}$ ), es el peso seco de las hojas.

$W_{stem}$  ( $kg[dw]m^{-2}[gh]s^{-1}$ ), es el peso seco de los tallos.

$W_{roots}$  ( $kg[dw]m^{-2}[gh]s^{-1}$ ), es el peso seco de las raíces.

### 2.2.1.3 Estado de Desarrollo

Se expresa con un factor adimensional  $f_D\{\cdot\}$  y es un factor de corrección de crecimiento dado por:

$$f_D = \frac{c_{f1} - c_{f2}D}{c_{f1} - c_{f2}} \quad (2.9)$$

Donde  $D$  es el estado de desarrollo para la planta,  $c_{f1}$  y  $c_{f2}$  son parámetros en función del desarrollo del cultivo. Note que  $f_D$  es igual a 1 si  $D = 1$ , el factor de corrección se mantiene cercano a 1, incluso para valores muy pequeños del estado de desarrollo.

El estado de desarrollo es una variable de estado artificial que mide el historial pasado de la temperatura desde la antitesis. Esto podría ser en principio usado para predecir el estado de los frutos.

#### 2.2.1.4 Demanda de Crecimiento

Para los siguientes dos términos, las demandas de crecimiento de las hojas y de los frutos, se asume que son proporcionales al total de la biomasa de la planta. Se toma en cuenta el hecho de que en las etapas tempranas del brote de frutos, la distribución del tamaño tiende hacia frutos pequeños y la tasa de crecimiento relativo comienza a crecer. Se asume también que el crecimiento de los frutos es dependiente de la temperatura, modelada con una relación de crecimiento de la función de temperatura representado como  $Q_{10G}$ . El mismo coeficiente de la tasa de crecimiento para los frutos se aplica en las hojas, con la excepción de que en el segundo caso este es modificado por un coeficiente dependiente de la temperatura que expresa por qué factor, la tasa de crecimiento específica de las hojas es mayor o menor que la tasa de crecimiento específica del fruto.

Esta relación tiene un papel importante en el control del crecimiento de cada una de estas partes de la planta respecto a la otra. La demanda de crecimiento de las hojas, incluyendo todas las partes vegetales se representa con la siguiente ecuación:

$$G_L^{dem} = f_{L/F}(T)k_{GF}^{ref}f_{TG}(T)f_D\{\cdot\}W_L \quad (2.10)$$

donde:

$f_{L/F}(T) = f_{L/F}^{ref}e^{v_2(T-T_{L/F}^{ref})}$ , es la tasa que expresa si el factor de crecimiento de las hojas es mayor o menor al de los frutos.

$f_{L/F}^{ref}$ , es una constante adimensional que expresa cuán grande es la demanda de crecimiento de las hojas comparada con la de los frutos a la temperatura pivotal.

$T_{L/F}^{ref}$ , es la temperatura pivotal.

$v_2$ , es un parámetro de particionamiento fruto-hoja.

$k_{GF}^{ref}$  ( $s^{-1}$ ), es el coeficiente de tasa de crecimiento del fruto a la temperatura de referencia.

$f_{TG}(T) = Q_{10G}^{\frac{T-T_G^{ref}}{10}}$ , es el factor utilizado para expresar el crecimiento de los frutos, es dependiente de la temperatura.

$T$  ( $^{\circ}C$ ), es la temperatura a nivel del cultivo.

$T_G^{ref}$  ( $^{\circ}C$ ), es la temperatura de referencia para crecimiento.

$W_L$  ( $kg[dw]m^{-2}[gh]s^{-1}$ ), es la biomasa estructural de las hojas.

De la misma forma se tiene una ecuación que representa la demanda de crecimiento de los frutos:

$$G_F^{dem} = k_{GF}^{ref}f_{TG}(T)f_D\{\cdot\}W_F \quad (2.11)$$

donde:

$k_{GF}^{ref}$  ( $s^{-1}$ ), es el coeficiente de tasa de crecimiento del fruto a la temperatura de referencia.

$f_{TG}(T) = Q_{10}^{\frac{T-T_G^{ref}}{10}}$ , es el factor utilizado para expresar que el crecimiento de los frutos es dependiente de la temperatura.

$T_G^{ref}$  ( $^{\circ}C$ ), es la temperatura de referencia para crecimiento.

$f_D\{\cdot\} = \frac{c_{f1}-c_{f2}D}{c_{f1}-c_{f2}}$ , es el factor de corrección en la tasa de crecimiento.  $D$  es la etapa de desarrollo de la planta y  $f_D = 1$  cuando  $D = 1$ , es decir la planta está madura.

$W_F$  ( $kg[dw]m^{-2}[gh]s^{-1}$ ), es la biomasa estructural del fruto.

### 2.2.1.5 Sustracción de Nutrientes para Respiración de la Planta.

La demanda de respiración de las hojas es modelada como una expresión simple de primer orden de la biomasa de hojas como se muestra a continuación:

$$R_L = k_{RL}^{ref} f_{TR}(T) W_L, \quad (2.12)$$

donde:

$k_{RL}^{ref}$  ( $s^{-1}$ ), es el coeficiente de tasa de respiración de las hojas a la temperatura de referencia.

$f_{TR}(T) = Q_{10}^{\frac{T-T_R^{ref}}{10}}$ , es la función de la temperatura modelada como una relación  $Q_{10}$ .

$T$  ( $^{\circ}C$ ), es la temperatura a nivel del cultivo.

$T_R^{ref}$  ( $^{\circ}C$ ), es la temperatura de referencia para respiración.

$W_L$ ; ( $kg[dw]m^{-2}[gh]s^{-1}$ ), es la biomasa estructural de las hojas.

La demanda de respiración de los frutos está dada por:

$$R_F = k_{RF}^{ref} f_{TR}(T) W_F, \quad (2.13)$$

donde:

$k_{RF}^{ref}$  ( $s^{-1}$ ), es el coeficiente de tasa de respiración del fruto a la temperatura de referencia.

$f_{TR}(T) = Q_{10}^{\frac{T-T_R^{ref}}{10}}$ , es la función de la temperatura modelada como una relación  $Q_{10}$ .

$T_R^{ref}$  ( $^{\circ}C$ ), es la temperatura de referencia para respiración.

$W_F$ , es la biomasa estructural del fruto.

### 2.2.2. Ecuación de Balance de Biomasa de Nutrientes

Haciendo uso de los términos descritos anteriormente, la ecuación de balance de biomasa de nutrientes (2.4) se puede reescribir de tal forma que toma dos valores dependiendo del parámetro de abundancia de nutrientes  $h\{\cdot\}$ :

$$\frac{dW_B}{dt} = \begin{cases} P - \frac{(1+\theta_V)}{z} G_L^{dem} - (1 + \theta_F) G_F^{dem} - \frac{R_L}{z} - R_F, & h\{\cdot\} = 1. \\ P, & h\{\cdot\} = 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

donde la primera expresión se toma cuando existe abundancia de nutriente y la segunda cuando hay escasez de nutrientes.

### 2.2.3. Balance de Biomasa de Hojas

El crecimiento de las hojas es igual a la cantidad de nutrientes convertida a biomasa estructural de hojas en el follaje de la planta y está dado por  $h\{\cdot\}G_L^{dem}$ . El modelo no incorpora un estado extra para tallo y raíces, pero por el factor  $z$  se asume que cada incremento en la biomasa de las hojas irá acompañada por un incremento proporcional en tallo y raíces. Si hay una carencia de nutrientes, el crecimiento se detiene, pero la respiración de mantenimiento se asume que continúa en todo momento. Normalmente los nutrientes se utilizan para el mantenimiento, pero en caso de escasez de estos, el mantenimiento en el modelo se emplea en las partes estructurales de la planta (hojas y frutos).

Así, el balance de biomasa de hojas por unidad de área será:

$$\frac{dW_L}{dt} = h\{\cdot\}G_L^{dem} - (1 - h\{\cdot\})R_L - H_L, \quad (2.15)$$

#### 2.2.3.1 Tasa de Deshoje

En la práctica, los cultivadores podan las hojas de los entrenudos inferiores de los frutos que serán recogidos porque ya están maduros. En un sentido estricto, la tasa de cosecha es una entrada controlable, es por sí misma un control que podría ser conocido. La tasa de deshoje natural de la planta está descrita por la siguiente ecuación:

$$H_L = k_{HL}W_L \quad (2.16)$$

donde:

$k_{HL} = c_{yL}k_H (s^{-1})$ , es el coeficiente variable en función de la etapa de desarrollo de la planta  $D$ .

$c_{yL}$ , es el parámetro de cosecha adimensional.

$k_H (s^{-1})$ , es la tasa de cosecha.

$W_L$  es el balance de biomasa de hojas.

#### 2.2.4. Ecuación de Balance de Biomasa de Hojas

Con los parámetros descritos anteriormnmete y dependiendo de la abundancia de nutrientes  $h\{\cdot\}$ , la ecuación (2.15), el balance de biomasa de las hojas puede tomar dos valores, el primero cuando hay abundancia de nutrientes y el segundo cuando no existe abundancia de nutrientes:

$$\frac{dW_L}{dt} = \begin{cases} G_L^{dem} - H_L, & \text{si } h\{\cdot\} = 1, \\ -R_L - H_L, & \text{si } h\{\cdot\} = 0. \end{cases} \quad (2.17)$$

#### 2.2.5. Balance de Biomasa de Frutos

De manera similar al caso de la biomasa de las hojas, el crecimiento de los frutos en la planta dado a partir de los nutrientes asimilados está dado por  $h\{\cdot\}G_F^{dem}$  de la siguiente manera:

$$\frac{dW_F}{dt} = h\{\cdot\}G_F^{dem} - (1 - h\{\cdot\})R_F - H_F, \quad (2.18)$$

##### 2.2.5.1 Tasa de Cosecha

La tasa de cosecha tiene un comportamiento similar a la tasa de deshoje, esta depende del parámetro de cosecha y de la etapa de desarrollo de la planta. A continuación se muestra la ecuación que describe la tasa de cosecha de la planta y la descripción de los términos que están involucrados.

$$H_F = k_{HF}W_F \quad (2.19)$$

donde:

$k_{HF} = c_{yF}k_H (s^{-1})$ , es el coeficiente variable en función de la etapa de desarrollo de la planta  $D$ .

$c_{yF}$ , es un parámetro de cosecha adimensional.

$k_H (s^{-1})$ , es la tasa de cosecha.

$W_F$  es el balance de biomasa de frutos.

#### 2.2.6. Ecuación de Balance de Biomasa de Frutos

Finalmente, la ecuación (2.18) del balance de biomasa de los frutos puede tomar dos valores distintos en función del valor del parámetro  $h\{\cdot\}$  de abundancia de nutrientes, el primer valor cuando hay abundancia de nutrientes y el segundo valor cuando hay escasez de nutrientes:

$$\frac{dW_F}{dt} = \begin{cases} G_F^{dem} - H_F, & \text{si } h\{\cdot\} = 1, \\ -R_F - H_F, & \text{si } h\{\cdot\} = 0. \end{cases} \quad (2.20)$$

## 2.3. Modelo Dinámico del Microclima

El modelo dinámico del microclima se basa en el balance de energía del dióxido de carbono al interior del microclima. El modelo se describe a continuación y se desarrolla con la finalidad de obtener una ley de control sobre el actuador en el sistema automático.

### 2.3.1. Balance de Energía del Dióxido de Carbono al Interior del Microclima

El balance de energía del dióxido de carbono dentro del invernadero, esta dado por la ecuación [3]:

$$\frac{V_g}{A_g} \frac{dC_{CO_2}}{dt} = -\eta_{CO_2/dw} P + \eta_{CO_2/dw} R - \varphi_{CO_2,g_o}^{vent} + u_{CO_2}, \quad (2.21)$$

A continuación se describe cada término.

$\frac{V_g}{A_g}$  es la razón de volumen del microclima por unidad de área del suelo del microclima.

$\eta_{CO_2/dw} P$  es la cantidad de dióxido de carbono tomado del aire del invernadero por la fotosíntesis de las plantas.

donde:

$\eta_{CO_2/dw}$  ( $kg[CO_2]kg^{-1}[dw]$ ), es la cantidad de dióxido de carbono necesario para formar una unidad de biomasa.

$P$  ( $kg[dw]m^{-2}[gh]s^{-1}$ ), es la tasa global de nutrientes producidos por fotosíntesis.

$\eta_{CO_2/dw} R$  es la cantidad de dióxido de carbono regresado al aire del invernadero por la respiración de las plantas.

donde:

$\eta_{CO_2/dw}$  ( $kg[CO_2]kg^{-1}[dw]$ ), es la cantidad de dióxido de carbono necesario para formar una unidad de biomasa.

$R = h\{\cdot\} \left( \frac{\theta_V}{z} G_L^{dem} + \theta_F G_F^{dem} \right) + \frac{R_L}{z} + R_F$  ( $kg[dw]m^{-2}[gh]s^{-1}$ ), es la cantidad total respirada por la planta por unidad de tiempo.

Los términos  $h\{\cdot\}, \theta_V, z, G_L^{dem}, \theta_F, G_F^{dem}, R_L$  se describieron anteriormente.

$\varphi_{CO_2,g_o}^{vent} = u_V (C_{CO_2} - C_{CO_2_o})$  es la pérdida de masa de dióxido de carbono por ventilación.

donde:

$u_V = \left( \frac{p_{V1} u_V^{A_{plsd}}}{1 + p_{V2} u_V^{A_{plsd}}} + p_{V3} + p_{V4} u_V^{A_{pwsd}} \right) v + p_{V5} (m^3[air]m^{-2}[gh]s^{-1})$ , es la tasa de flujo de ventilación volumétrica por unidad de área del invernadero.  $p_{Vj}, j = (1, 2, 3, 4, 5)$  son parámetros y  $v$  es la velocidad del viento.

Los coeficientes  $u_V^{A_{pwsd}}$  y  $u_V^{A_{plsd}}$  corresponden a la apertura de ventanas de cara al viento y a su lado opuesto correspondientemente. Dependiendo de la velocidad del viento pueden tomar valores entre cero y uno:  $0 \leq u_V^{A_{pwsd}} \leq 1$  y  $0 \leq u_V^{A_{plsd}} \leq 1$ .

$C_{CO_2}$  ( $kgm^{-3}$ ), es la concentración de dióxido de carbono al interior del invernadero.  
 $C_{CO_2,o}$  ( $kgm^{-3}$ ), es la concentración de dióxido de carbono al exterior del invernadero.

$u_{CO_2} = u_{CO_2}^{Vp} \varphi_{CO_2,in\_g}^{max}$  es el suministro de dióxido de carbono.

donde:

$u_{CO_2}^{Vp}$ , es la apertura de válvula de suministro.

$\varphi_{CO_2,in\_g}^{max}$  ( $kg[CO_2]m^{-2}[gh]s^{-1}$ ), es la máxima tasa de flujo de dióxido de carbono.

En este modelo descrito para el microclima, la posición de la válvula de suministro de dióxido de carbono se maneja como la entrada de control. Por ello, esta se refiere directamente al actuador presente de manera física en el microclima.

## 2.4. Representación General del Sistema Microclima-Cultivo en Espacio de Estados

La dinámica combinada del sistema del microclima y del cultivo puede ser representada por una descripción en espacio de estados (2.22).

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), d(t)), \\ y(t) = g(x(t), u(t), d(t)), \end{cases} \quad (2.22)$$

Donde  $x(t)$  es un vector  $n$ -dimensional de estados del sistema, como la concentración de dióxido de carbono al interior del microclima, el consumo de nutrientes, y el crecimiento de hojas y frutos,  $u(t)$  es la señal de control, que será la apertura y cierre del actuador,  $d(t)$  es un vector  $n$ -dimensional de perturbaciones externas como la radiación solar o la temperatura al exterior del invernadero y  $y(t)$  es un vector  $n$ -dimensional de salidas, por ejemplo, la temperatura del aire, la humedad relativa y el peso seco del cultivo.

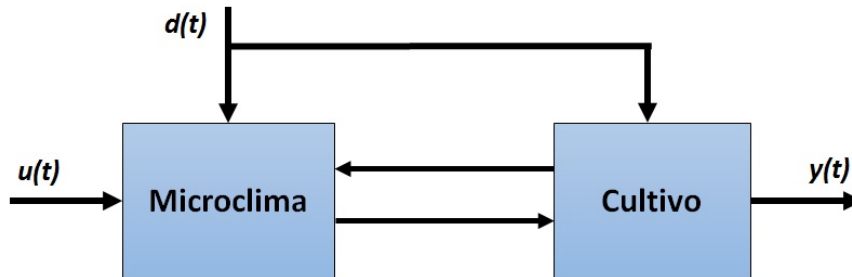


Figura 2.1: Flujo de información de entrada/salida en el modelo microclima cultivo.

El flujo de información entrada/salida es un sistema microclima-cultivo y puede ser representado como se muestra en la figura (2.1). Las variables de estado del cultivo y del microclima interactúan para formar un solo sistema. En esta figura se muestran las perturbaciones externas

que afectan a ambos sistemas y finalmente se tiene una salida  $y(t)$  que será la concentración de  $\text{CO}_2$  deseada al interior del microclima y requerida por el cultivo.

## 2.5. Modelo Integrado Microclima-Cultivo

Suponiendo que existe abundancia de nutrientes, esto quiere decir que, el parámetro  $h\{\cdot\}$ , descrito anteriormente, es igual a 1, el modelo dinámico del cultivo se puede representar con tres ecuaciones diferenciales (2.14), (2.17), (2.20). Para el modelo dinámico del microclima también se tiene una ecuación diferencial que representa su comportamiento (2.21). Las cuatro ecuaciones en conjunto representan al modelo microclima-cultivo (2.23) dado por:

$$\begin{cases} \dot{W}_L = G_L^{dem} - H_L, \\ \dot{W}_F = G_F^{dem} - H_F, \\ \dot{W}_B = P - \frac{1+\theta_v}{z} G_L^{dem} - (1 + \theta_F) G_F^{dem} - \frac{R_L}{z} - R_F, \\ \frac{V_g}{A_g} \dot{C}_{CO_2} = -\eta_{CO_2/dw} P + \eta_{CO_2/dw} R - \varphi_{CO_2,g-o}^{vent} + u_{CO_2} \end{cases} \quad (2.23)$$

En la representación anterior se puede observar que es posible hacer la integración del sistema, ya que existen variables que se comparten por ambos modelos.

El parámetro  $P$ , que es la producción de nutrientes por fotosíntesis se ve representado en la ecuación de balance de biomasa de nutrientes y en la ecuación del microclima; por otro lado, las ecuaciones de balance de biomasa de hojas y frutos se relacionan a través del parámetro  $R$ , que se encuentra en la ecuación del microclima, este parámetro describe la respiración total realizada por la planta e involucra a las variables de estado de biomasa de hojas y frutos como se puede verificar en el desarrollo de las secciones anteriores en este capítulo.

Más adelante, el sistema de ecuaciones presentado hace un momento, se usará para realizar la síntesis y análisis del control óptimo con la teoría que se desarrolló en el capítulo 1.

## Capítulo 3

# Síntesis del Control Óptimo y Simulaciones de la Ley de Control

### 3.1. Introducción

En este capítulo se realizará la síntesis del control óptimo sobre el modelo dinámico integrado que se obtuvo en el capítulo anterior.

La teoría del control óptimo se describió en el capítulo 1, ahora, a partir de ésta, se realizará la síntesis del control con la finalidad de obtener el comportamiento óptimo de las variables de estado que conforman el sistema microclima-cultivo.

La síntesis del control óptimo consiste en elegir un funcional de desempeño, y a partir de este formar un nuevo sistema de variables de estado adjuntas. De esta forma, se conoce el comportamiento del sistema con condiciones iniciales y finales. Para realizar todo el procedimiento anteriormente dicho, es necesario conocer los valores de los parámetros involucrados en el sistema microclima-cultivo, con la finalidad de que el sistema sea cercano a la realidad.

Una vez concluido el procedimiento de síntesis de control óptimo es posible realizar una simulación que permita modelar el comportamiento de las variables de estado que más interesan: consumo de nutrientes por el cultivo, masa seca de las hojas, masa seca de los frutos y concentración de dióxido de carbono al interior del invernadero. También se hace una caracterización de la señal de referencia del sistema de control que será el comportamiento óptimo de la concentración de  $\text{CO}_2$  al interior del microclima.

### 3.2. Síntesis del Control Óptimo

Una vez que se ha integrado el modelo microclima-cultivo (2.23), se realiza la sustitución de los valores en el sistema, los cuales fueron estudiados y analizados para que fueran cercanos a las condiciones climáticas en el estado de Puebla, esto permitirá que las simulaciones se acerquen lo más posible a la realidad. En la tabla (3.1), se recopilaron las funciones involucradas en el modelo integrado (2.23), dichas funciones se describieron con anterioridad en el capítulo 2 y los

valores de los parámetros se enlistan en la tabla (3.2).

Término	Descripción
$P = p^{max} \left( \frac{I^{PAR}}{I^{PAR} + K_I} \right) \left( \frac{C_{CO_2}}{C_{CO_2} + K_C} \right) f_m\{\cdot\}$	Tasa global de fotosíntesis en el follaje expresada en peso seco por unidad de área
$R = h\{\cdot\} \left( \frac{\theta_V}{z} G_L^{dem} + \theta_F G_F^{dem} \right) + \frac{R_L}{z} + R_F$	Cantidad respirada por la planta por unidad de tiempo.
$I^{PAR} = f_{PAR/I} \tau_r I_o$	Intensidad de luz a nivel de la cosecha
$f_m\{\cdot\} = \frac{(W_L/p_m)^m}{1 + (W_L/p_m)^m}$	Factor de madurez
$G_L^{dem} = f_{L/F}(T) k_{GF}^{ref} f_{TG}(T) f_D\{\cdot\} W_L$	Demanda del crecimiento de las hojas
$G_F^{dem} = k_{GF}^{ref} f_{TG}(T) f_D\{\cdot\} W_F$	Demanda del crecimiento del fruto
$f_{L/F}(T) = f_{L/F} e^{v_2(T - T_{L/F}^{ref})}$	Factor de crecimiento de las hojas con respecto a los frutos
$f_{TG}(T) = Q_{10}^{\frac{T - T_{10}^{ref}}{10}}$	Crecimiento de los frutos dependiente de la temperatura
$f_D\{\cdot\} = \frac{c_{f1} - c_{f2} D}{c_{f1} - c_{f2}}$	Factor de corrección en la tasa de crecimiento
$R_L = k_{RL}^{ref} f_{TR}(T) W_L$	Demanda de respiración de mantenimiento de las hojas
$R_F = k_{RF}^{ref} f_{TR}(T) W_F$	Demanda de respiración de mantenimiento del fruto
$f_{TR}(T) = Q_{10}^{\frac{T - T_{10}^{ref}}{10}}$	Función de temperatura
$k_{HL} = c_{yL} k_H$	Coefficiente variable en función de la etapa de desarrollo
$k_{HF} = c_{yF} k_H$	Coefficiente variable en función de la etapa de desarrollo
$H_L = k_{HL} W_L$	Tasa de deshoje natural de la planta
$H_F = k_{HF} W_F$	Tasa de la cosecha de la planta
$u_V = \left( \frac{p_{V1} u_V^{A_{plsd}}}{1 + p_{V2} u_V^{A_{plsd}}} + p_{V3} + p_{V4} u_V^{A_{pwsd}} \right) v + p_{V5}$	Tasa de flujo de ventilación

Tabla 3.1: Funciones de los modelos dinámicos del cultivo y del microclima.

A continuación se obtiene el sistema de ecuaciones diferenciales que representa al modelo integrado microclima-cultivo (3.1) con la sustitución de valores haciendo uso de las tablas mencionadas anteriormente.

$$\begin{cases} \dot{W}_L = 2,2996 \times 10^{-6} W_L, \\ \dot{W}_F = 4,3925 \times 10^{-6} W_F, \\ \dot{W}_B = P - 5,39 \times 10^{-6} W_L - 5,92 \times 10^{-6} W_F, \\ 3\dot{C}_{CO_2} = 1,0266(R - P) + 0,155 \times 10^{-10} u_V^{vp}, \end{cases} \quad (3.1)$$

Se debe recordar que el elemento  $P$  representa la cantidad de nutrientes producidos por fotosíntesis y  $R$  es la cantidad respirada por la planta por unidad de tiempo.

$$P = P^{max} \left( \frac{I^{PAR}}{I^{PAR} + K_I} \right) \left( \frac{C_{CO_2}}{C_{CO_2} + K_C} \right) f_m\{\cdot\} \quad (3.2)$$

$$R = h\{\cdot\} \left( \frac{\theta_V}{z} G_L^{dem} + \theta_F G_F^{dem} \right) + \frac{R_L}{z} + R_F \quad (3.3)$$

Haciendo uso de las tablas una vez más, es posible reescribir los términos  $P$  y  $R$ . Es importante destacar el hecho de que estos parámetros dependen de las variables de estado, por esta razón se tiene un sistema de cuatro ecuaciones diferenciales que están relacionadas entre sí.

$$P = \frac{3,7192 \times 10^{-11} W_L^{2,511}}{1,6353 \times 10^{-9} + 4,0439 \times 10^{-5} W_L^{2,511}} \quad (3.4)$$

$$R = 1,5942 \times 10^{-6} W_F + 0,4856 \times 10^{-6} W_L + 1,668 \times 10^{-7} \quad (3.5)$$

Variable	Valor	Descripción
$z$	0,6081	Fraccción de hojas del total de la masa vegetativa
$\theta_F$	0,2	Factor de asimilados para el incremento de frutos por unidad
$\theta_V$	0,23	Factor de asimilados para el incremento de la parte vegetal por unidad
$p_m$	$1,8 \times 10^{-2}$	Parámetro en el factor de maduración, [ $kg\ m^{-2}$ ]
$m$	2,511	Parámetro en el factor de maduración
$p^{max}$	$2,2 \times 10^{-6}$	Tasa de fotosíntesis de la cubierta bruta máxima, [ $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ ]
$K_1$	577	Constante Monod para PAR, [ $W\ m^{-2}$ ]
$K_c$	0.211	Constante Monod para $CO_2$ , [ $kg\ m^{-3}$ ]
$f_{PAR/I}$	0.475	Fracción PAR de radiación solar
$\tau_r$	0.7	Transmitancia de la cubierta
$k_{GF}^{ref}$	$3,8 \times 10^{-6}$	Coefficiente de referencia de la tasa de crecimiento de la fruta, [ $s^{-1}$ ]
$T_{GF}^{ref}$	20	Temperatura de referencia, [ $^{\circ}C$ ]
$Q_{10G}$	1.6	Parámetro de crecimiento de la función de temperatura
$f_{L/F}^{ref}$	1.38	Factor de referencia de la partición de hoja-fruta
$v_2$	-0.168	Parámetro de partición de fruta-hoja, [ $K^{-1}$ ]
$T_{L/F}^{ref}$	19	Temperatura de referencia de la partición fruta-hoja, [ $^{\circ}C$ ]
$k_{RL}^{ref}$	$2,9 \times 10^{-7}$	Coefficiente de respiración de mantenimiento de las hojas, [ $s^{-1}$ ]
$Q_{10R}$	2	Parámetro de respiración de la función de tempratura
$T_R^{ref}$	25	Temperatura de referencia para respiración, [ $^{\circ}C$ ]
$k_{RF}^{ref}$	$1,2 \times 10^{-7}$	Coefficiente de respiración de mantenimiento de hojas, [ $s^{-1}$ ]
$\eta$	0,7	Calor absorbido en relación a la energía total de la radiación neta recibida.
$\frac{V_g}{A_g}$	3	Razón del volumen del invernadero por unidad de área.
$c_{yL}$	0.4805	Parámetro de cosecha adimensional.
$c_{yF}$	1.636	Parámetro de cosecha adimensional.
$C_{CO_2-0}$	1.6637	Concentración de dióxido de carbono al exterior del invernadero.
$cd1$	$2,13 \times 10^{-7}$	Parámetro en función de la tasa de desarrollo.
$cd2$	$2,47 \times 10^{-7}$	Parámetro en función de la tasa de desarrollo.
$cd3$	20	Parámetro en función de la tasa de desarrollo.
$cd4$	$7,50 \times 10^{-11}$	Parámetro en función de la tasa de desarrollo.
$u_V^{Aplsd}$ y $u_V^{Apsd}$		Apertura de ventilas.
$p_{v1}$	$7,17 \times 10^{-5}$	Parámetro
$p_{v2}$	0,0156	Parámetro
$p_{v3}$	$2,71 \times 10^{-5}$	Parámetro
$p_{v4}$	$6,32 \times 10^{-5}$	Parámetro
$p_{v5}$	$7,40 \times 10^{-5}$	Parámetro

Tabla 3.2: Parámetros físicos.

### 3.2.1. Selección del Índice de Desempeño

Como se mencionó en el capítulo 1, el control óptimo se basa en la selección de un indicador de desempeño (1.7) que debe cumplir las condiciones de minimizar el consumo de energía por enriquecimiento de dióxido de carbono y maximizar la producción total del cultivo. Entonces, a partir de esta selección y del conocimiento del sistema (3.1) se considera el siguiente índice de desempeño:

$$J = \frac{1}{2} \left[ W_L^2(t_f) + W_F^2(t_f) + W_B^2(t_f) + C_{CO_2}^2(t_f) + \int_{t_0}^{t_f} [W_L^2 + W_F^2 + W_B^2 + C_{CO_2}^2 + (u_{CO_2}^{vp})^2] dt \right], \quad (3.6)$$

En la ecuación (3.6) el primer término involucra las variables en el momento final, que son relativas a la producción final, al consumo de nutrientes y a la concentración de CO<sub>2</sub>. La integral contiene la entrada de control y la condición inicial de las cuatro variables de estado.

El problema del control óptimo consiste en obtener una ley de control que provoque que el sistema siga una trayectoria admisible y que minimice o maximice el índice de desempeño (3.6) sujeto al sistema de ecuaciones (3.1).

### 3.2.2. Descripción del Método de Solución

La función escalar Hamiltoniana se define al considerar la relación (1.9) en concordancia con el índice de desempeño (3.6) y depende de las variables de estado, la entrada de control y un nuevo vector de multiplicadores de Lagrange o vector de variables adjuntas que depende del tiempo:  $\Psi(t) = (\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4)$ . La función  $H$  se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} H(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \Psi, t) &= \\ &= \frac{1}{2} [W_L^2(t) + W_F^2(t) + W_B^2(t) + C_{CO_2}^2(t) + (u_{CO_2}^{vp})^2(t)] + \\ &+ 2,2996 \times 10^{-6} W_L(t) \Psi_1(t) + 4,3925 \times 10^{-6} W_F(t) \Psi_2(t) + \\ &+ \left[ P - 5,39 \times 10^{-6} W_L(t) - 5,92 \times 10^{-6} W_F(t) \right] \Psi_3(t) + \\ &+ \frac{1}{3} \left[ 1,0266(R - P) + 0,1554 \times 10^{-10} u_{CO_2}^{vp} \right] \Psi_4(t). \end{aligned} \quad (3.7)$$

La función escalar Hamiltoniana permite obtener un nuevo sistema de ecuaciones diferenciales adjunto, formado por las variables adjuntas, el cual involucra las condiciones de frontera  $\Psi^T(t_f) = \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{x}}(t_f)$  usando la siguiente relación:

$$\dot{\Psi}^T = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}, \quad (3.8)$$

De esta forma, el sistema de variables de estado adjuntas queda expresado como sigue:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\Psi}_1 = W_L + 2,2996 \times 10^{-6} \Psi_1 + \frac{\partial P}{\partial W_L} \Psi_3 - \\ \quad - 5,39 \times 10^{-6} \Psi_3 + \frac{1}{3} \frac{\partial(R-P)}{\partial W_L} \Psi_4(1,0266) \\ \dot{\Psi}_2 = W_F + 4,3925 \times 10^{-6} \Psi_2 - \\ \quad - 5,92 \times 10^{-6} \Psi_3 + \frac{1}{3} \frac{\partial R}{\partial W_F} \Psi_4(1,0266), \\ \dot{\Psi}_3 = W_B, \\ \dot{\Psi}_4 = C_{CO_2}, \end{array} \right. \quad (3.9)$$

La condición estacionaria (3.10) estudiada en el capítulo 1, permite obtener una forma de control a partir de la función  $H$  como se muestra a continuación:

$$\frac{\partial H}{\partial u} = \frac{\partial L}{\partial u} + \Psi^T \frac{\partial f}{\partial u} = 0, \quad (3.10)$$

Es claro notar que la derivada parcial de la función Hamiltoniana con respecto a la señal de control ( $u(t)$ ) da como resultado la siguiente expresión:

$$u_{CO_2}^{v_p} = -\frac{1}{3} 0,1554 \times 10^{-10} \Psi_4(t). \quad (3.11)$$

El control depende de la cuarta variable de estado adjunta  $\Psi_4(t)$  en cada instante de tiempo, esto quiere decir que para conocer el comportamiento de la ley de control será necesario conocer el comportamiento de la cuarta variable adjunta. Esto se resolverá más adelante con el programa desarrollado en MatLab.

Con el procedimiento del control óptimo se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales de la forma (3.12), que representa las condiciones iniciales y finales del sistema. La forma general se muestra a continuación, donde el primer conjunto de ecuaciones diferenciales concierne a las variables de estado en condiciones iniciales y el segundo conjunto de ecuaciones a las variables adjuntas con condiciones finales.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t), \\ \dot{\Psi}(t) = -\frac{\partial H^T}{\partial x}, \end{array} \right. \quad (3.12)$$

A partir de la síntesis del control óptimo se obtienen los dos sistemas de ecuaciones diferenciales que componen al sistema general (3.12). El primero es el sistema (3.1), que representa el comportamiento de las variables de estado con condiciones iniciales y el segundo sistema (3.9) contiene el comportamiento de las variables adjuntas en condiciones finales  $t = t_f$ .

Note que ambos sistemas están acoplados, dado que la señal de control  $u(t)$  depende de  $\Psi(t)$  a través de la condición de solución y los estados adjuntos dependen de  $x(t)$  y  $u(t)$ . La representación del sistema completo es:

$$\begin{cases} \dot{W}_L = 2,2996 \times 10^{-6} W_L, \\ \dot{W}_F = 4,3925 \times 10^{-6} W_F, \\ \dot{W}_B = P - 5,39 \times 10^{-6} W_L - 5,92 \times 10^{-6} W_F, \\ 3\dot{C}_{CO_2} = 1,0266(R - P) + 0,155 \times 10^{-10} u_{CO_2}^{vp}, \\ \dot{\Psi}_1 = W_L + 2,2996 \times 10^{-6} \Psi_1 + \frac{\partial P}{\partial W_L} \Psi_3 - 5,39 \times 10^{-6} \Psi_3 + \frac{1}{3} \frac{\partial(R-P)}{\partial W_L} \Psi_4(1,0266) \\ \dot{\Psi}_2 = W_F + 4,3925 \times 10^{-6} \Psi_2 - 5,92 \times 10^{-6} \Psi_3 + \frac{1}{3} \frac{\partial R}{\partial W_F} \Psi_4(1,0266), \\ \dot{\Psi}_3 = W_B, \\ \dot{\Psi}_4 = C_{CO_2}, \end{cases} \quad (3.13)$$

A continuación será necesario resolver el sistema (3.13), esto permitirá conocer el comportamiento de las variables que más interesan: el peso seco de las hojas y frutos, cantidad de nutrientes consumidos, concentración de dióxido de carbono y el comportamiento de la cuarta variable adjunta  $\Psi_4$ , ya que de este depende la forma de control.

Para resolver el conjunto de ecuaciones como un sistema con condiciones iniciales, las ecuaciones de las variables adjuntas se consideran en el tiempo inverso, posteriormente, el comportamiento de dichas variables adjuntas se vuelven al tiempo directo, este procedimiento lo hace por sí solo el programa en MatLab.

### 3.3. Simulación del Comportamiento de las Variables de Estado Bajo la Ley de Control

Haciendo uso del software MatLab se elaboró un programa que resuelva el sistema (3.13). Las simulaciones se realizaron con diferentes entradas de control con la finalidad de comparar la respuesta del sistema con la entrada de control sintetizada anteriormente. El periodo de simulación es de dos semanas.

#### 3.3.1. Análisis Ante una Entrada Escalón

El primer resultado obtenido es la respuesta del sistema (3.13) ante una entrada de control escalón unitario, con condiciones iniciales especificadas.

Los resultados de esta simulación se muestran en la figura (3.1), donde es posible verificar que el comportamiento de las variables relacionadas al cultivo es coherente, ya que se distingue un crecimiento tanto en hojas como en frutos y se observa también un decremento en la cantidad de nutrientes, este decremento significa que la planta está consumiendo nutrientes a lo largo de su desarrollo. Por otro lado, el comportamiento de la cuarta variable de estado, la concentración de dióxido de carbono, también tiene un comportamiento coherente ya que se observa que al tener crecimiento de la planta existe un mayor consumo de  $CO_2$ , pero es importante destacar que este consumo es demasiado alto, y se debe recordar que uno de los objetivos de este trabajo es minimizar el gasto por consumo de energía manteniendo una cantidad mínima de  $CO_2$  necesaria

por el cultivo y que se resume a tener una concentración de dióxido de carbono que propicie un clima sano para el cultivo.

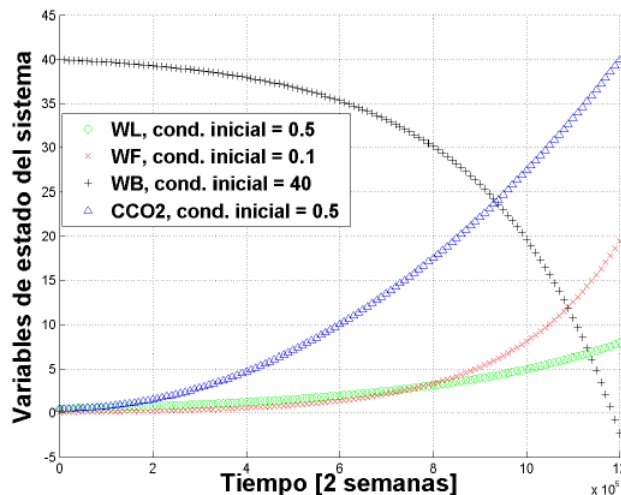


Figura 3.1: Comportamiento de la masa seca de los frutos (x, rojo), la masa seca de las hojas (o, verde), los nutrientes (+, negro) y la concentración de dióxido de carbono ( $\Delta$ , azul) ante una entrada escalón unitario.

### 3.3.2. Análisis Ante la Entrada de Control Sintetizado

En la siguiente simulación en MatLab se introdujo la forma de control (3.11) deducida en este trabajo. Los resultados se observan en la figura (3.2).

Al hacer la comparación con los resultados de la figura (3.1) se puede notar que el comportamiento de las hojas, de los frutos y de los nutrientes es similar en ambos casos, pero destaca el hecho de que el consumo de dióxido de carbono se redujo significativamente cuando se simuló el control deducido en este trabajo.

El resultado permite concluir que el control obtenido a partir de la teoría de control óptimo cumple con el objetivo de reducir la concentración de CO<sub>2</sub>, y de esta forma reducir gastos por consumo de energía por enriquecimiento de CO<sub>2</sub>.

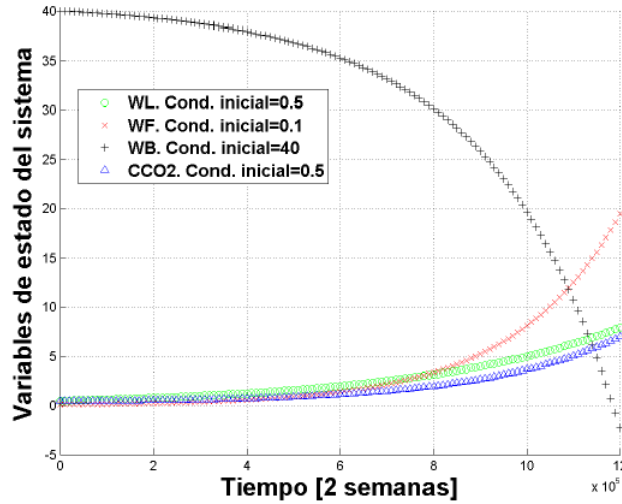


Figura 3.2: Comportamiento de la masa seca de los frutos (x, rojo), la masa seca de las hojas (o, verde), los nutrientes (+, negro) y la concentración de dióxido de carbono ( $\Delta$ , azul) durante dos semanas, con la entrada de control  $u_{CO_2}^{vp}$ .

### 3.3.3. Análisis de la Cuarta Variable Adjunta

Como se mencionó anteriormente, la forma de control deducida (3.11), depende de la cuarta variable adjunta  $\Psi_4$ , esto quiere decir que la forma del control dependerá de cómo se comporte la variable adjunta. Por esta razón se resolvió el sistema y se simuló el comportamiento de dicha variable, el resultado se muestra en la figura (3.3). Recuerde que el sistema de variables adjuntas se resuelve en tiempo inverso, y después el resultado se vuelve al tiempo directo.

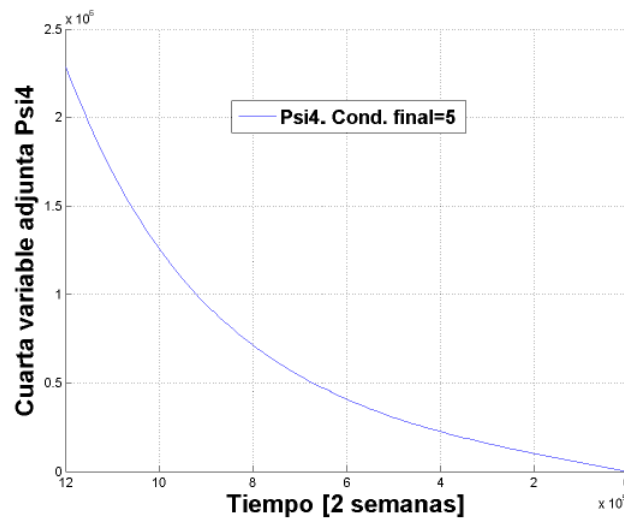
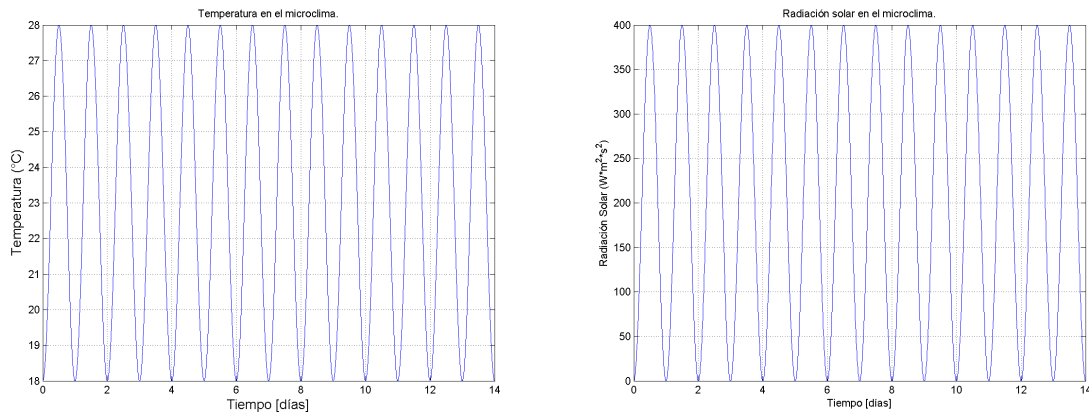


Figura 3.3: Comportamiento de la cuarta variable adjunta  $\Psi_4$  durante dos semanas.

### 3.3.4. Temperatura y Radiación Solar Variables

En las simulaciones anteriores se tomó en cuenta un modelo con temperatura y radiación solar constantes. Se sabe que esto en la realidad no es posible, ya que son fenómenos atmosféricos que dependen de la hora del día o la época del año. Por esta razón fue necesario caracterizar una función que dependiera del tiempo y que se acercara al comportamiento que tienen la temperatura y la radiación solar, esto quiere decir que, las funciones deberán cambiar conforme cambia la hora del día; a medio día habrá mayor temperatura y mayor radiación solar que en la noche.

Tanto la temperatura como la radiación solar son funciones que dependen del tiempo, ambas funciones se simularon para un periodo de dos semanas para que coincidieran con las simulaciones realizadas anteriormente. En la figura (3.4(a)) se muestra el comportamiento de la temperatura al interior del microclima y la figura (3.4(b)) ilustra el comportamiento de la radiación solar en el microclima.



(a) Temperatura variable al interior del microclima de la forma  $T = 23 + 5 * -\cos(t * 2 * \pi)$ . (b) Radiación Solar en el microclima de la forma  $Rad = Solar : 200 + 200 * -\cos(t * 2 * \pi)$ .

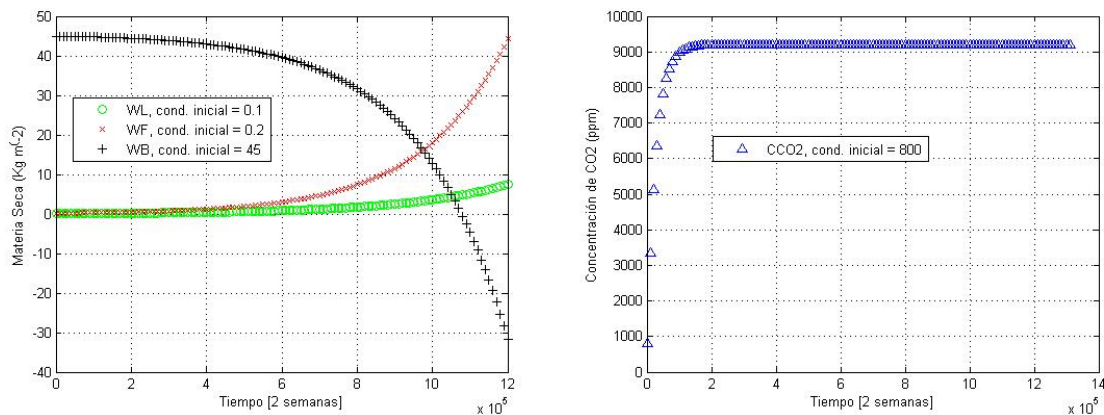
Figura 3.4: Comportamiento de la temperatura y la radiación solar en el microclima durante dos semanas.

#### 3.3.4.1 Análisis Ante una Entrada Escalón

Una vez conocidas las expresiones matemáticas que representan a la temperatura y la radiación solar, se sustituyeron en el programa original y se obtuvieron nuevos resultados. La primera simulación se hizo con una entrada de control escalón unitario. El primer resultado se muestra en la figura (3.5(a)), después se muestra el comportamiento de la concentración de dióxido de carbono en la figura (3.5(b)).

Note que el comportamiento de las variables referentes al cultivo cambiaron al tomar en cuenta la radiación solar y la temperatura variable. El peso seco de los frutos aumentó considerablemente y el peso seco de las hojas también tuvo un incremento respecto a los resultados presentados en la sección anterior, pero se observa un mayor consumo de nutrientes. Por otro lado, el comportamiento de la concentración de CO<sub>2</sub> no es el esperado, ya que la gráfica crece

considerablemente, y esto significa que se tiene mucho consumo de energía por enriquecimiento de CO<sub>2</sub>, además de que resulta una cantidad de CO<sub>2</sub> peligrosa tanto para el cultivo como para el agricultor.



(a) Variables de estado del cultivo ante una entrada (b) Variable de estado del microclima ante una entrada  
 escalón con temperatura y radiación solar variables. escalón con temperatura y radiación solar variables.

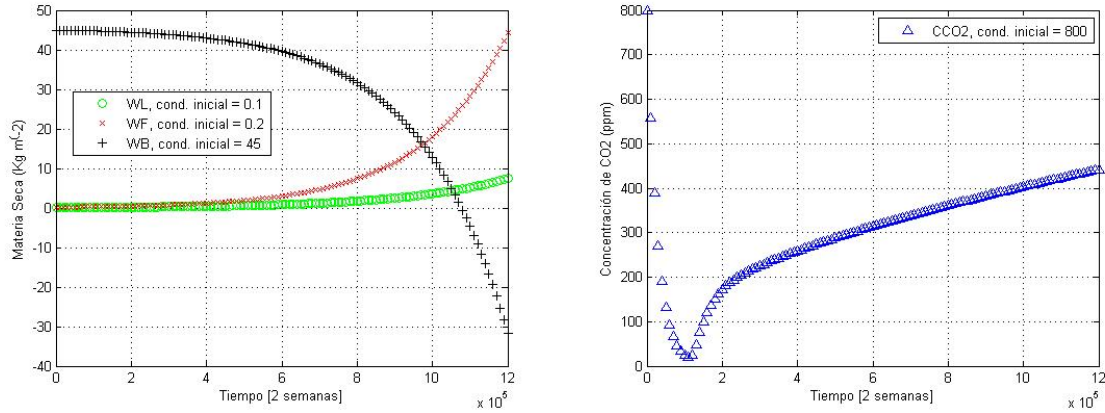
Figura 3.5: Variables de estado del sistema ante una entrada escalón unitario con temperatura y radiación solar variables.

### 3.3.4.2 Análisis Ante la Entrada de Control Sintetizado

Ahora se explicarán los resultados obtenidos de la simulación con la ley de control obtenida en este trabajo. Es importante destacar que al hacer esta simulación ya se ha sustituido la forma de la temperatura y radiación solar variables, también se recuerda que la forma de control (3.11) no cambia en lo absoluto para esta simulación, lo que significa que sigue dependiendo de la cuarta variable adjunta  $\Psi_4$ , y más adelante se mostrará que el comportamiento de dicha variable sí cambió al cambiar la temperatura y la radiación solar.

En la figura (3.6(a)) se observan las tres variables de estado relacionadas al cultivo y su comportamiento durante dos semanas, es claro notar que el crecimiento de frutos y hojas y el consumo de nutrientes se comportan como en el caso anterior.

Por otro lado, en la figura (3.6(b)) se observa un cambio en el comportamiento del CO<sub>2</sub> obtenido en la simulación anterior, en este caso se puede notar que el sistema cumple con la condición inicial establecida en el programa pero después reduce la concentración de dióxido de carbono y lo lleva cercano a la condición final que se indicó para la solución del sistema en el programa.



(a) Variables de estado del cultivo ante la entrada de control sintetizado con temperatura y radiación solar variables. (b) Variable de estado del microclima ante la entrada de control sintetizado con temperatura y radiación solar variables.

Figura 3.6: Variables de estado del sistema ante la entrada de control deducido con temperatura y radiación solar variables.

### 3.3.4.3 Análisis de la Cuarta Variable Adjunta

Como se mencionó anteriormente, la forma de control no cambió al modificar la temperatura y la radiación solar, pero esto no quiere decir que el comportamiento de la variable  $\Psi_4$  se haya mantenido igual. Por tal motivo es necesario conocer el comportamiento de esta variable, ya que, la forma de control depende de  $\Psi_4$  en cada instante de tiempo.

En la figura (3.7) se muestra el resultado de la simulación para la variable  $\Psi_4$ . El resultado ya se muestra en tiempo directo después de haber resuelto en tiempo inverso.

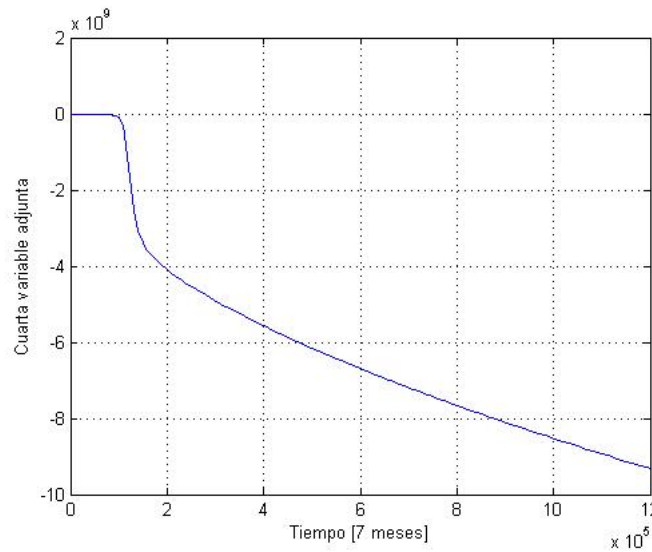


Figura 3.7: Comportamiento de la cuarta variable adjunta  $\Psi_4$  ante la entrada de control sintetizado con temperatura y radiación solar variables.

### 3.4. Caracterización de la Señal de Referencia

El resultado mostrado en la figura (3.6(b)) es el comportamiento óptimo de la concentración de dióxido de carbono al interior del microclima. Esto se sabe, ya que, fue el resultado de resolver el sistema conjunto microclima-cultivo usando la ley de control óptimo sintetizada.

A partir de este momento, se le llamará a la figura (3.6(b)) la *señal se referencia del sistema de control automático para la concentración de dióxido de carbono*. Es decir, el comportamiento óptimo de CO<sub>2</sub> obtenido analíticamente será la señal que debe seguir el sistema de control automático.

Para fines de aplicación y programación, es necesario conocer una expresión matemática que tenga el mismo comportamiento que la señal de referencia, y deberá ser una expresión que dependa del tiempo. Haciendo uso de las herramientas de MatLab fue posible hacer un ajuste de curvas por polinomios.

El ajuste de curvas consiste en encontrar una curva que contenga una serie de puntos y que posiblemente cumpla una serie de restricciones adicionales. MatLab permite introducir la serie de puntos que se quieren ajustar y proporciona una expresión matemática que depende del tiempo con el mismo comportamiento que la señal de referencia.

En la figura (3.8) se observa la interfaz que MatLab muestra para comparar los diferente ajustes de curvas que se podrían tener con diferentes grados de polinomios.

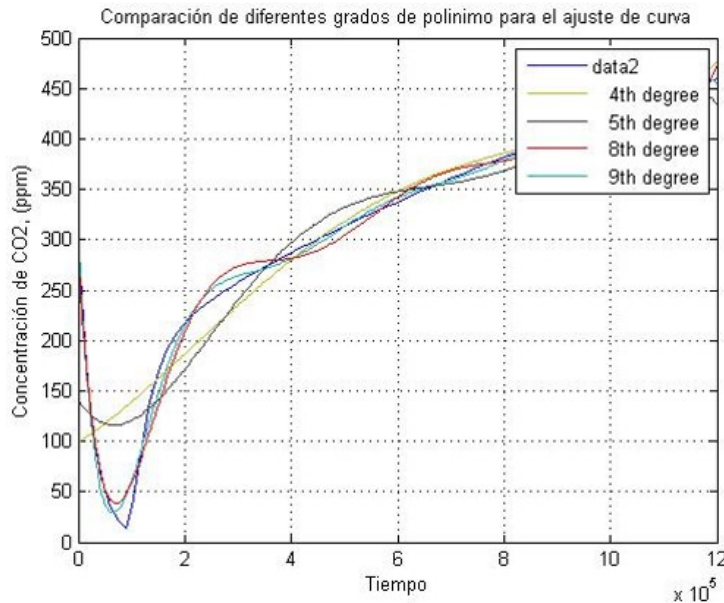


Figura 3.8: Pruebas de ajuste de curva con diferentes grados de polinomio.

Finalmente se elige el polinomio que mejor hace el ajuste con la señal de referencia, en

este caso fue el polinomio de grado nueve, y a continuación MatLab proporciona la expresión matemática que describe el ajuste:

$$C_{CO_2}^{ref} = -25,776z^9 + 39,134z^8 + 116,96z^7 - 176,26z^6 - 148,88z^5 + 218,42z^4 + 63,944z^3 - 90,64z^2 + 77,471z + 342,05 \quad (3.14)$$

Donde  $z = (t - 6 \times 10^5) / 3,529 \times 10^5$  y  $t$  es el tiempo del cultivo, en este caso, para la simulación el tiempo es de dos semanas,  $t = 2$  semanas.

Posteriormente, se realizó un programa en MatLab para comparar y verificar que el polinomio seleccionado es verdaderamente el que más se acerca al comportamiento óptimo del dióxido de carbono al interior del microclima.

En la figura (3.9) se observa la señal original en color azul ( $\square$ ) y el ajuste de curva por polinomio de grado nueve en color rojo (+). Es notorio que el comportamiento es muy parecido y para fines de aplicación será suficiente esta expresión.

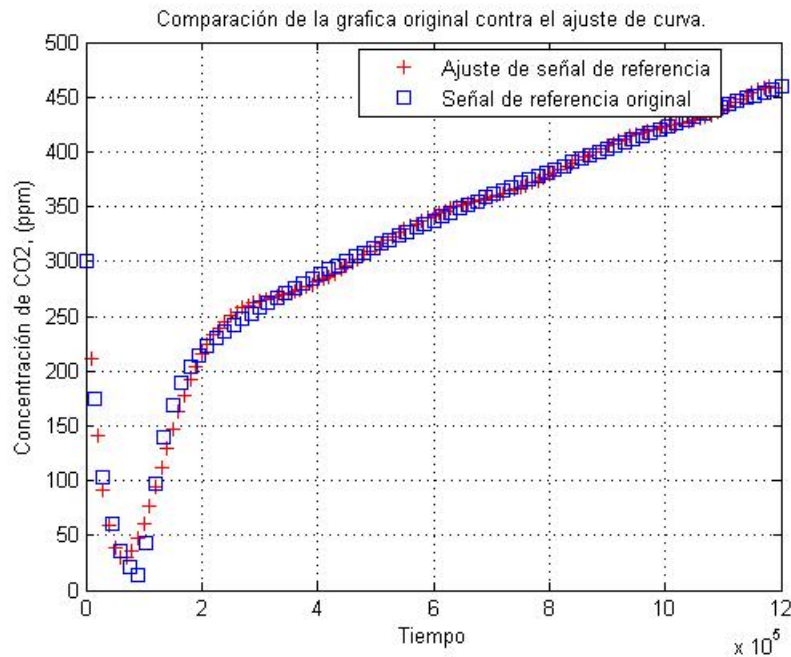


Figura 3.9: Comparación de la señal de referencia con el ajuste de curva por polinomio.

### 3.4.1. Señal de Referencia en Diagrama a Bloques

Una vez que se caracterizó la señal de referencia se confirma que es posible conocer una expresión matemática que depende del tiempo y que representa el comportamiento óptimo de la variable que se desea controlar en el sistema electrónico.

Para comprobar que el control clásico que se sintonizará en el próximo capítulo funciona adecuadamente se requerirá hacer simulaciones en Simulink a partir del diagrama a bloques que representa el sistema de control. Por esta razón, en esta sección se obtiene el comportamiento de la señal de referencia en diagrama a bloques para usar después este resultado en la simulación del control.

En la figura (3.10) se muestra el diagrama a bloques para obtener la señal de referencia a partir de un bloque de función en Simulink. En la figura (3.11) se observa la gráfica que resulta de dicho procedimiento, en la que es claro notar que el comportamiento es igual a la señal de referencia caracterizada anteriormente.



Figura 3.10: Diagrama a bloques para obtener la señal de referencia en Simulink.

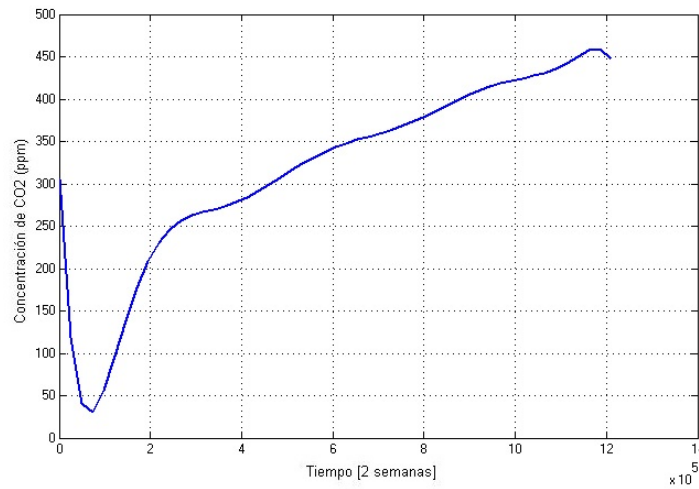


Figura 3.11: Señal de referencia del sistema en diagrama a bloques.

## Capítulo 4

# Sistema de Control para Regular la Concentración de Dióxido de Carbono

### 4.1. Introducción

En este capítulo se desarrollará el modelo matemático del sistema de presión neumático, que consiste en el tanque de almacenamiento de dióxido de carbono conectado a una tubería con una válvula reguladora de flujo. Es necesario conocer dicho modelo, ya que, el control se aplicará sobre la válvula para que regule el flujo de dióxido de carbono y así se obtenga la concentración de  $\text{CO}_2$  deseada al interior del microclima.

En este capítulo se obtiene una función de transferencia que representa el comportamiento de la cantidad de  $\text{CO}_2$  que es suministrada del tanque de almacenamiento y la cantidad que sale de la válvula para alimentar al microclima. En la primera parte se da una descripción breve de los sistemas de presión en general, posteriormente se describe cómo obtener el modelo matemático general de los sistemas de presión que consisten en un tanque, tubería y un elemento de resistencia (válvula). También se describen y desarrollan los conceptos de resistencia y capacitancia neumática y, finalmente, se obtiene la función de transferencia del sistema en particular que se encargará del enriquecimiento de dióxido de carbono para el microclima de jitomate. En la figura (4.1) se muestra la parte del sistema que se estudiará en este capítulo.

También, en este capítulo se realiza el análisis del sistema obtenido, esto se hace en Simulink y permite caracterizar al sistema para, después, obtener la sintonización de un control clásico de tipo PI, para esto se usaron dos métodos de sintonización y se hizo una comparación para seleccionar el que mejor resultados proporciona. Usando las herramientas de Simulink se realizaron simulaciones que permitieron observar el comportamiento del sistema con el control PI sintonizado.

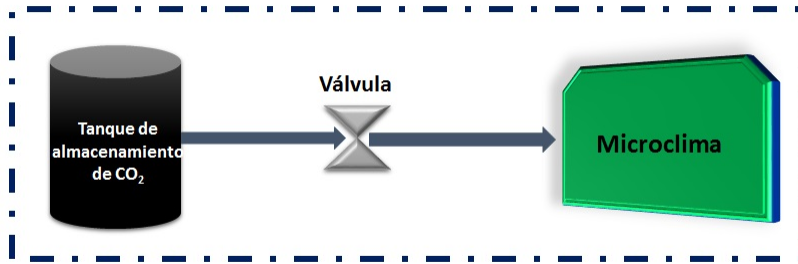


Figura 4.1: Representación del sistema neumático dentro del sistema de control automático.

## 4.2. Sistemas de Presión Neumáticos

En el campo de la ingeniería, el término *neumática* describe sistemas de fluidos que usan aire o gases. Los sistemas neumáticos se usan mucho en la automatización de procesos y en el campo de los controladores automáticos.

Los procesos industriales que contienen controladores neumáticos incluyen el flujo de un gas almacenado en recipientes a presión conectados a través de tuberías. La neumática trata de la generación y transformación de movimientos mediante el aire como fuente de energía; aplica también al conjunto de aparatos destinados a operar con aire. Actualmente existe un gran desarrollo en los controladores automáticos para su aplicación en procesos industriales, el motivo de esto es que resultan sistemas sencillos, presentan grandes ventajas en cuanto a seguridad, son de bajo costo y es fácil darles mantenimiento.

El sistema neumático que se usa para el caso de los microclimas se conforma del tanque donde estará el suministro de dióxido de carbono y de la válvula reguladora, por esta razón es necesario abordar las definiciones de resistencia y capacitancia de los sistemas de presión.

En la figura (4.2) se muestra un tanque de almacenamiento conectado a una tubería con una resistencia. El flujo del gas a través de la restricción es una función de la diferencia de presión del gas ( $p_i - p_o$ ). Tal sistema de presión se caracteriza en términos de una resistencia y una capacitancia [17].

La resistencia al flujo de aire en tubos, orificios, válvulas y cualesquiera otros dispositivos restrictores de flujo pueden definirse como el cambio en la presión diferencial necesaria para hacer un cambio unitario en la razón de flujo de masa. La resistencia del flujo de gas  $R$  se define del modo siguiente:

$$R = \frac{\text{Cambio en la diferencia de presión del gas}}{\text{Cambio en el flujo del gas}}$$

o bien

$$R = \frac{d(\Delta P)}{dq} \quad (4.1)$$

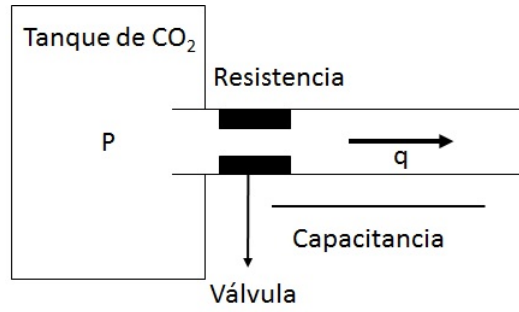


Figura 4.2: Sistema de presión.

Donde  $d(\Delta P)$  es un cambio pequeño en la diferencia de presión del gas y  $dq$  es un cambio pequeño en el flujo del gas.

Por otro lado, la capacitancia del recipiente a presión se define mediante:

$$C = \frac{\text{cambio en el gas almacenado}}{\text{cambio en la presión del gas}}$$

o bien

$$C = \frac{dm}{dp} = V \frac{d\rho}{dp} \quad (4.2)$$

en donde:

$C$  = capacitancia,  $lb\text{pies}^2/lb$

$m$  = masa del gas en el recipiente,  $lb$

$p$  = presión del gas,  $lb/pie^2$

$V$  = volumen del recipiente  $pie^3$

$\rho$  = densidad,  $lb/pie^3$

### 4.3. Modelo Matemático de los Sistemas de Presión

Se considera el sistema de la figura (4.2) y se suponen desviaciones pequeñas en las variables a partir de sus valores en estado estable respectivos, el sistema se considera lineal.

Se definen los siguientes términos:

$\bar{P}$  = presión del gas en el recipiente en estado estable (antes de que ocurran cambios en la presión),  $lb/pie^2$

$p_i$  = cambio pequeño en la presión del gas que entra,  $lb/pie^2$

$p_o$  = cambio pequeño en la presión del gas en el recipiente,  $lb/pie^2$

$V$  = volumen del recipiente,  $pie^3$

$m$  = masa del gas en el recipiente,  $lb$

$q$  = flujo del gas,  $lb/seg$   
 $\rho$  = densidad del gas,  $lb/pie^3$

Para valores pequeños de  $p_i$  y  $p_o$ , la resistencia  $R$  obtenida mediante la ecuación (4.1) se vuelve constante y se escribe como:

$$R = \frac{p_i - p_o}{q} \quad (4.3)$$

La capacitancia se obtiene a partir de (4.2). Dado que el cambio de presión  $dp_o$  multiplicado por la capacitancia  $C$  es igual al gas añadido al recipiente durante  $dt$  segundos, se obtiene:

$$Cdp_o = qdt \quad (4.4)$$

o bien,

$$Cdp_o = \frac{p_i - p_o}{R} dt \quad (4.5)$$

Lo cual se puede escribir como:

$$RC \frac{dp_o}{dt} + p_o = p_i \quad (4.6)$$

Si  $p_i$  y  $p_o$  se consideran la entrada y la salida, respectivamnete, se obtiene la función de transferencia del sistema:

$$\frac{P_o(s)}{P_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (4.7)$$

## 4.4. Resistencia Neumática

Para conocer la resistencia que un fluido gaseoso tiene al viajar a través de una tubería es necesario conocer el tipo de flujo que tiene el fluido. Para esto, se hace uso de la ley de Poiseuille.

### 4.4.1. Ley de Poiseuille

La ley de Poiseuille se vincula con el caudal de fluido que circula por un conducto. El caudal es el volumen por unidad de tiempo y depende de la diferencia de presiones a la entrada y a la salida del conducto, de las dimensiones del tubo y de la viscosidad del fluido. La ley de Poiseuille permite determinar el flujo laminar de un fluido a través de un tubo cilíndrico de sección circular constante [21].

El caudal de volumen está dado por la resistencia viscosa, esto solo aplica para flujo laminar. El flujo laminar depende del número de Reynolds del fluido, si es un número pequeño de Reynolds se considera un flujo laminar, y si el número es alto se considera un flujo turbulento.

El número de Reynolds  $Re$  depende de la densidad del fluido, la viscosidad, y el diámetro de la tubería [21]. En este caso particular se considera que el flujo es laminar, ya que el dióxido de

crabono no estará expuesto a turbulencias y sólo habrá cambios pequeños en la presión del gas. Por tal motivo, para calcular la resistencia neumática se hará uso de la fórmula de Poiseuille que se escribe a continuación:

$$Tasa \ de \ volumen = F = \frac{P_1 - P_2}{R} = \frac{\Delta P \pi r^4}{8\eta L} \quad (4.8)$$

Donde:

$\Delta P$  es la diferencia de presión.

$\eta$  es la viscosidad del gas,  $N/m^2$ .

$r$  es el radio interior de la tubería expresado en metros.

$L$  es la longitud de la tubería expresada en metros.

La fórmula dice que la resistencia depende linealmente de la viscosidad y la longitud de la tubería, de esta forma se puede escribir la resistencia neumática como sigue:

$$R = \frac{8\eta L}{\pi r^4} \quad (4.9)$$

En la tabla (4.1) se muestran los valores usados para calcular la resistencia neumática del sistema con el que se está trabajando mostrado en la figura (4.2). Es importante recordar que el objetivo de este trabajo de tesis es el diseño y la implementación de un prototipo para el control de CO<sub>2</sub> en microclimas, por tal motivo los valores de diseño que se eligieron para el cálculo de la resistencia neumática son para un sistema a escala, pero más adelante para fines reales se podrán cambiar estos valores y sustituirse por otros valores.

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
$\eta$ - Viscosidad del CO <sub>2</sub>	$1,3711e^{-5}$	$N/m^2$
$r$ - Radio de la tubería	0.0127	$m$
$L$ - Longitud de la tubería	1	$m$

Tabla 4.1: Valores para calcular la resistencia neumática del sistema.

Al hacer la sustitución de los valores en la ecuación (4.9) se obtiene el valor de la resistencia neumática de 13402.7370 *Ohmios neumáticos*.

## 4.5. Capacitancia Neumática

La capacitancia neumática representa la posibilidad de acumular una cantidad de aire bajo una diferencia de presión.

La capacitancia se calcula mediante la ley de los gases ideales.

Se considera que existe un proceso termodinámico que consiste en la transferencia de energía al interior del sistema que contiene al gas como una transferencia de energía en el medio exterior, este proceso es conocido como *proceso politrópico* [21]. De esta forma, la expresión

(4.2) se puede reescribir como:

$$p \left( \frac{V}{m} \right)^m = \frac{p}{\rho^n} = \text{constante} \quad (4.10)$$

en donde  $n$  es el exponente politrópico.

Se considera al dióxido de carbono como un gas ideal, de esta forma se puede usar la expresión para los gases ideales de la siguiente forma:

$$p\bar{v} = \bar{R}T \quad pv = \frac{R}{M}T \quad (4.11)$$

Donde:

$p$  = presión absoluta,  $lb/pie^2$

$\bar{v}$  = volumen ocupado por un mol de un gas,  $pie^3/lbmol$

$\bar{R}$  = constante universal de los gases,  $pielb/lbmolR$

$v$  = volumen específico del gas,  $pie^3/lb$

$M$  = peso molecular del gas por mol,  $lb/lbmol$

Por lo tanto,

$$pv = \frac{p}{\rho} = \frac{\bar{R}}{M}T = R_{gas}T \quad (4.12)$$

En donde  $R_{gas}$  es la constante de gas. El exponente politrópico  $n$  se considera constante, en muchos casos prácticos, por ende, la capacitancia se considera constante. El valor de  $d\rho/dp$  se obtiene a partir de las ecuaciones (4.10) y (4.12) como:

$$\frac{d\rho}{dp} = \frac{1}{nR_{gas}T} \quad (4.13)$$

Después, la capacitancia se obtiene como:

$$C = \frac{V}{nR_{gas}T} \quad (4.14)$$

Según la ley de los gases ideales, la capacitancia de un recipiente determinado es constante si la temperatura permanece constante, entonces para este caso particular se supondrá una temperatura constante.

$R_{gas}$  es la constante del gas y se obtiene a partir de:

$$R_{gas} = \frac{\bar{R}}{M} \quad (4.15)$$

Donde:

$M$  = Peso molecular del gas,  $g/mol$

$\bar{R}$  = Constante universal de los gases,  $pielb/lbmolR$

En la tabla (4.2) se enlistan los valores usados para calcular la capacitancia neumática del sistema. Al igual que en el caso de la resistencia neumática, se usaron valores de diseño para prototipo, pero principalmente se requirió conocer las características generales del dióxido de carbono mismas que no cambiarán al cambiar el diseño.

Descripción	Valor	Unidades
$V$ - Volumen del recipiente	0.17657	$pie^3$
$n$ - Exponente politrópico	1	
$R_{gas}$ -Constante del gas	0.243844	$pielb/lbR$
$\bar{R}$ -Constante universal de los gases	10.73158	$pielb/lbmolR$
$M$ - Peso molecular del $CO_2$	44.01	$g/mol$
$T$ -Temperatura absoluta	538.47	$R$

Tabla 4.2: Valores para calcular la capacitancia neumática del sistema.

Al realizar la sustitución se obtiene un valor para la capacitancia de:  $1,3447e^{-3}, Kgm^2/N$ .

## 4.6. Función de Transferencia del Sistema

Al obtener los valores de la resistencia  $R$  y la capacitancia  $C$  se puede escribir la función de transferencia de la forma (4.7), que describe el comportamiento de un tanque de  $CO_2$  conectado a una válvula reguladora de presión, dicho sistema es el mismo que se muestra en la figura (4.2).

Si  $p_i$  y  $p_o$  se consideran la entrada y la salida, respectivamente, se obtiene la función de transferencia del sistema para el caso particular con los valores obtenidos en los cálculos anteriores, expresada como:

$$\frac{P_o(s)}{P_i(s)} = \frac{1}{18,022s + 1} \quad (4.16)$$

## 4.7. Análisis de la Respuesta del Sistema Ante una Entrada Escalón

Una vez que se conoce la función de transferencia que representa el comportamiento del tanque de gas y la válvula, es posible realizar una simulación en Simulink con la finalidad de conocer la respuesta del sistema ante una entrada escalón. Esto servirá más adelante, para hacer la sintonización de un control clásico del tipo PI.

En la figura (4.3) se muestra el diagrama a bloques de la función de transferencia, el cual se hizo con la finalidad de comparar su respuesta ante una entrada escalón. Es importante destacar que el sistema no está retroalimentado, ya que, es necesario conocer su comportamiento en lazo abierto para, posteriormente realizar la sintonización del control de tipo PI.

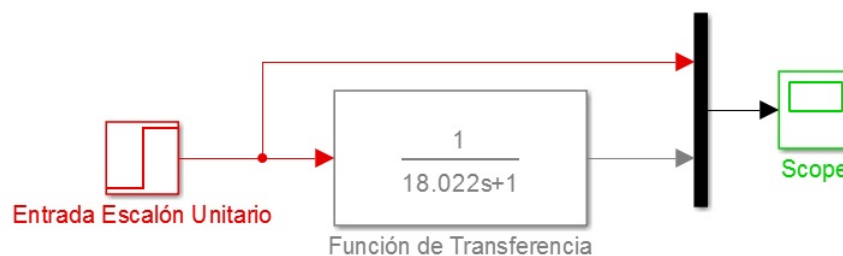


Figura 4.3: Diagrama a bloques de la función de transferencia sin retroalimentación, con entrada escalón unitario.

En la figura (4.4) se observa la respuesta del sistema en lazo abierto ante una entrada escalón unitario, esta respuesta está representada por la línea punteada y se graficó en el mismo plano la entrada escalón (línea continua) para poder realizar la comparación.

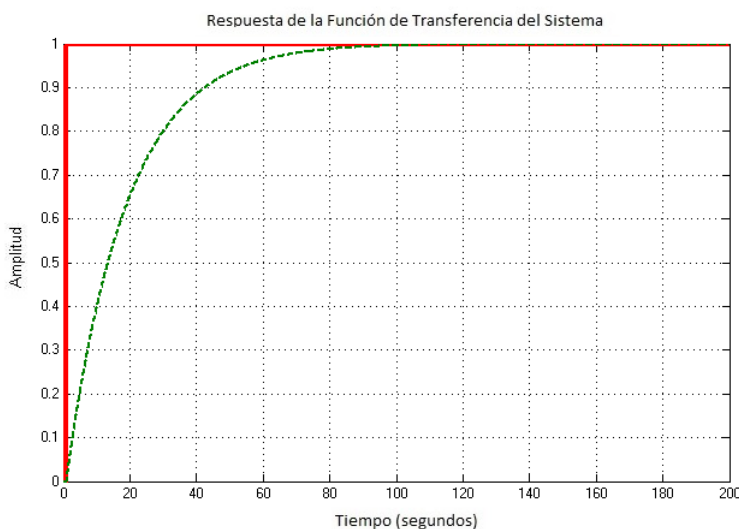


Figura 4.4: Respuesta del sistema en lazo abierto ante una entrada escalón.

Es importante destacar el hecho de que, efectivamente, el sistema alcanza a la entrada, pero lo hace en un tiempo muy grande y esto, para fines prácticos, no es adecuado. Por esta razón será necesario sintonizar un control PI que provoque que el sistema alcance a la entrada en un tiempo menor.

## 4.8. Sintonización del Control Clásico PI

La familia de controladores clásicos PID es altamente utilizada en la industria. Estos controladores han mostrado ser robustos y extremadamente beneficiosos en el control de muchas aplicaciones en la industria. Las siglas PID significan proporcional, integral y derivativo. Para

alcanzar los objetivos de este trabajo de tesis se sintonizará un control clásico Proporcional-Integral (PI).

La forma estándar de controladores PI es la siguiente:

$$\text{Proporcional e Integral: } K_{PI}(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s})$$

Para sintonizar un control de tipo PI se usarán dos métodos, el primero será un método de Ziegler-Nichols basado en la respuesta del sistema en lazo abierto ante una entrada escalón, el segundo método será una sintonización óptimal basada en la teoría conocida como *Linear Quadratic Regulator* (LQR). Al final del capítulo se hará una comparación de los resultados con ambos métodos para seleccionar el que mejor se comporte de acuerdo a las necesidades y requerimientos del sistema.

El control que se sintonizará será un control PI, ya que, a partir de la respuesta del sistema ante una entrada escalón en lazo abierto ( Fig. 4.4), se puede deducir que el sistema se estabiliza por sí solo, aunque lo hace en un tiempo muy grande. Por esta razón, solo se requiere de acciones de control que reduzcan el tiempo de estabilización.

En este caso, el componente proporcional del controlador hará que el sistema alcance a la señal de referencia en menos tiempo y el componente integral minimizará el error en estado estable.

#### 4.8.1. Método de la Curva de Reacción de Ziegler y Nichols

Uno de los métodos de Ziegler y Nichols para la sintonización de controladores PID se basa en el ensayo del sistema en lazo abierto ante una entrada escalón, y se le conoce como método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols. Normalmente la respuesta es una curva de reacción conocida como curva "S", como la que se muestra en la figura (4.5).

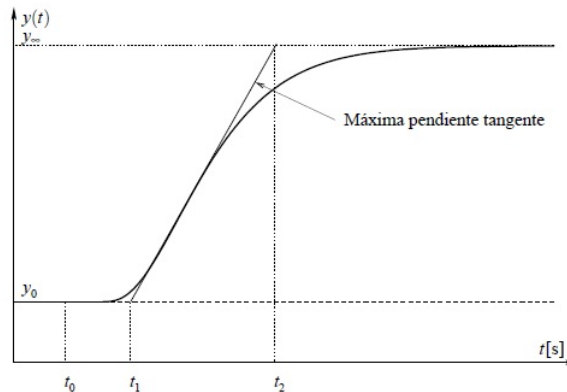


Figura 4.5: Curva típica para el método de Ziegler-Nichols.

La sintonización del control PI se obtiene mediante la experimentación de la planta en lazo abierto con el siguiente procedimiento:

- Llevar la planta manualmente a lazo abierto en un punto de operación normal manipulando  $u(t)$ . Se supone que la planta se estabiliza en  $y(t) = y_0$  para  $u(t) = u_0$ .
- En un instante inicial  $t_0$  aplicar un cambio escalón en la entrada, de  $u_0$  a  $u_\infty$  (el salto debe estar entre un 10 % a 20 % del valor nominal).
- Registrar la respuesta de la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación.
- Calcular los parámetros del modelo con las siguientes fórmulas:

$$k_0 = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0}, \quad \tau_0 = t_1 - t_0, \quad \gamma_0 = t_2 - t_1$$

Se desarrolló un programa en MatLab que permite calcular los parámetros del modelo a partir del análisis de la respuesta del sistema en lazo abierto ante una entrada escalón. En la figura (4.6) se muestra el resultado gráfico de dicho procedimiento.

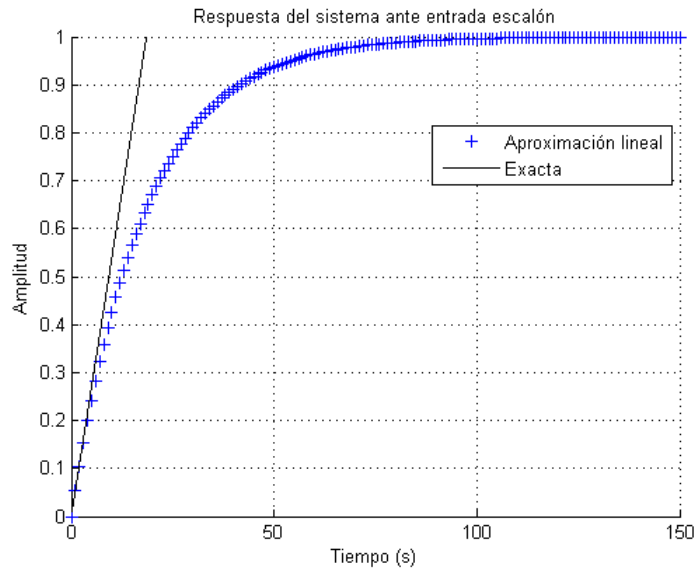


Figura 4.6: Curva de reacción del sistema ante una entrada escalón para el cálculo de los parámetros del controlador.

Los parámetros del controlador PI propuestos por Ziegler y Nichols a partir de la curva de reacción se determinan de la tabla (4.3).

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{\gamma_0}{K_0\tau_0}$	-	-
PI	$\frac{0,9\gamma_0}{K_0\tau_0}$	$3\tau_0$	-
PID	$\frac{1,2\gamma_0}{K_0\tau_0}$	$2\tau_0$	$0,5\tau_0$

Tabla 4.3: Parámetros de controladores PID según el método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols.

El programa permitió calcular los parámetros de ganancia proporcional y ganancia integral, arrojó valores grandes para la ganancia proporcional  $k_p$  y valores pequeños para el tiempo integral  $T_i$ , así que, a partir de este resultado se hicieron pruebas en la simulación para hallar los valores de sintonización que mejor respuesta provocan en el sistema. Los mejores resultados fueron los mostrados en la tabla (4.4).

$K_p$	100
$T_i$	30

Tabla 4.4: Valores de ganancia proporcional y tiempo integral para el control PI.

Note que los valores cumplen con las condiciones que el programa en MatLab arrojó. La ganancia proporcional  $k_p$  es grande a comparación del tiempo integral  $T_i$ . Con los valores de la tabla (4.4) se simuló la respuesta del sistema usando un programa diseñado en MatLab.

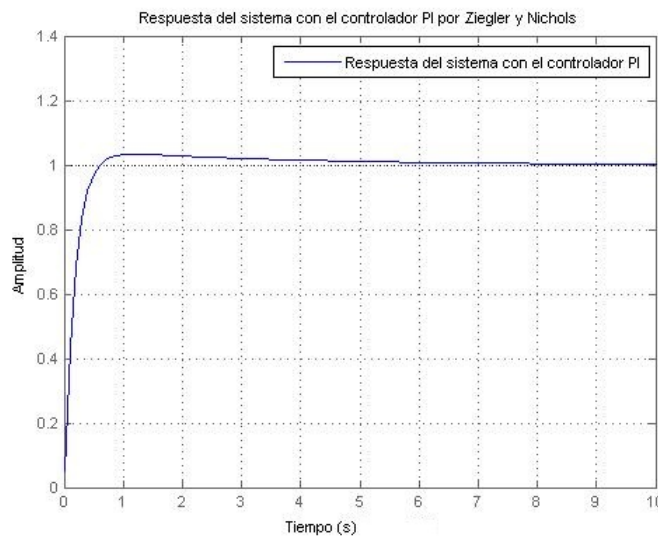


Figura 4.7: Respuesta del sistema en lazo cerrado con el control PI ante una entrada escalón.

En la figura (4.7), se observa el resultado de introducir el control PI al sistema. Es importante destacar el hecho de que con el control PI la respuesta alcanza a la señal de entrada en menos tiempo que el sistema sin controlar y que se tiene un sobretiro menor al uno por ciento.

Con este resultado se puede concluir que el control PI sintonizado a partir del método de Ziegler-Nichols cumple con lo esperado, ya que logra que la salida alcance a la señal de referencia en menos tiempo.

### 4.8.2. Método de Sintonización Óptimal por LQR

En la sección anterior se sintonizó un control PI por el método de Ziegler-Nichols y se obtuvieron buenos resultados al reducir el tiempo de estabilización del sistema. Ahora se probará la sintonización óptimal por el método LQR (*Linear Quadratic Regulator*).

La teoría del control óptimo se desarrolla para sistemas dinámicos que son descritos por ecuaciones diferenciales lineales y se selecciona una función de costo descrita por una función cuadrática. Uno de los resultados de esta teoría es una solución dada por un regulador cuadrático lineal (LQR).

Usando el método de Lyapunov, el problema del control óptimo se reduce a la solución de la ecuación algebraica de Riccati (CARE), la cual es resuelta para calcular las ganancias de retroalimentación para el conjunto de matrices que describe al sistema. Estas matrices regulan las penalidades en la desviación de las trayectorias de las variables de estado y la señal de control del sistema [22].

Combinando la filosofía de sintonización clásica de controladores PI con el concepto de los reguladores lineales cuadráticos (LQR), se puede obtener un control óptimo sobre el actuador en el sistema neumático [22].

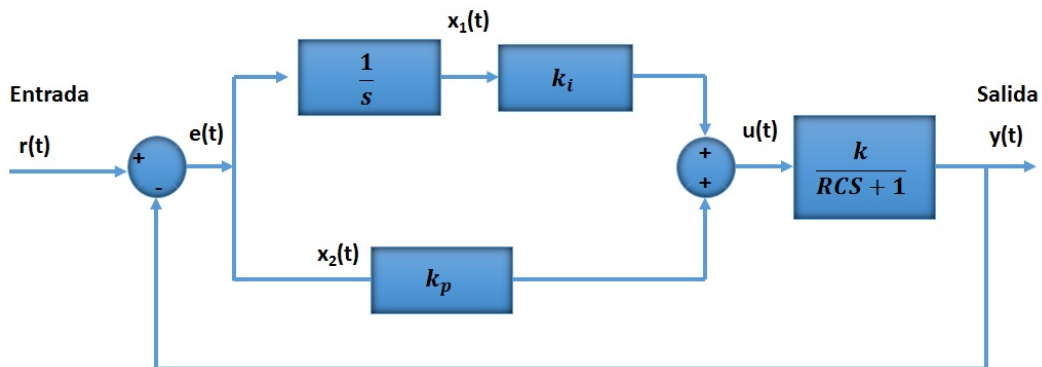


Figura 4.8: Diagrama a bloques de un control PI.

En la figura (4.8) un control PI en paralelo es considerado para el sistema de control representado en la expresión (4.7).

De la ecuación general del controlador PI y suponiendo que el sistema de control es excitado con una entrada externa  $r(t)$  para controlar la señal de control  $u(t)$  y la salida  $y(t)$ , se definen las variables de estado como:

$$PI, x_1 = \int e(t)dt \quad (4.17)$$

$$x_1 = \int e(t)dt, \quad x_2 = e(t) \quad (4.18)$$

Los sistemas que involucran válvulas neumáticas y circuitos de control se consideran sistemas con retardo.

Para sistemas con tiempo de retardo, en el caso del diseño de la retroalimentación, la puesta a punto externa no afecta al diseño del controlador, es decir  $r(t) = 0$ , [23].

Del digrama a bloques presentado en la figura (4.8) y de la función de transferencia (4.7) es claro que:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{RCs + 1} = \frac{-E(s)}{U(s)} \quad (4.19)$$

En la ecuación (4.19), la relación  $y(t) = -e(t)$  es válida para el problema estandar de reguladores [23]. Después se tiene que

$$(RCs + 1)E(s) = -kU(s) \quad (4.20)$$

Después, se puede transformar la ecuación (4.20) cambiándola al dominio del tiempo de la siguiente forma:

$$RC\dot{e}(t) + e(t) = -ku(t) \quad (4.21)$$

Y finalmente se reescribe la ecuación (4.21) usando la selección de las variables de estado (4.18).

$$RC\dot{x}_2 + x_2 = -ku(t) \quad (4.22)$$

La representación en espacio de estados de (4.22) es:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{x_2}{RC} - \frac{k}{RC}u(t) \end{cases} \quad (4.23)$$

Usando (4.23), la formulación del espacio de estado se escribe como se ve a continuación:

$$\dot{x}(t) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1/RC \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ -k/RC \end{pmatrix} u(t) \quad (4.24)$$

Del desarrollo de la función de transferencia, la cual describe el comportamiento del sistema neumático, se conocen los valores reales de la resistencia y la capacitancia neumática (R y C).

Con la representación en (4.24) se puede analizar la controlabilidad del sistema usando la matriz de controlabilidad. El determinante de la matriz de controlabilidad es diferente de cero, entonces, el sistema es completamente controlable.

$$|B \quad AB| = \begin{vmatrix} 0 & -1/18,022 \\ -1/18,022 & 1/(18,022)^2 \end{vmatrix} \neq 0$$

Ahora, con la finalidad de obtener una formulación optimal con el sistema (4.24), la siguiente función cuadrática  $J$  es seleccionada:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t))dt \quad (4.25)$$

La minimización de la función de costo proporciona el estado de retroalimentación de la ley de control como se muestra a continuación:

$$u(t) = -R^{-1}B^T Px(t) = -Fx(t) \quad (4.26)$$

Donde P es la solución de la ecuación algebraica de Riccati dada por:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (4.27)$$

Se conocen las matrices A y B del sistema, Q es una matriz simétrica semidefinida positiva y R es un número positivo. Q y R son seleccionados por el diseñador. Las matrices Q y P tienen la siguiente forma:

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{12} & P_{22} \end{pmatrix} \quad Q = \begin{pmatrix} Q_1 & 0 \\ 0 & Q_2 \end{pmatrix} \quad (4.28)$$

La solución para la ecuación de Riccati (4.27) fue obtenida de la función *care* en MatLab, esta función regresa una solución única para P de la ecuación de Riccati, también regresa las matrices de ganancia del sistema.

La solución P usando valores arbitrarios para la matriz Q y el parámetro R es:

$$P = \begin{pmatrix} 6,2485 & 18,022 \\ 18,022 & 94,588 \end{pmatrix} \quad (4.29)$$

Finalmente, se pueden sustituir los valores conocidos en la ecuación de la ley de control (4.26).

Resolviendo la sustitución, se obtiene una nueva matriz, la cual tiene las ganancias proporcional e integral para el controlador PI.

$$u(t) = (ki \quad kp) \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} \quad (4.30)$$

La forma de control puede ser escrita como:

$$u(t) = ki \int e(t)dt + e(t)kp \quad (4.31)$$

Como se sabe, esta forma es la representación general del controlador PI.

Se hizo un programa en MatLab para resolver la ecuación de Riccati y hacer variaciones en la matriz Q, con la finalidad de comparar los resultados y decidir qué valor de la matriz Q

proporciona la mejor respuesta del sistema. La figura (4.9) representa el resultado de diferentes variaciones de  $Q$  con una entrada escalón.

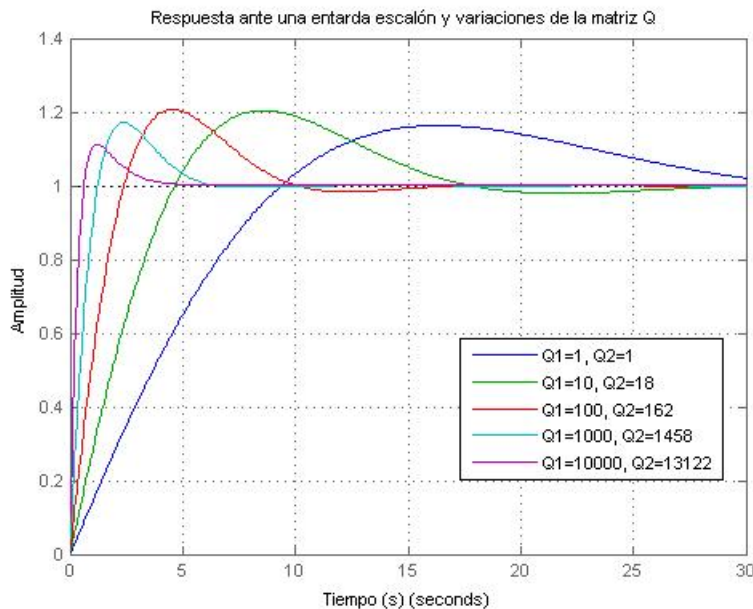


Figura 4.9: Respuestas del sistema ante una entrada escalón con variaciones de la matriz  $Q$ .

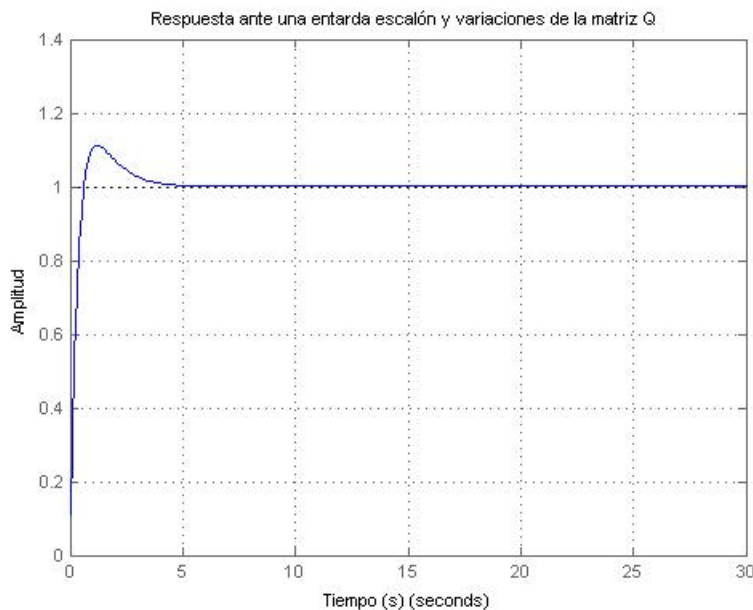


Figura 4.10: Mejor respuesta del sistema ante una entrada escalón unitario con valor fijo de la matriz  $Q$ .

De la gráfica se puede elegir el mejor comportamiento para la respuesta del sistema y se puede notar que el mejor resultado es la gráfica que alcanza a la señal de entrada en menos tiempo y que tiene un sobretiro de menos del dos por ciento.

El resultado de la gráfica (4.10) alcanza a la entrada escalón en menos tiempo que el control sintonizado por el método de Ziegler-Nichols.

Del análisis de ambos resultados arrojados por los dos métodos, se decide que el resultado que se usará para la implementación física del dispositivo electrónico será el obtenido por la sintonización optimal porque lo que más interesa es que el sistema alcance a la salida en menos tiempo.

### 4.8.3. Simulación del Comportamiento del Sistema con Control PI

En esta sección se realizará la comparación del control PI sintonizado con los dos métodos desarrollados en las secciones anteriores, pero esta vez se simulará el comportamiento usando la señal de referencia como entrada del sistema. El objetivo de esto, es asegurar que se selecciona el mejor controlador PI para su aplicación e implementación en el dispositivo electrónico.

Es importante recordar que la señal de referencia es la cantidad de dióxido de carbono que requiere el cultivo durante un periodo de dos semanas y se caracterizó dicho comportamiento en el capítulo anterior.

El objetivo del control PI es mantener la concentración de dióxido de carbono cercana o igual a la señal de referencia en cada instante de tiempo. Esto se logrará ya que el control PI proporcionará un ciclo de trabajo, el cual controlará la apertura y cierre de la válvula proporcional y de esta forma se logrará que a la salida del sistema se obtenga la cantidad de  $\text{CO}_2$  requerida por el cultivo.

La figura (4.11) ilustra el diagrama a bloques del sistema en lazo cerrado con la señal de referencia como entrada y con el bloque de control PI para modificarlo con los resultados de los dos métodos de sintonización.

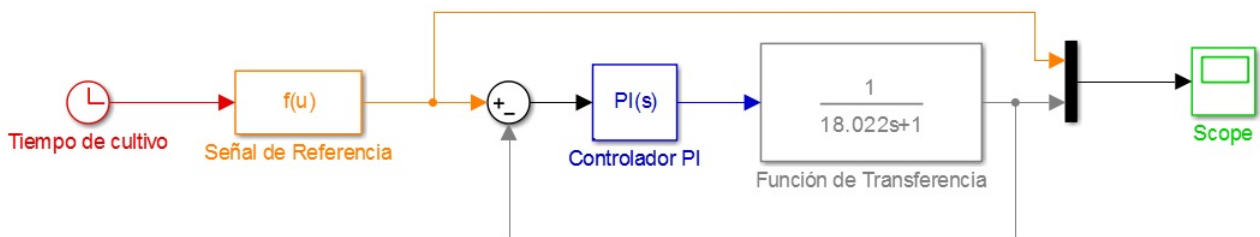


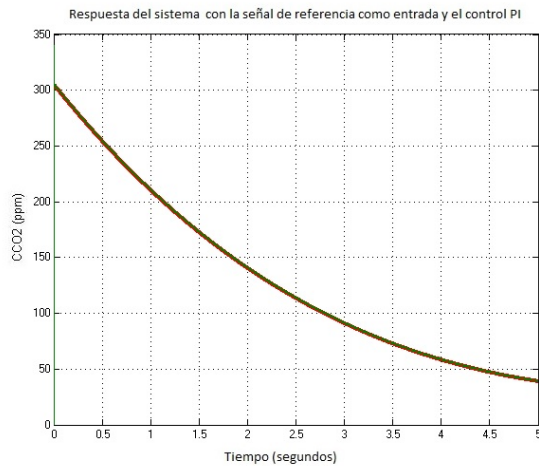
Figura 4.11: Diagrama a bloques del sistema completo, con la señal de referencia como entrada y el control PI sintonizado.

El resultado de introducir el control sintonizado por Ziegler-Nichols se muestra en la figura

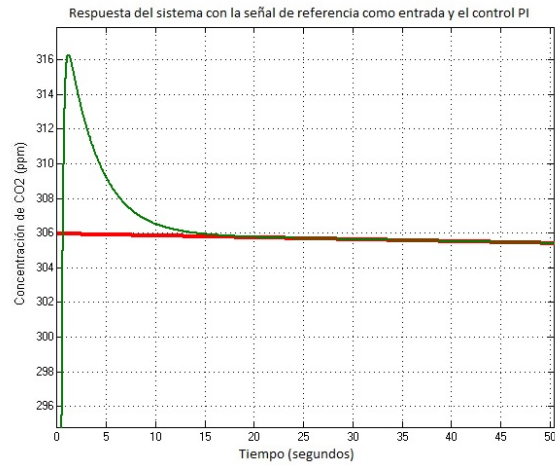
# CAPÍTULO 4. SISTEMA DE CONTROL PARA REGULAR LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO

## 4.8. SINTONIZACIÓN DEL CONTROL CLÁSICO PI

(4.12), la imagen (4.12(a)) muestra como la salida sigue perfectamente a la señal de entrada, pero es necesario hacer un acercamiento en los primeros segundos de respuesta para conocer el tiempo de estabilización y el sobretiro que presenta la salida. En la figura (4.12(b)) es notable ver que el sistema se comporta correctamente, ya que la salida alcanza a la señal de entrada pero se destaca el hecho de que el tiempo de estabilización es de veinte segundos aproximadamente.

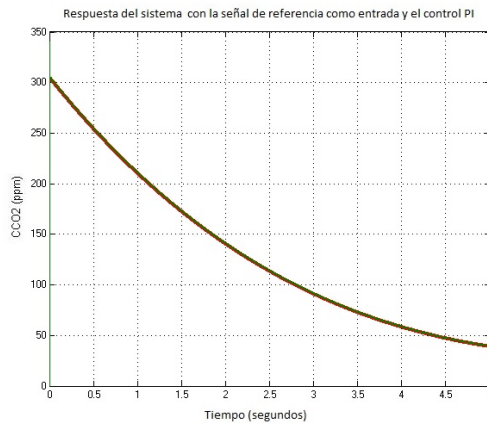


(a) Respuesta del sistema.

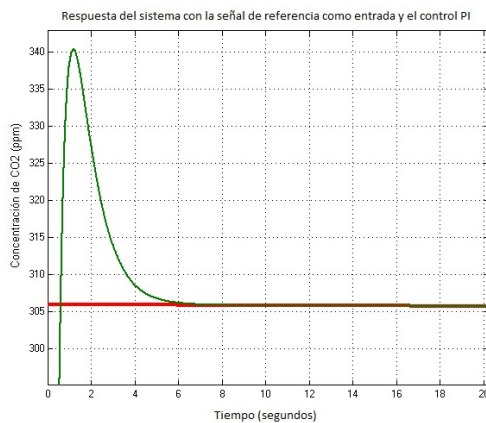


(b) Respuesta del sistema en los primeros segundos.

Figura 4.12: Respuesta del sistema con la señal de entrada y el control PI sintonizado por Ziegler-Nichols.



(a) Respuesta del sistema.



(b) Respuesta del sistema en los primeros segundos.

Figura 4.13: Respuesta del sistema con la señal de entrada y el control PI sintonizado por LQR.

La respuesta de la simulación con el control PI sintonizado por el método de optimización por LQR se muestra en la figura (4.13). La línea color rojo es la señal de referencia y la línea

de color verde es la respuesta del sistema, esta simulación se hizo en un tiempo de un día aproximadamente, para verificar que la respuesta sí alcanza a la señal de entrada y estudiar su comportamiento y tiempo de estabilización. En la figura (4.13(b)) se hizo un acercamiento en los primeros segundos para hacer el análisis de la respuesta del sistema. Aquí es posible notar que el sistema se estabiliza en ocho segundos aproximadamente, y después sigue perfectamente a la señal de referencia. Con esto se comprueba una vez más que el control sintonizado por el método de optimización es más conveniente, ya que, lo que interesa es que el sistema se estabilice en el menor tiempo posible para asegurar que la concentración de  $\text{CO}_2$  al interior del microclima sea la adecuada.

Más adelante, en el siguiente capítulo, se usará el control PI sintonizado por LQR para diseñar el programa de control que registrará el comportamiento del dispositivo electrónico para controlar la concentración de dióxido de carbono.

## Capítulo 5

# Diseño del Sistema Electrónico de Control

### 5.1. Introducción

En este capítulo se iniciará con el diseño del sistema electrónico que deberá controlar la concentración de dióxido de carbono en microclimas, basado en la señal de referencia obtenida de la teoría de control óptimo y la sintonización del control clásico PI.

Se describen los elementos que se seleccionaron para construir el dispositivo electrónico: el sensor, la válvula proporcional y el dispositivo de control. Posteriormente se describe la caracterización de estos elementos y el acoplamiento de señales entre ellos. Más adelante, se describe el comportamiento del sistema a través de diagramas de flujo en los cuales se basará el diseño del programa de control automático para la concentración de dióxido de carbono.

Finalmente se explica cómo se hizo la incorporación de todos los elementos en el diseño del circuito electrónico para su implementación.

### 5.2. Esquema General del Sistema Electrónico

A continuación se presenta el esquema general del sistema, donde se pueden identificar los elementos que lo componen (Figura 5.1), el tanque de almacenamiento de CO<sub>2</sub> para suministrar al invernadero, la válvula que se traduce en el actuador del sistema y que regula el flujo de CO<sub>2</sub> según las ordenes que recibe del microcontrolador, el cual contiene el programa de control, el sensor que realiza las mediciones de CO<sub>2</sub> para mandarlas al microcontrolador y finalmente se tiene un display que permitirá al usuario conocer la concentración de CO<sub>2</sub> al interior del microclima en cualquier momento.

Los elementos mencionados anteriormente forman parte de un sistema de control en lazo cerrado y es importante conocer su función dentro del sistema y cómo se relacionan entre ellos de una forma más específica.

Un sistema de control compara la salida real retroalimentada con el valor que se requiere

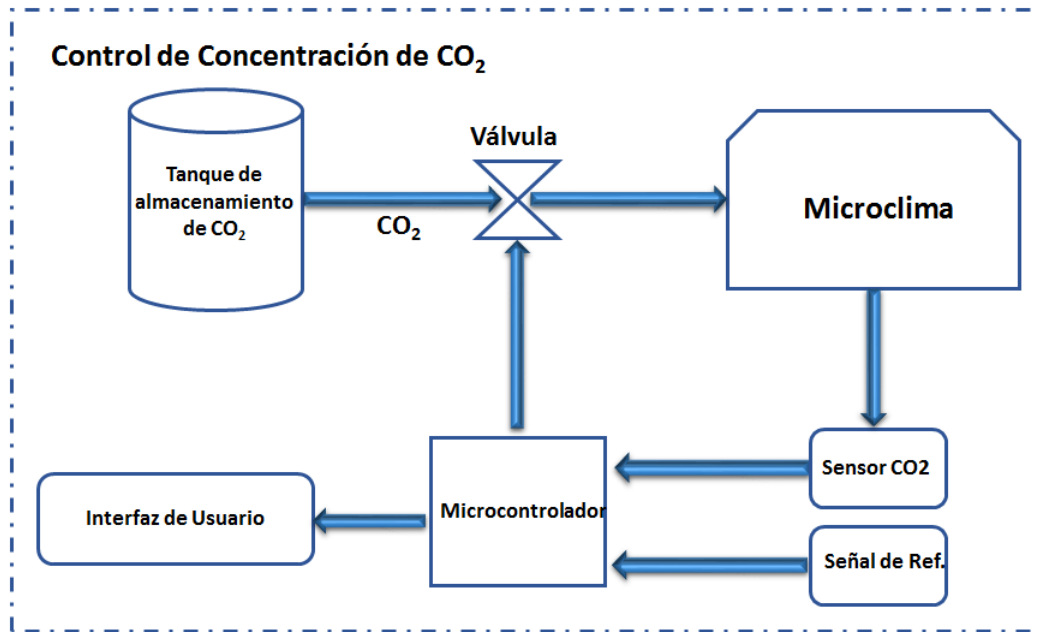


Figura 5.1: Esquema general del sistema de control.

y ajusta su salida de acuerdo con el resultado. El término retroalimentación se usa porque las señales se retroalimentan desde la salida para modificar la entrada.

Los elementos del sistema de control se describen a continuación:

- Variable controlada: Concentración de dióxido de carbono.
- Variable de referencia: Concentración de CO<sub>2</sub> requerida por el cultivo según la síntesis del control óptimo.
- Dispositivo de medición: Sensor de dióxido de carbono.
- Unidad de control: Microcontrolador.
- Dispositivo actuador: Válvula proporcional solenoide.
- Proceso: Control de concentración de CO<sub>2</sub>.

### 5.3. Dispositivo de Medición: Sensor de Dióxido de Carbono

Basándose en los criterios de selección de un sensor, como alcance y rango de medición, exactitud, condiciones de trabajo y costos, se decidió trabajar con el sensor K-30 10,000 ppm, fabricado por CO2Meter (Figura 5.2).

El sensor K-30 es un módulo de transmisión que no necesita mantenimiento, destinado a ser incorporado en diferentes dispositivos que requieren monitorear el dióxido de carbono. Entre sus



Figura 5.2: Sensor de CO<sub>2</sub> K-30.

principales características destacan el tamaño compacto, baja potencia requerida y múltiples opciones de salida.

### 5.3.1. Descripción de las Terminales

La tabla (5.1) especifica qué terminales y opciones de entrada/salida (E/S) están disponibles en la plataforma general K-30.

Grupo Funcional	Descripción
<b>Fuente de Alimentación</b>	
G+ referido a G0	Valores máximos absolutos: 4.5 a 14v
<b>Comunicación Serial</b>	
UART(TxD, RxD)	CMOS, protocolo de comunicación ModBus
<b>Salidas</b>	
OUT1	Salida lineal 0.4 o 1.4VDC o 0.5v o 1.5v. Resolución 10mV
OUT2	Salida lineal 0.4 o 1.4VDC o 0.5v o 1.5v. Resolución 5mV
OUT3	Salida digital (alto/bajo)
OUT4	Salida digital (alto/bajo)
Status	Salida de alto nivel en el rango 2.3V.
<b>Entradas</b>	
Din0, ... Din4	Entradas digitales cambiantes pull-up
<b>Puentes de campo opcionales</b>	
Din0,...,Din4	Entrada digital cambiante, conectado a tierra G0 para activar entradas.
<b>Extensión I2C</b>	

Tabla 5.1: Descripción de las terminales de entrada/salida del sensor.

### 5.3.2. Configuración del Sensor

El sensor seleccionado permite la posibilidad de diferentes configuraciones según el rango de medición de CO<sub>2</sub> que se requiera. La configuración básica del K-30 es una salida simple analógica, de esta forma el CO<sub>2</sub> leído está disponible para una mayor precisión. En la tabla (5.2) se muestra la configuración de salida analógica por defecto para el sensor K-30.



tomar las lecturas que se requieren.

Para leer un valor se accederá a la memoria RAM del sensor usando la cadena de datos en la tabla (5.3). La dirección (0x44) es la que indica el acceso a la memoria RAM, mientras que la dirección (0x46) es para acceder a la memoria EEPROM.

Descripción	Dirección 1byte	Comando 1byte	Dirección 2-bytes	N-Bytes para lectura
<b>Ejemplo (leer RAM)</b>	0xFE	0x44	0x00, 0x08	0x02

Tabla 5.3: Comando para leer desde la memoria RAM del sensor.

Conociendo el comando que accede a la memoria RAM es posible solicitar el dato medido por el sensor para que el controlador lo interprete. La cadena mostrada en la tabla (5.4) es la que se tendrá que mandar al sensor para que el controlador reciba el dato, note que se usa el comando de acceso a la memoria RAM (0x44) y que se agregan dos bytes de verificación de suma (checksum).

Descripción	Dirección 1byte	Comando 1byte	Dirección 2-bytes	N-Bytes para lectura	Checksum 2-Bytes
<b>Ejemplo (leer CO<sub>2</sub>)</b>	0xFE	0x44	0x00, 0x08	0x02	0x9F, 0x25

Tabla 5.4: Comando para leer un valor de CO<sub>2</sub>.

Con lo anterior será posible crear el programa que permitirá leer las mediciones de dióxido de carbono al interior del microclima, compararlas con la señal de referencia para obtener la acción de control y desplegar dichas mediciones en un display para que el usuario conozca el valor actual de CO<sub>2</sub>.

## 5.4. Dispositivo de Control: Microcontrolador Atmega 328p

El sensor que se seleccionó está diseñado para trabajar en una plataforma Arduino, por está razón el controlador que se usará para el sistema electrónico será el que usan las tarjetas Arduino UNO. De esta forma se asegura que se tendrá una comunicación segura con el sensor y que el dispositivo cuenta con los requerimientos necesarios para cumplir con los objetivos del sistema.

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo. En este caso se usará el microcontrolador por separado para crear el diseño propio de una tarjeta electrónica y se usará el entorno de desarrollo Arduino que permite elaborar el programa con el lenguaje de programación de Arduino a pesar de que no se este usando el hardware completo.

El funcionamiento de cualquier microcontrolador está determinado por el programa almacenado en su memoria y pueden reprogramarse repetidas veces. Por las características mencionadas y su alta flexibilidad, los microcontroladores son ampliamente utilizados como el cerebro de una gran variedad de sistemas embebidos que controlan máquinas, componentes de sistemas

complejos, como aplicaciones industriales de automatización y robótica, domótica, equipos médicos, sistemas aeroespaciales, e incluso dispositivos de la vida diaria como automóviles, hornos de microondas, etc.

#### 5.4.1. Microcontrolador Atmega328p

El microcontrolador que se usará para contener el programa de control es un Atmega328p fabricado por Atmel.

El Atmega328p es un circuito integrado de alto rendimiento que está basado en un microcontrolador RISC. Combina 32 KB ISP flash, la cual es una memoria con la capacidad de leer mientras escribe, 1 KB de memoria EEPROM, 2KB de SRAM, 23 líneas de E/S de propósito general, 32 registros de proceso general, tres temporizadores flexibles con modo comparación, interrupciones internas y externas y un programador de modo USART que consiste en una interfaz serial orientada a byte de dos cables. El dispositivo opera entre 1.8 y 5.5 voltios.

Las principales características del microcontrolador Atmega 328p se enlistan en la tabla (5.5).

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
Flash	37 Kbytes
RAM	12 Kbytes
Número de pines	28
Frecuencia máxima de operación	20 MHz
CPU	8-bit AVIR
Número de canales variables	16
Pines máximos de entrada salida	26
Interrupciones internas	24

Tabla 5.5: Características y especificaciones del Atmega 328p.

Las funciones que el microcontrolador realizará para cumplir con el funcionamiento del sistema son las siguientes:

- El microcontrolador se encargará de recibir los datos que el sensor está leyendo.
- Dentro del microcontrolador estará guardada la expresión matemática que describe la concentración de dióxido de carbono óptima que requiere el cultivo (señal de referencia).
- El microcontrolador comparará la señal de referencia con el valor medido por el sensor y posteriormente realizará la rutina de control PI.
- Finalmente mandará la señal adecuada a la válvula para que ésta abra y cierre proporcionalmente según se requiera.

## 5.5. Dispositivo Actuador: Válvula Reguladora de Presión.

Una válvula es un mecanismo que regula el flujo de un fluido. En la industria, una válvula se define como un dispositivo mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación (paso) de líquidos o gases mediante una pieza móvil que abre, cierra u obstruye en forma parcial uno o más orificios o conductos. La válvula es uno de los instrumentos de control más esenciales en la industria. [25]

La selección de la válvula que se incorporará al sistema se hizo a partir de los siguientes criterios:

- **Elección del tipo de válvula de acuerdo a su función.** En este caso es necesaria una válvula reguladora de presión ya que se requiere modificar el flujo de CO<sub>2</sub> en cuanto a cantidad dentro del microclima se refiere.
- **Determinación de la presión nominal.** Esta selección depende de la presión a la que se quiere suministrar el dióxido de carbono al microclima y a qué presión se encuentra almacenado el gas.
- **Selección del accionamiento.** El accionamiento de la válvula seleccionada deberá ser por un actuador eléctrico externo, ya que la señal de control será proporcionada por el microcontrolador.

Con los criterios anteriores se seleccionó una válvula que cumple con los requisitos del sistema. Esta es una válvula proporcional solenoide del fabricante ASCO serie 8202 (Figura 5.4).



Figura 5.4: Válvula proporcional solenoide ASCO.

Las características principales de esta válvula son:

- Taza de flujo ajustable entre 0% y 100%.
- La taza de flujo puede ser regulada por un rango de entradas eléctricas (sensores, transmisores, PLC, etc.) a través de la Unidad de Control Electrónico ASCO o un circuito similar.

- Disponible para usarse con gas o aire, poco mantenimiento y gran precisión en el control de flujo de agua.

La válvula trabaja con un voltaje nominal de 24 VDC y la corriente de operación es de 100 a 500mA.

### 5.5.1. Unidad de Control Electrónico ASCO

La válvula seleccionada cuenta con una unidad de control, la cual contiene un amplificador electrónico para modificar y amplificar una señal de entrada de control a una modulación de voltaje de salida para proveer un control a la válvula proporcional solenoide (Figura 5.5).



Figura 5.5: Unidad de control para la válvula proporcional solenoide ASCO.

Las características de operación del controlador de la válvula son las siguientes:

- Señal de entrada de control: 0-10 VDC, 0-20 mA o 4-20 mA.
- Taza de flujo en la señal de entrada de control ajustable por dos potenciómetros.
- Función de control rampa (arriba y abajo) puede ser activada por un dipswitch y es ajustable por un potenciómetro.
- Frecuencia de switch ajustable.

### 5.5.2. Modulación por Ancho de Pulso PWM

El controlador de la válvula funciona a partir de una señal de control por modulación de ancho de pulso conocida como PWM por sus siglas en inglés (*pulse-width modulation*). Esto es una técnica en la que el ciclo de trabajo de una señal periódica es modificado y se usa para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga. El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación al periodo, la frecuencia de la señal nunca cambia (Figura 5.6). Expresado matemáticamente:

$$D = \frac{\tau}{T} \quad (5.1)$$

Donde  $D$  es el ciclo de trabajo,  $\tau$  es el tiempo en que la función es positiva y  $T$  es el período de la función.

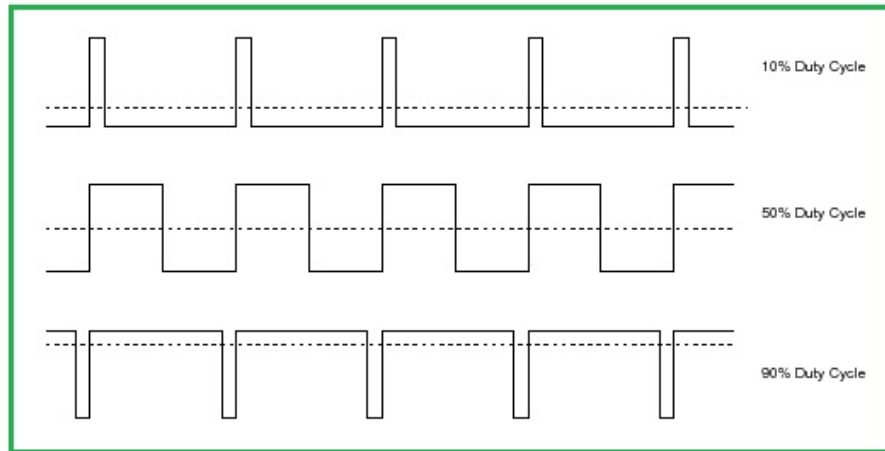


Figura 5.6: Modulación por ancho de pulso PWM con diferentes ciclos de trabajo.

Un circuito PWM da a la salida una señal de onda cuadrada con un ciclo que varía de prendido a apagado, variando en el tiempo de cero a cien por ciento.

La modulación por ancho de pulso PWM tiene una ventaja muy importante sobre un controlador que se basa en la variación lineal de la potencia suministrada a una carga mediante cambio resistivo. A una señal de control del cincuenta por ciento, el PWM usará aproximadamente el cincuenta por ciento de la potencia total, de la cual casi toda será transferida a la carga.

En el sistema que controla la concentración de dióxido de carbono en microclimas de jito-mate, el microcontrolador tendrá a la salida una onda cuadrada, dicha salida será la entrada de control para la válvula y el ancho de pulso de la señal variará según la acción del control PI que se realice por la comparación de la señal de referencia con la medición realizada por el sensor.

## 5.6. Diseño del Programa de Control

Para el diseño del programa de control se realizaron diagramas de flujo que describen el comportamiento de las funciones del sistema por separado. El diseño del programa se basa en estos diagramas de flujo y para el programa final se unieron todas las funciones involucradas en el sistema: la lectura del sensor, la evaluación de la señal de referencia en el tiempo y la rutina de control PI para obtener el ciclo de trabajo del control PWM.

### 5.6.1. Lectura de Dióxido de Carbono

El primer diagrama de flujo (Figura 5.7) presenta la rutina de lectura del CO<sub>2</sub> desde el sensor. Anteriormente se mencionó que el sensor se comunica usando el protocolo MODBUS, esto quiere decir que se debe mandar una orden al sensor para que inicie la lectura y posteriormente mande el dato al controlador para su interpretación.

Al inicio del programa se debe inicializar la comunicación serial con el sensor, después se pregunta si la recepción está disponible, esto quiere decir que la línea receptora del sensor esté activa y disponible para recibir el dato del microcontrolador. Si la recepción está disponible se manda la cadena de datos al sensor para indicarle que inicie la lectura de CO<sub>2</sub> y la mande de regreso al controlador. Se espera un tiempo y el programa pregunta si se mandó la cadena completa, si esto es correcto se recibe el paquete de datos que manda el sensor y finalmente se interpreta el paquete para ser desplegado en pantalla.

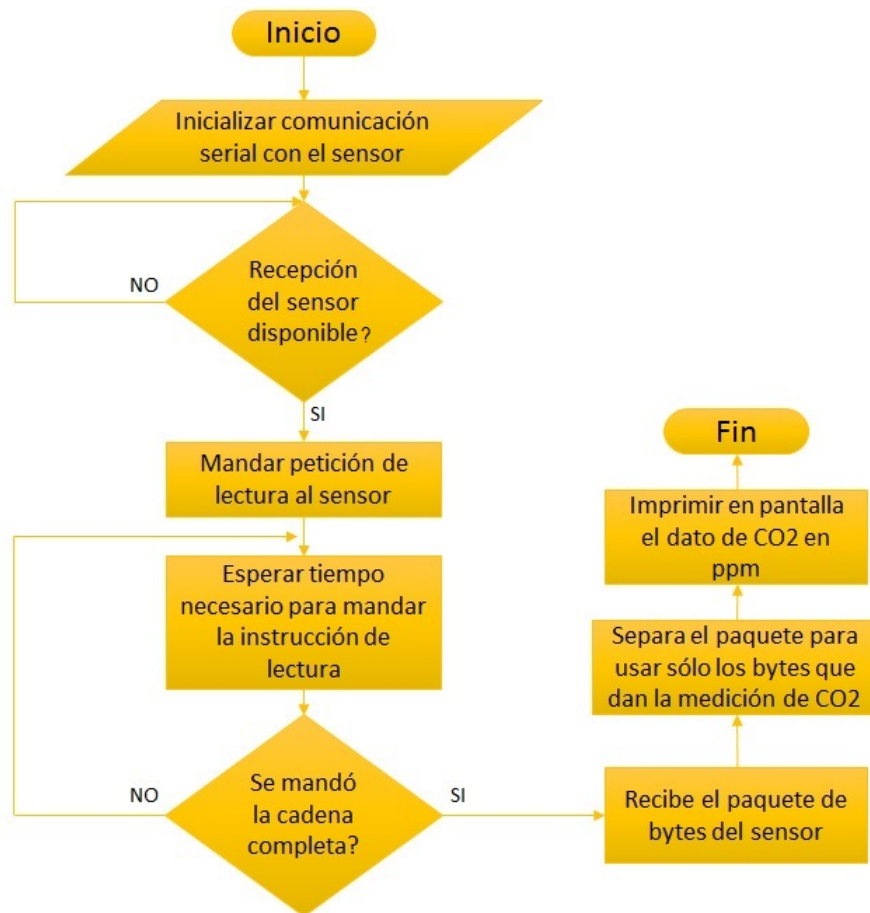


Figura 5.7: Diagrama de flujo para la lectura de CO<sub>2</sub> por el sensor.

### 5.6.2. Señal de Referencia

Anteriormente se mencionó que fue necesario caracterizar la señal de referencia del sistema para obtener una expresión matemática que describiera el comportamiento óptimo de concentración de dióxido de carbono al interior del microclima. Esto se hizo con la finalidad de obtener una expresión que pudiera ser interpretada por un programa para servir como señal de comparación en el sistema completo.

En la figura (5.8) se muestra el diagrama de flujo para realizar la evaluación de la señal de referencia en el tiempo, para, después, ser usada en el programa de control completo. Primero se declaran las variables y constantes de la expresión matemática que define a la señal de referencia y después se evalúa dicha expresión y se hace muestreo de datos cada determinado tiempo según se requiera.

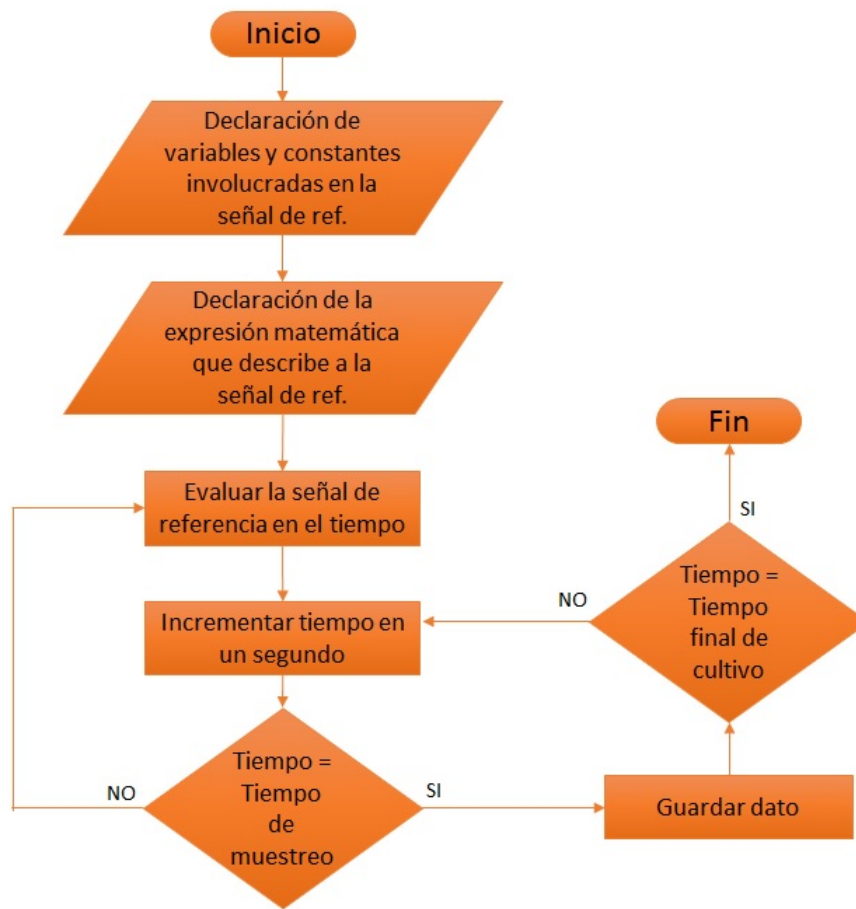


Figura 5.8: Diagrama de flujo para la señal de referencia.

### 5.6.3. Rutina de Control PI

El diagrama de flujo sobre el cual se basa el algoritmo empleado para programar la rutina de control se muestra en la figura (5.9). Es importante recordar que las ganancias del control PI se obtuvieron en el capítulo 4, y para fines de programación se usarán dichas ganancias en el programa de control.

La rutina del control PI dará como resultado el ciclo de trabajo que deberá tener la señal PWM y, posteriormente la señal PWM será la entrada de control para la válvula.

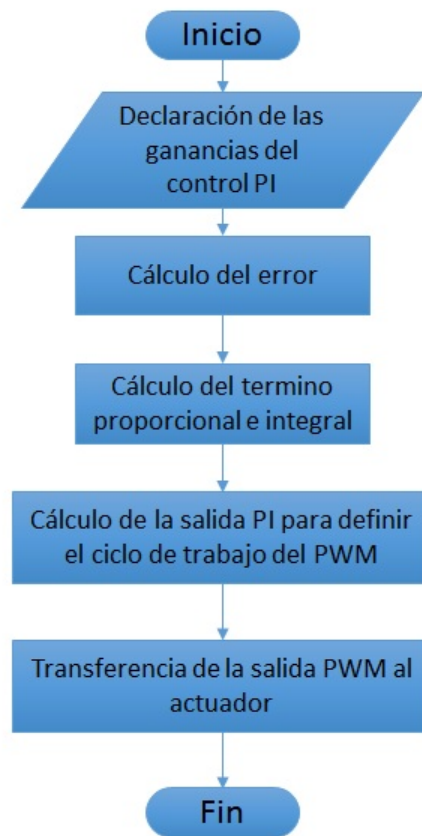


Figura 5.9: Diagrama de flujo de la rutina de control PI.

### 5.6.4. Diagrama de Flujo Integrado

Una vez que se realizaron los programas de las rutinas involucradas en el sistema por separado y se comprobó su correcto funcionamiento, es posible crear un programa integrado que incluya la lectura del sensor, la evaluación de la señal de referencia y la rutina de control PI para la activación de la válvula. El diagrama de flujo de todo el programa se muestra en la figura (5.10).

El programa de control completo consiste en leer la medición de dióxido de carbono al interior del microclima y comparar este valor con el valor deseado en ese momento del cultivo y finalmente iniciar la rutina de control PI para ajustar la concentración de CO<sub>2</sub>.

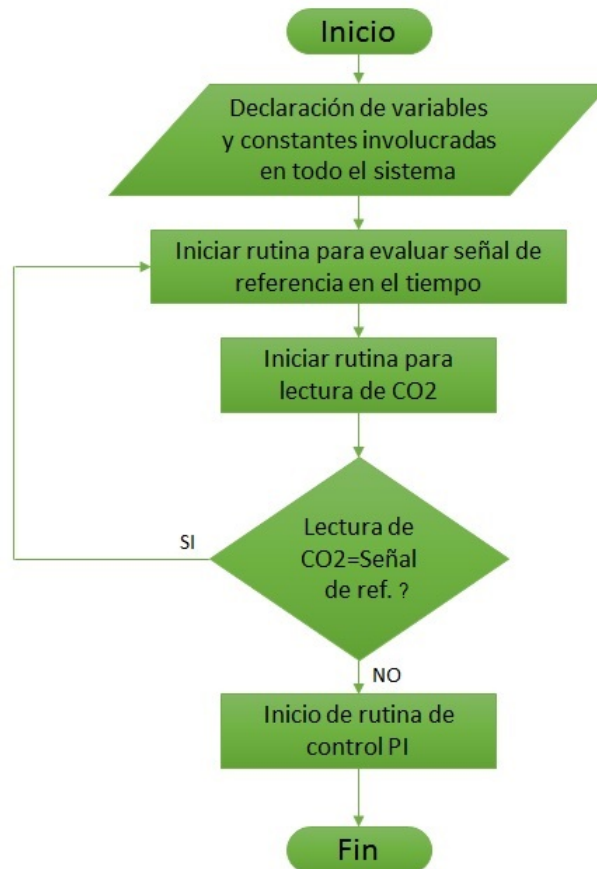


Figura 5.10: Diagrama de flujo del programa de control completo.

## 5.7. Acondicionamiento de Señales

Cualquier dispositivo electrónico, requiere de acondicionamiento de señales entre los elementos que componen al sistema a través de interfaces. Esto es necesario pues la mayoría de las veces dichos elementos tienen diferentes características eléctricas y se requiere hacer acondicionamientos entre las salidas y las entradas para que puedan interactuar entre ellos.

Como se ha visto anteriormente, el sistema que se está desarrollando contiene tres elementos principales: el sensor de CO<sub>2</sub>, el microcontrolador y la válvula proporcional. Los tres elementos tienen características eléctricas diferentes que requieren ser acopladas.

El elemento central es el microcontrolador, ya que es el que recibe los datos del sensor, procesa la información, realiza el control y manda una señal al controlador de la válvula para

su activación. Por lo tanto, se debe verificar el acondicionamiento de las señales de todos los elementos con el microcontrolador.

La conexión del sensor con el microcontrolador no presenta mayor problema ya que ambos dispositivos cuentan con terminales de comunicación serial USART (Tx, Rx) y su voltaje de trabajo es de 5 VCD.

En la figura (5.11) se muestra la conexión del sensor al microcontrolador usando los pines de comunicación serial. Como ambos dispositivos funcionan al mismo nivel de voltaje pueden compartir las líneas de alimentación.

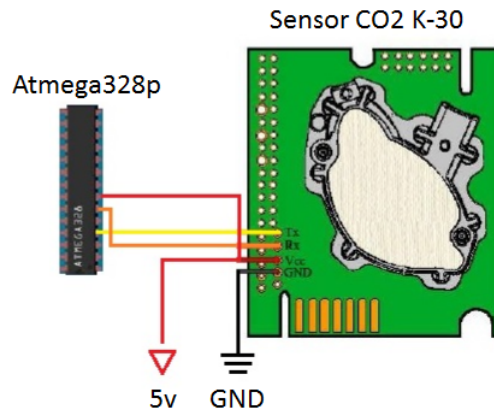


Figura 5.11: Conexión del sensor de CO<sub>2</sub> al microcontrolador Atmega328p.

La válvula junto con su controlador requieren una alimentación de 24 VCD y la señal de entrada de control para el controlador debe tener un rango de 0 a 10 VCD. Aquí se tienen dos problemas, primero alimentar con 24 volts a la válvula. Segundo, amplificar la señal de control de 5 volts que da el microcontrolador al rango que requiere el controlador de la válvula (10v).

Para solucionar dichos problemas se propone hacer uso de reguladores de voltaje y de un amplificador operacional para la señal de control. En la figura (5.12) se muestra un diagrama de cómo tendrían que hacerse las conexiones del sistema.

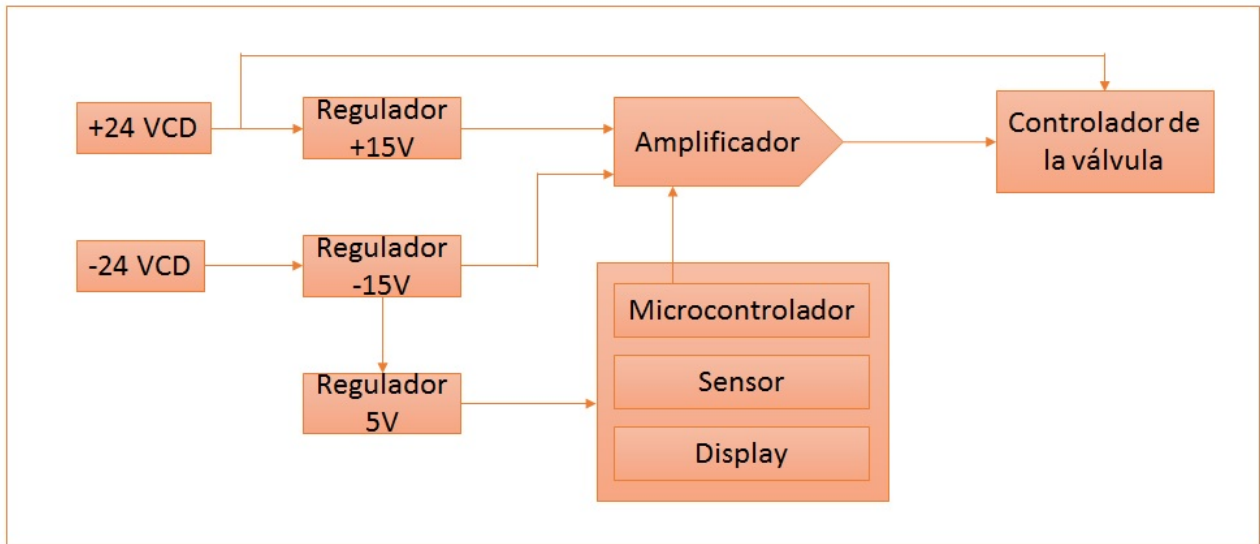


Figura 5.12: Diagrama para el acoplamiento de las señales dentro del sistema.

Note que el sistema será alimentado con una fuente simétrica de 24 volts, y a partir de esta fuente se regularán los voltajes necesarios para alimentar al resto de los elementos.

El amplificador operacional que se usará requiere de una alimentación simétrica de 15 volts, así que para esto se necesitan dos reguladores de voltaje, el primero tiene que ser un regulador de voltaje positivo (7815) alimentado por +24 volts y a la salida se tendrán +15 volts. Después se necesita el regulador de voltaje negativo (7915), el cual dará una salida de -15 volts para alimentar al op-am. Finalmente, la salida del regulador 7815 alimentará a otro regulador de 5 volts (7805), el cual alimentará al microcontrolador, al sensor y al display.

### 5.7.1. Amplificador Operacional No Inversor

En el sistema se requiere el uso de un amplificador operacional que duplique la señal de control de salida del microcontrolador ya que, el controlador de la válvula requiere una señal de control de entrada de 0 a 10 volts y la máxima salida que puede dar el microcontrolador es de 5 volts.

Los amplificadores operacionales son circuitos integrados que tienen la finalidad de amplificar una señal de salida de un dispositivo, asumiendo que esta señal es voltaje o corriente, introduciendo el menor ruido o distorsión como sea posible. Tienen dos entradas: entrada inversora(-) y entrada no inversora (+). Además, el amplificador tiene otras entradas: una alimentación de voltaje negativo, una alimentación de voltaje positivo y dos entradas conocidas como nulo de voltaje de desvío.

Existen muchas configuraciones para trabajar con amplificadores operacionales y la

selección de una de ellas se basa principalmente en las características de la señal a amplificar y las características que se desean tener para la señal amplificada. De esta forma se sabe que el amplificador que requiere la señal de control tiene que ser un amplificador no-inversor, ya que no modifica la fase de la señal, simplemente la amplifica.

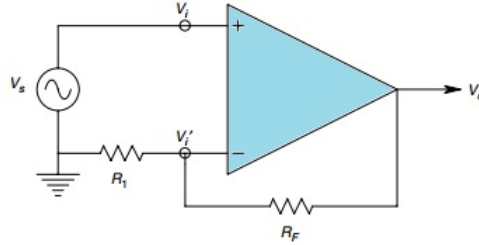


Figura 5.13: Configuración del amplificador operacional no-inversor.

En un amplificador operacional configurado como amplificador no inversor, la señal a amplificar se aplica al pin no inversor (+). Como su nombre lo indica, la señal de salida no está invertida respecto a la entrada, la salida se puede considerar como tomada de un circuito divisor de voltaje formado por dos resistencias conectadas en serie [26]. En la figura (5.13) se ilustra la configuración de un amplificador no inversor común.

Para realizar los cálculos, la resistencia  $R_{ic}$  en el nodo  $V'_i$  será tratada como infinita y la resistencia de salida del op-am se considera despreciable comparada con  $R_F$ . La función de transferencia en lazo cerrado del amplificador puede ser encontrada tomando en cuenta lo siguiente [27]:

$$V_o = (V_s - V'_i)K_{vo}/(\tau s + 1) \quad (5.2)$$

y

$$V'_i = V_o R_1 / (R_1 + R_F) = \beta V_o \quad (5.3)$$

Sustituyendo la ecuación (5.3) en la ecuación (5.2) para  $V_o/V_s$ :

$$V_o/V_s = \frac{K_{vo}/(\tau s + 1)}{1 + \beta K_{vo}/(\tau s + 1)} \quad (5.4)$$

Lo cual se reduce a

$$V_o/V_s = \frac{1/\beta}{s(\tau/\beta K_{vo}) + 1} \quad (5.5)$$

se asume que  $\beta K_{vo} \gg 1$ , lo cual es generalmente válido.

De otra forma, de la figura (5.13) se ve que la tensión en  $R_1$  es igual a:

$$VR_1 = [R_1/(R_1 + R_F)]V_o \quad (5.6)$$

En operación normal la tensión entre las entradas (inversora y no inversora) es prácticamente cero, lo que significa que la entrada  $V_s$  es igual al voltaje en  $R_1$ .

Entonces,

$$V_s = [R_1/(R_1 + R_F)]v_o \quad (5.7)$$

Del desarrollo anterior se obtiene la expresión que se necesita para calcular el voltaje de salida del amplificador:

$$V_o = V_s(1 + \frac{R_F}{R_1}) \quad (5.8)$$

De la ecuación (5.8) se deduce que el valor de las resistencias deberá ser igual, ya que, se requiere duplicar la señal de salida del microcontrolador de 5 volts a 10 volts para controlar la válvula proporcional.

Una vez que se analizó el acoplamiento necesario de los elementos que componen el sistema, se procede con el diseño del plano electrónico, basado en el diagrama de la figura (5.12).

Los diseños electrónicos para crear el circuito y el procedimiento de la implementación del sistema se muestran y se describen a detalle en el apéndice [A].

Más adelante en el siguiente capítulo se muestran los resultados obtenidos de las pruebas que se realizaron con el dispositivo final.



## Capítulo 6

# Pruebas y Resultados

### 6.1. Introducción

En el último capítulo de esta tesis se muestran las pruebas y resultados del dispositivo electrónico diseñado en los capítulos anteriores. Primero se realizaron pruebas en protoboard para verificar el correcto funcionamiento del sistema y posteriormente se procedió con la implementación del dispositivo electrónico para realizar pruebas, mismas que se muestran en este capítulo. Las pruebas permitieron asegurar que el sistema implementado cumple con los objetivos planteados en esta tesis.

El capítulo final también tiene como propósito definir el trabajo futuro de esta tesis y dar las conclusiones obtenidas del desarrollo y aplicación del control automático para la concentración de dióxido de carbono en microclimas de jitomamate basado en la síntesis de una ley de control óptimo.

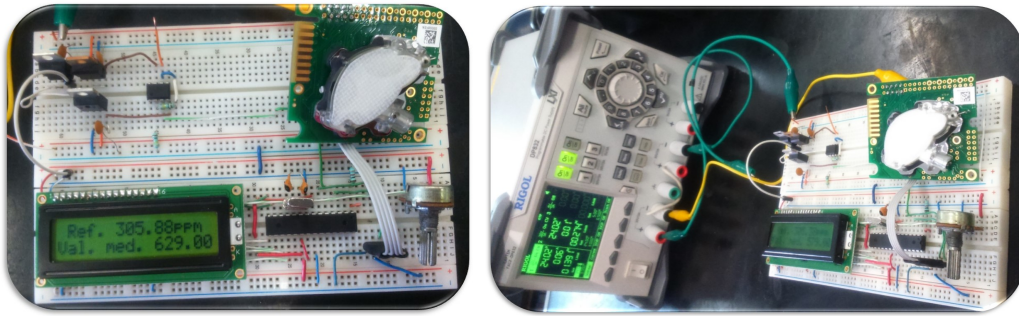
### 6.2. Pruebas Realizadas en Protoboard

El primer resultado que se verificó en protoboard fue la lectura de la concentración de dióxido de carbono realizada por el sensor. El objetivo de esto fue asegurar que el usuario pueda conocer dicho valor en cualquier momento a través de un elemento de salida como lo es el display. Estos resultados se muestran en el conjunto de imágenes (6.1).

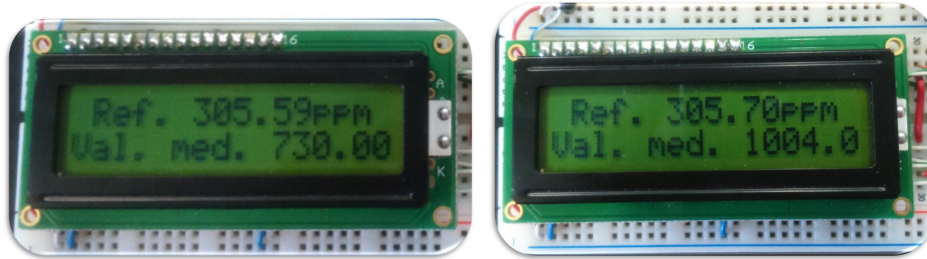
En esta prueba también se integró la señal de referencia y se agregó al display para que el usuario pueda conocer la concentración de  $\text{CO}_2$  que debe existir en ese momento según la ley de control óptimo deducida anteriormente en este documento.

En las imágenes se observa que el primer renglón de la pantalla LCD muestra el valor de la referencia y el segundo renglón muestra el valor medido por el sensor de dióxido de carbono. El tiempo de muestreo en esta prueba es de 10 segundos pero es importante recordar que este valor puede cambiarse según se requiera.

En otra prueba se realizó la comparación del valor medido por el sensor y la señal de referencia para obtener la acción del control, en este caso la acción de control se traduce a un



(a) Conexión en Protoboard para verificar lecturas de CO<sub>2</sub>. (b) Conexión en Protoboard para verificar lecturas de CO<sub>2</sub>.



(c) Valor de referencia y lectura de CO<sub>2</sub>. (d) Valor de referencia y lectura de CO<sub>2</sub>.

Figura 6.1: Pruebas con el sensor para realizar lecturas de CO<sub>2</sub> y conocer el valor de la señal de referencia.

porcentaje del ciclo de trabajo para tener cambios en el ancho de pulso de la señal PWM. Dependiendo del ciclo de trabajo la señal cambia y de esta forma la válvula abre o cierra proporcionalmente interpretando los anchos de pulso de la señal.

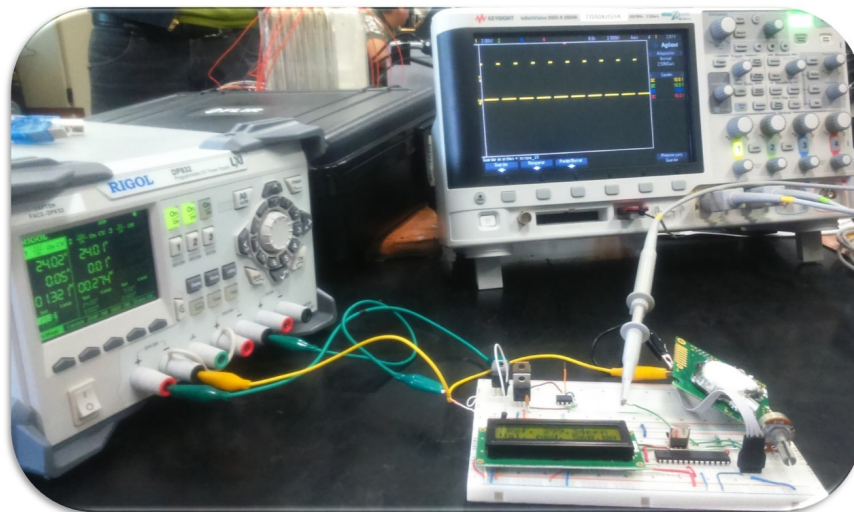
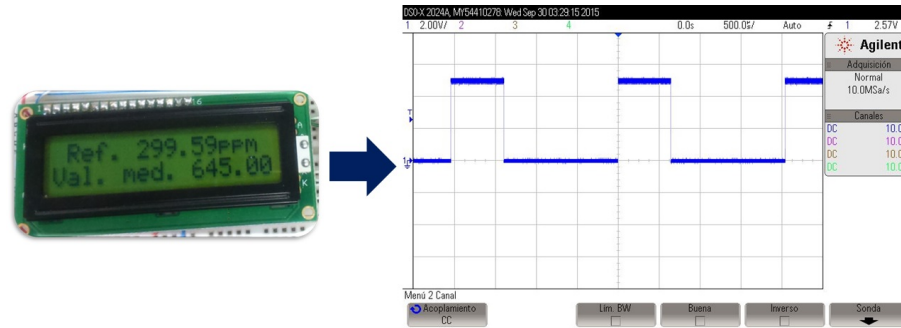
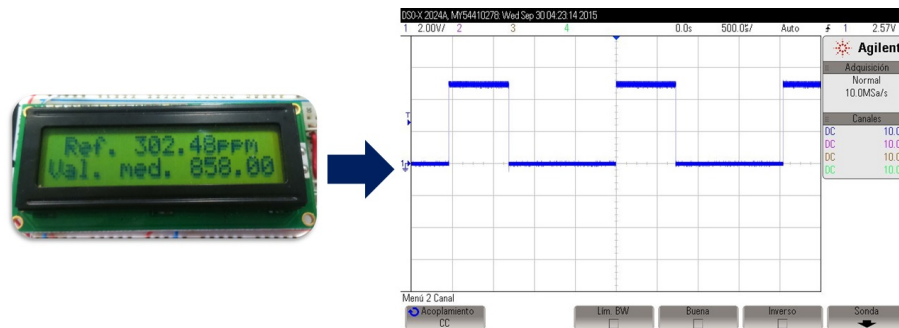


Figura 6.2: Implementación para verificar la acción de control en el sistema.

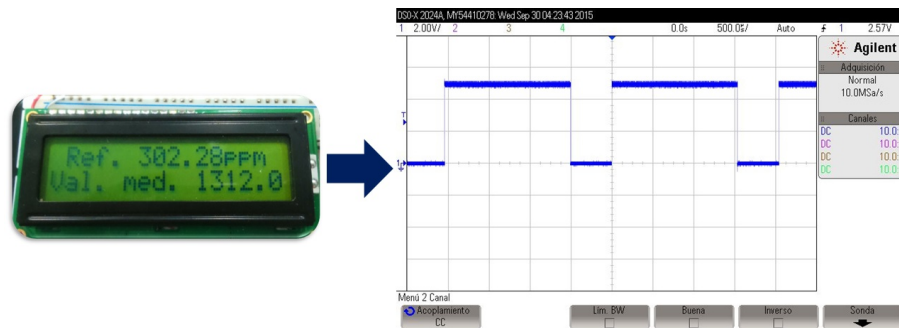
En el conjunto de imagenes (6.3) se observan los cambios en el ancho de pulso a diferentes



(a) Acción de control según el valor medido por el sensor.



(b) Acción de control según el valor medido por el sensor



(c) Acción de control según el valor medido por el sensor

Figura 6.3: Pruebas para verificar la acción de control ante diferentes perturbaciones.

perturbaciones aplicadas al sensor. La señal que se muestra será la entrada de control para la válvula pero es importante recordar que esta señal deberá ser amplificada para que el controlador de la válvula la pueda interpretar.

Es posible notar que mientras el valor medido por el sensor es más grande que el valor de la referencia, el ancho de pulso de la señal de control es mayor, lo que se traduce a que la válvula estará cerrada para que no exista enriquecimiento de CO<sub>2</sub> dentro del microclima en ese momento. De otro modo, cuando el valor es menor a la referencia, la válvula se abrirá proporcionalmente para alcanzar el valor deseado de concentración de dióxido de carbono al interior del microclima.

La siguiente prueba se realizó para verificar que el amplificador diseñado en el capítulo anterior funciona correctamente cuando se le aplica una señal de entrada de 5 volts.

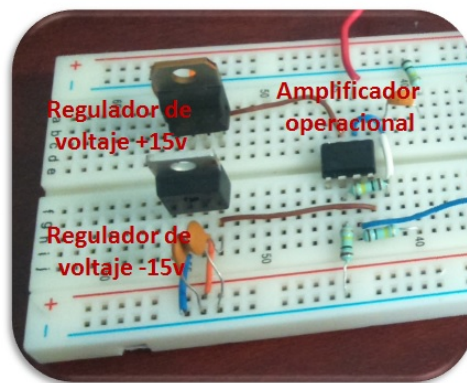
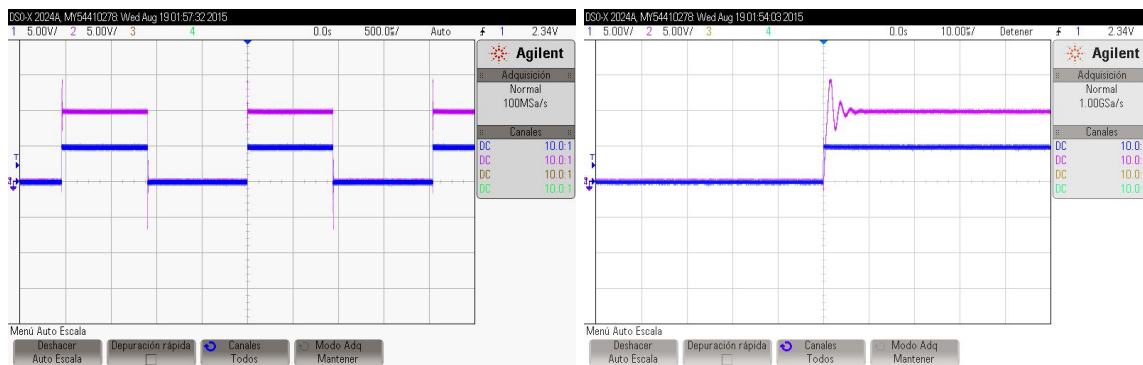


Figura 6.4: Implementación del amplificador operacional.



(a) Resultados del amplificador operacional.

(b) Resultados del amplificador operacional.

Figura 6.5: Resultados del amplificador con la acción de control.

La figura (6.4) ilustra la conexión del amplificador (TL081) y los reguladores de voltaje (7815 y 7915) que se hizo para comprobar su funcionamiento con un osciloscopio. Se alimentó el protoboard con una fuente simétrica de 24 volts, la salida de los reguladores alimentan al amplificador y otra fuente sirvió como señal de entrada de 5 volts al amplificador. La figura (6.5) ilustra el resultado obtenido, la gráfica de color azul muestra la entrada de 5 volts al

amplificador y la gráfica de color rosa es la señal de salida amplificada a 10 volts.

Una vez que se comprobó el funcionamiento por separado de todas las acciones involucradas en el sistema se realizó la conexión final en un protoboard. En el conjunto de imagenes (6.6) se ilustra el resultado final, donde el sistema está midiendo la cantidad de CO<sub>2</sub>, comparándolo con la señal de referencia, realizando la acción del control, amplificando la señal de salida y finalmente usando esa señal para tener un accionamiento en la válvula proporcional solenoide.

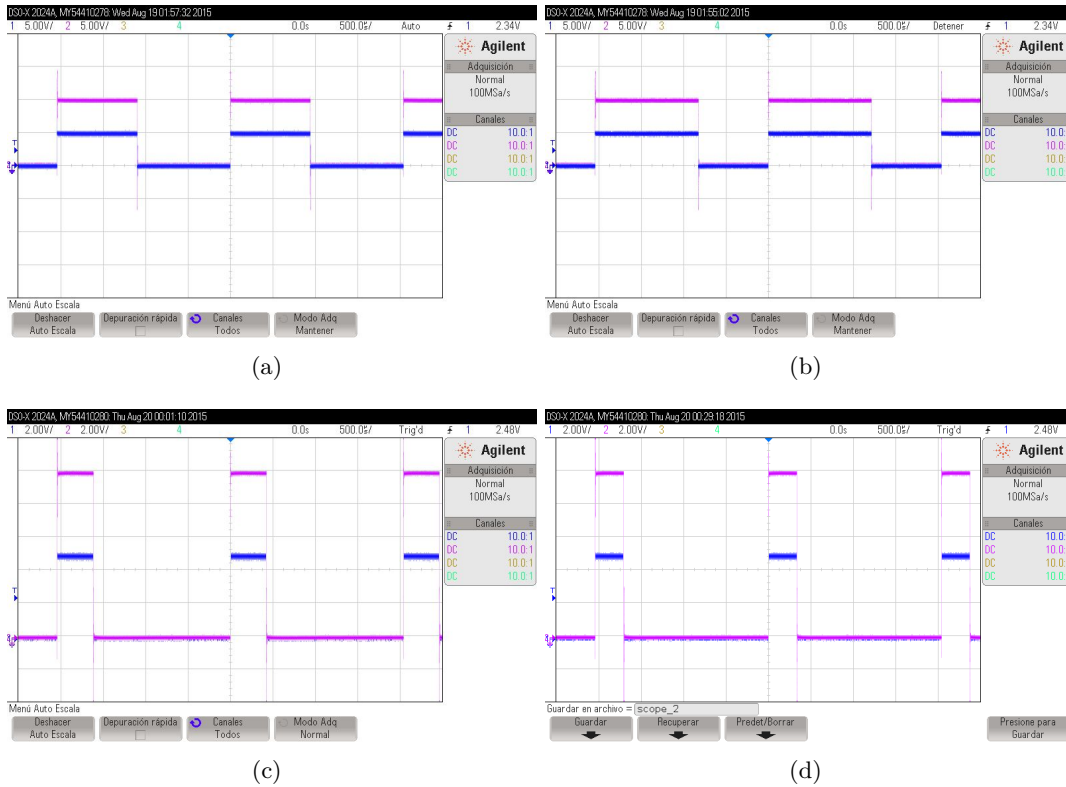


Figura 6.6: Pruebas del sistema completo en protoboard.

### 6.3. Pruebas Realizadas en Implementación

En esta sección se muestran las pruebas realizadas con la tarjeta electrónica. Primero se probó todo el sistema usando una fuente de voltaje simétrica de 24 volts. Posteriormente se construyó una fuente para acoplarla con todo el sistema. El diseño de la fuente y su implementación se muestra en el Apéndice [F].

En la figura (6.7) se ilustra la conexión de la primera prueba realizada con la tarjeta electrónica. En el osciloscopio se observa la señal de control dirigida al controlador de la válvula, el display muestra la lectura de concentración de CO<sub>2</sub> realizada por el sensor y el valor de la señal de referencia. En la computadora se muestra la interfaz donde el usuario puede ver en tiempo real el valor medido de CO<sub>2</sub> en una gráfica donde también se puede observar el valor

de la referencia.

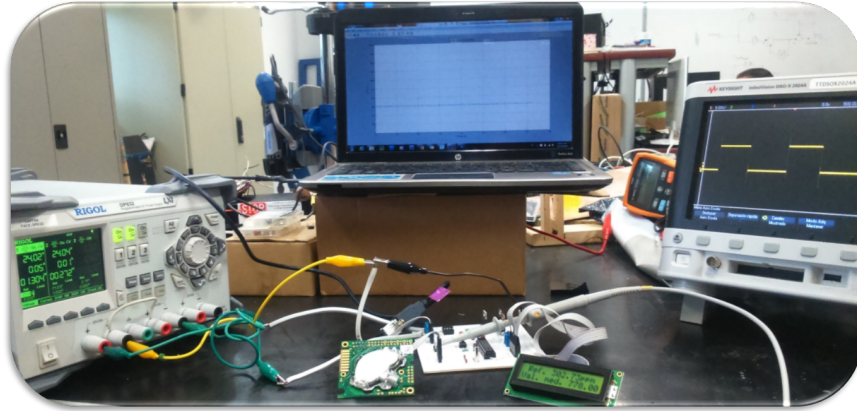


Figura 6.7: Pruebas realizadas con la tarjeta electrónica.

La interfaz se logra por medio de comunicación serial con la tarjeta diseñada y un programa en MatLab en la computadora. La interfaz se diseñó con la finalidad de que el usuario tuviera una interacción más cómoda con el sistema de control. En la figura (6.8) se ilustra la ventana que el usuario verá mientras el sistema este funcionando dentro del microclima.

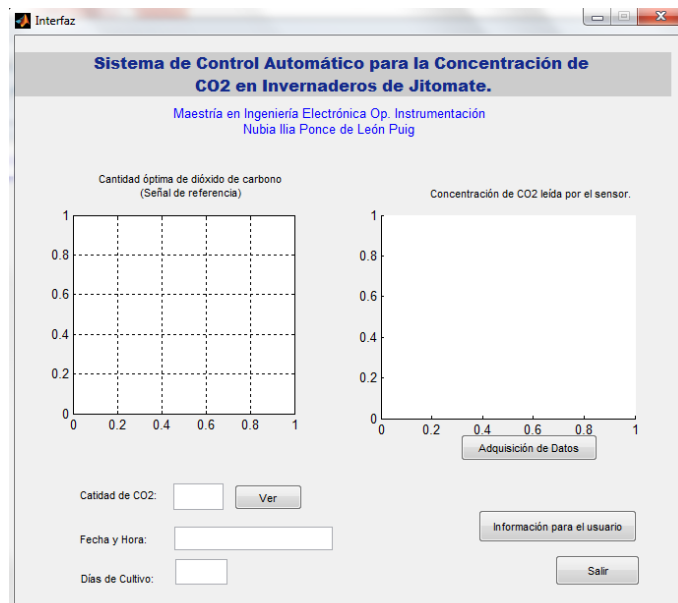


Figura 6.8: Interfaz de usuario para el sistema de control de CO<sub>2</sub> en microclimas de jitomate.

La figura (6.9) ilustra la gráfica en la que el usuario podrá observar como cambian los valores medidos por el sensor y qué tan cerca o lejos se encuentran estos valores de la señal de referencia. La gráfica en color azul (o) muestra la señal de referencia mientras que la gráfica en color rojo (+) muestra los datos adquiridos del sensor. En la figura (6.9(a)) se puede observar la adquisición de datos sin perturbaciones externas al sistema, mientras que en la

## CAPÍTULO 6. PRUEBAS Y RESULTADOS

### 6.3. PRUEBAS REALIZADAS EN IMPLEMENTACIÓN

figura (6.9(b)) se aplicaron perturbaciones externas para comprobar que la lectura del sensor es correcta y que la comunicación con la interfaz de usuario es adecuada. Para esta prueba no se tuvo acción de control, simplemente se quería asegurar que las lecturas de dióxido de carbono son recibidas desde el sensor y comparadas en una gráfica con la señal de referencia.

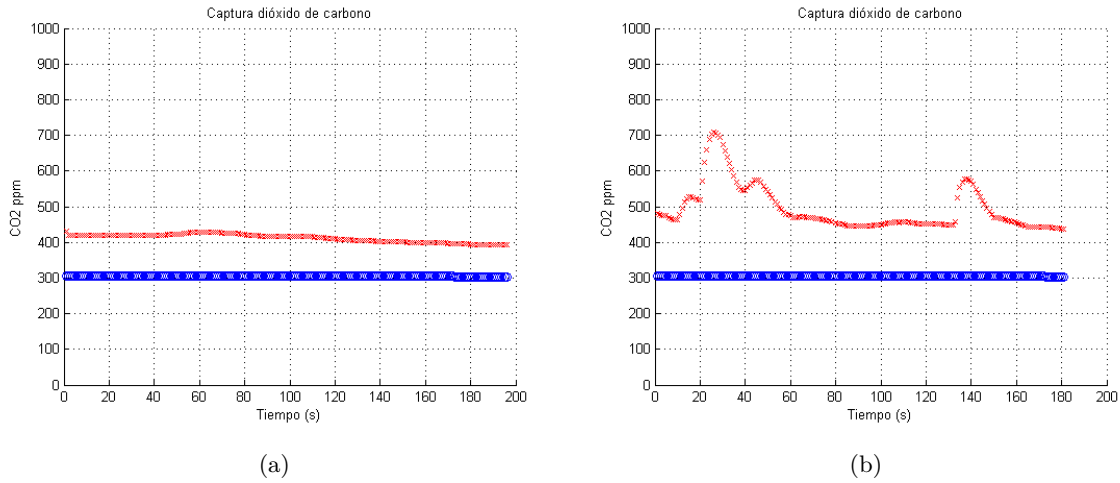


Figura 6.9: Adquisición de datos leídos por el sensor en la interfaz de usuario.

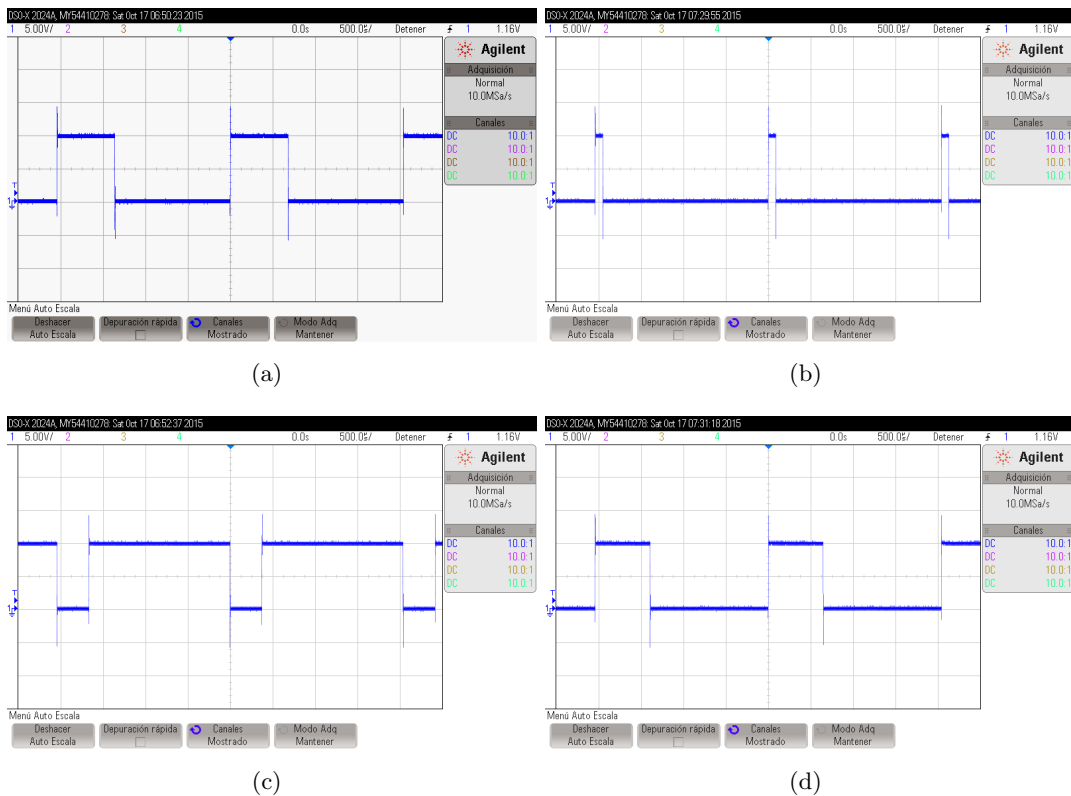


Figura 6.10: Salida de control ante diferentes perturbaciones al sistema.

La idea de crear esta interfaz es que en la grafica de adquisición de datos se pueda observar la acción del control directamente cuando se le apliquen perturbaciones al sistema. De esta forma el usuario sabrá si el control está funcionando correctamente.

Para las pruebas con la tarjeta electrónica se observó la salida de control en un osciloscopio con la finalidad de observar los cambios que presenta la señal ante diferentes perturbaciones. En el conjunto de imagenes (6.10) se observan estos resultados.

## **6.4. Notas Finales Referentes a la Implementación**

Como se ha demostrado en este capítulo, la integración del diseño del software y del hardware para el sistema de control automático de concentración de CO<sub>2</sub> en microclimas de jitomate dio resultados satisfactorios. En esta sección se pretende resaltar algunos aspectos importantes sobre la implementación del sistema con la finalidad de explicar claramente su funcionamiento y aplicación.

- El sistema electrónico controla la concentración de dóxido de carbono a través de una válvual reguladora que hace la función del controlador del sistema. Esto quiere decir que la variable de control es la apertura y cierre proporcional de la válvula que controla el flujo de CO<sub>2</sub> almacenado en un tanque.
- La válvula tiene un controlador que recibe e interpreta una señal PWM, esta señal es la salida de control desde el microcontrolador Atmega328p. Según las especificaciones de la válvula, ésta requiere una frecuencia del PWM de entre 70Hz y 700Hz y la frecuencia recomendada es de 300Hz. Por toro lado, la salida de control del Atmega tiene una frecuencia preestablecida de 500Hz, lo que quiere decir que la señal de control está dentro del rango de operación de la válvula y muy cercana a la operación recomendada.
- Respecto al tiempo de muestreo del sensor, se mencionó anteriormente que se puede modificar en el programa de control. Para las pruebas se decidió un tiempo de muestreo de un segundo, pero para fines de aplicación real se podrá modificar a un tiempo más grande ya que el periodo de cultivo es largo con respecto a la acción de control que se requiere.
- Por las características del software del sistema se presenta un retardo en la comunicación con la interfaz de usuario a través de la comunicación serial. Esto sucede porque, en el programa de control, la lectura del dióxido de carbono, la comparación con la señal de referencia, la acción de control y el envío de datos por el puerto serial se hacen dentro de un mismo ciclo, esto implica que las tareas se realicen secuencialmente y que se pierda tiempo en cumplir el ciclo completo.

Lo explicado anteriormente no significa que se pierda informació o que el usuario no pueda ver las lecturas y la acción del control en la interfaz, simplemente se deberá tomar en cuenta el retardo para cuando se este monitoreando el sistema.

- El sistema está creado para que siga cualquier señal de referencia que se le introduzca al programa. En este caso, la señal de referencia es la cantidad óptima de dióxido de carbono obtenida a partir de la síntesis del control óptimo, pero sí por cualquier cuestión cambia dicha señal de referencia, el sistema electrónico podrá controlar la concentración de dióxido de carbono siguiendo la nueva señal.

## 6.5. Conclusiones

En esta tesis se ha realizado el control automático para la concentración de dióxido de carbono en microclimas de jitomate, el cual se divide en dos partes: el análisis y síntesis del control óptimo y la implementación del sistema electrónico. A continuación se detallan los resultados obtenidos en cada parte del trabajo.

- El primer resultado importante que destaca de este trabajo de tesis fue la integración de los modelos dinámicos microclima-cultivo. La integración de ambos modelos permitió obtener una ley de control a partir de la teoría del control óptimo.
- Se diseñó un programa en MatLab para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales que permitió hacer la comparación del comportamiento de las variables de estado ante diferentes entradas de control, de esta forma se pudo verificar que la ley de control óptimo sintetizada da como resultado la minimización y maximización de las variables de estado como se esperaba.
- Gracias al análisis de la ley de control óptimo se pudo conocer la cantidad de dióxido de carbono óptima que requiere el cultivo de jitomate en cada instante de tiempo. Esto quiere decir que se obtuvo la señal de referencia que debe seguir el sistema electrónico a partir de la teoría del control óptimo aplicada a un sistema dinámico conjunto microclima-cultivo.
- Respecto al sistema neumático involucrado en todo el sistema de control formado por el tanque de dióxido de carbono y la válvula proporcional, se obtuvo una función de transferencia que describe la relación de la entrada con la salida del sistema neumático basado en las características del  $\text{CO}_2$  y el diseño del sistema completo.
- A partir de la función de transferencia del sistema se sintonizó una ley de control clásico PI, que permite que el sistema electrónico realice el seguimiento de la señal de referencia mencionada anteriormente. La sintonización del control PI se hizo a partir de dos métodos con la finalidad de comparar resultados. Los métodos fueron el de análisis de la curva de reacción de Ziegler-Nichols y la sintonización óptima por LQR. Del análisis de resultados se eligió trabajar con el control PI sintonizado por optimización LQR, ya que, dio mejores resultados en cuanto a tiempo de estabilización y porque complementa este trabajo basado en control óptimo.
- Finalmente, se diseñó el sistema electrónico que realiza el control de concentración de dióxido de carbono en microclimas de jitomate. Para el diseño se hizo la selección de los elementos que cumplieran con las características necesarias para cumplir el objetivo. Se

realizó el acoplamiento de dichos dispositivos, se integró todo en un sistema completo y finalmente se hicieron pruebas con el dispositivo, las cuales fueron positivas, ya que se cumplió con el control de CO<sub>2</sub>.

Con los resultados mencionados anteriormente, es posible concluir que este trabajo de investigación cumple con todos los objetivos planteados al inicio y se logró demostrar que se puede tener una aplicación que cumple una necesidad en la sociedad partiendo de un modelo dinámico y de la obtención de una ley de control óptima. Por esta razón, son resultados importantes y que podrían tener un gran impacto en la sociedad, en la economía y en el aspecto científico por ser de los primeros resultados obtenidos en esta área en México.

## 6.6. Trabajo Futuro

Una vez que se concluyó que los resultados obtenidos fueron exitosos y que se cumplieron todos los objetivos planteados al inicio de esta tesis es posible pensar en los trabajos futuros más próximos relacionados con este tema.

En primer lugar se piensa obtener resultados de simulación en un tiempo de cultivo completo, ya que en este trabajo sólo se cubren las dos primeras semanas del cultivo en simulación, aunque el resultado analítico sí se obtuvo para todo el periodo de cultivo de jitomate.

Otro objetivo a futuro será probar el sistema electrónico en microclimas reales de jitomate y analizar y comparar los resultados de usar el control de CO<sub>2</sub> con los resultados de invernaderos que no usan ningún tipo de control.

Respecto a la teoría del control óptimo se plantea a futuro obtener una ley de control sobre las variables de temperatura y humedad junto con la variable de CO<sub>2</sub> para tener un sistema de control óptimo completo en microclimas y que puedan ser utilizados para optimizar la producción. Esto es un trabajo a largo plazo, ya que las características del sistema como la cantidad de variables complican la síntesis del control óptimo.

Y finalmente, respecto al dispositivo electrónico, en un futuro, se espera mejorarlo considerablemente creando una interfaz más amigable para el usuario, implementando una comunicación remota y alguna aplicación para que el usuario pueda monitorear el comportamiento del sistema desde cualquier lugar donde se encuentre.

Como se puede deducir, esta tesis tiene mucho trabajo por delante, y todavía quedan muchas áreas de investigación que permitan mejorar los sistemas de control de climas en invernaderos y que finalmente permitan crear un producto que pueda ser utilizado en microclimas con diferentes características y que mejoren significativamente la producción de jitomate en microclimas de todo México.

# Apéndice A

## Diseño Electrónico

En este apéndice se muestra el diseño electrónico para el sistema de control de concentración de dióxido de carbono. En el diseño se incluyen los componentes descritos en el capítulo 5 y los componentes para el acoplamiento de señales.

En la figura (A.1) se ilustra el diseño electrónico, el cual se realizó con el software Proteus Isis.

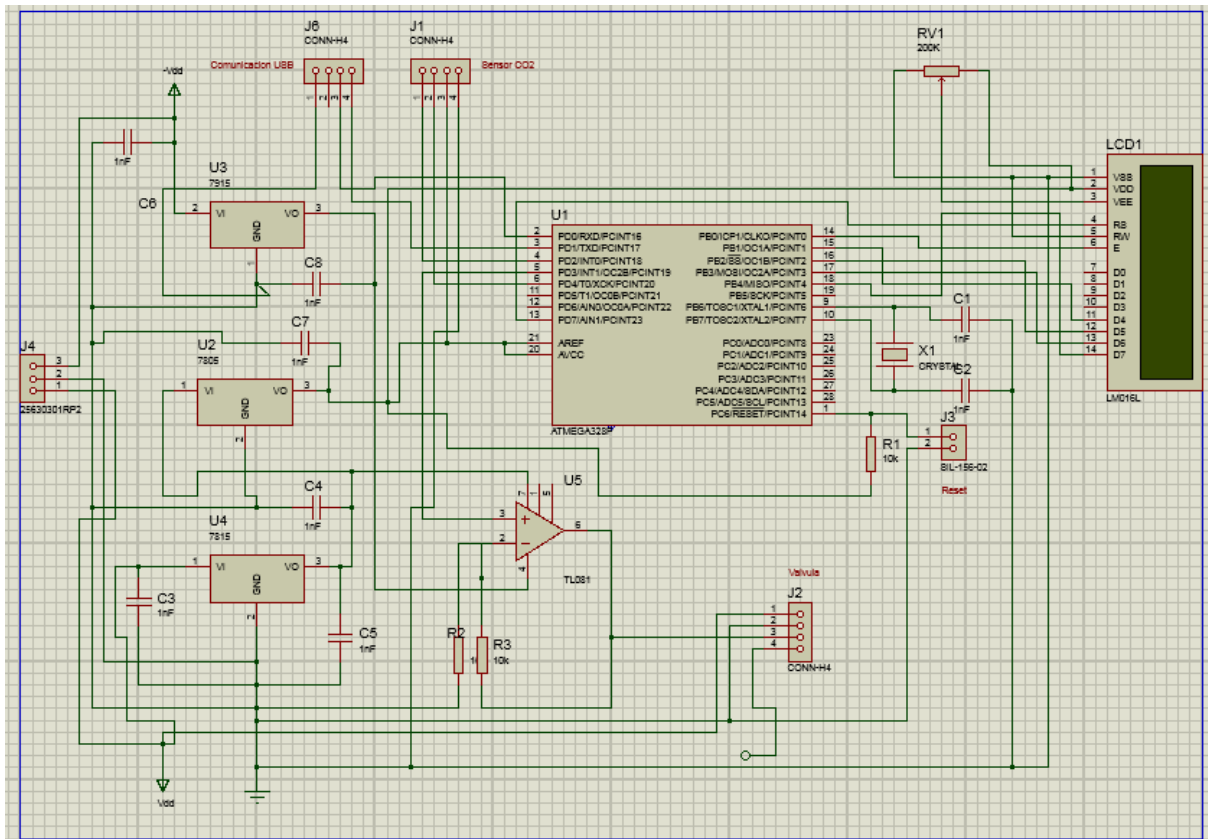


Figura A.1: Diseño electrónico en Proteus.



## Apéndice B

# Diseño del PCB

A partir del plano electrónico de la figura (A.1) se usó Proteus Ares para realizar el enrutado, ubicación y edición de los componentes para la fabricación de la placa con el circuito impreso (Figura B.1).

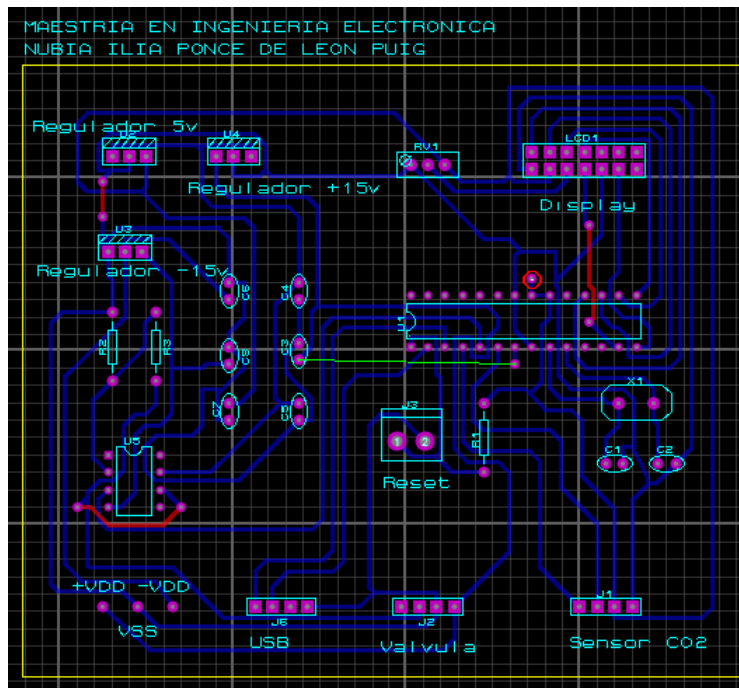


Figura B.1: Diseño electrónico para el circuito impreso.

Posteriormente se obtiene el diseño para su impresión (Figura B.2), este es el impreso que se pasará a la placa de cobre para la implementación del circuito.

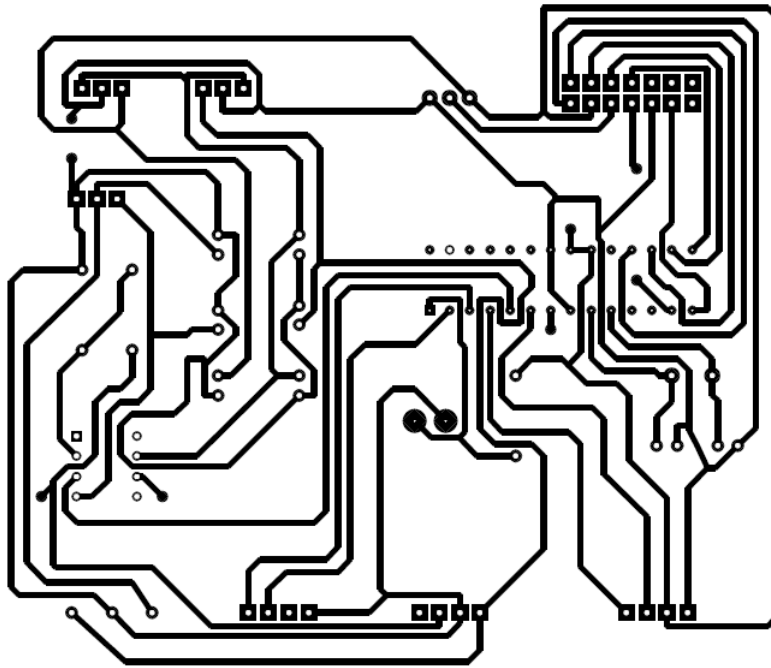


Figura B.2: Diseño electrónico impreso para placa.

MAESTRIA EN INGENIERIA ELECTRONICA  
 NUBIA ILIA PONCE DE LEON PUIG

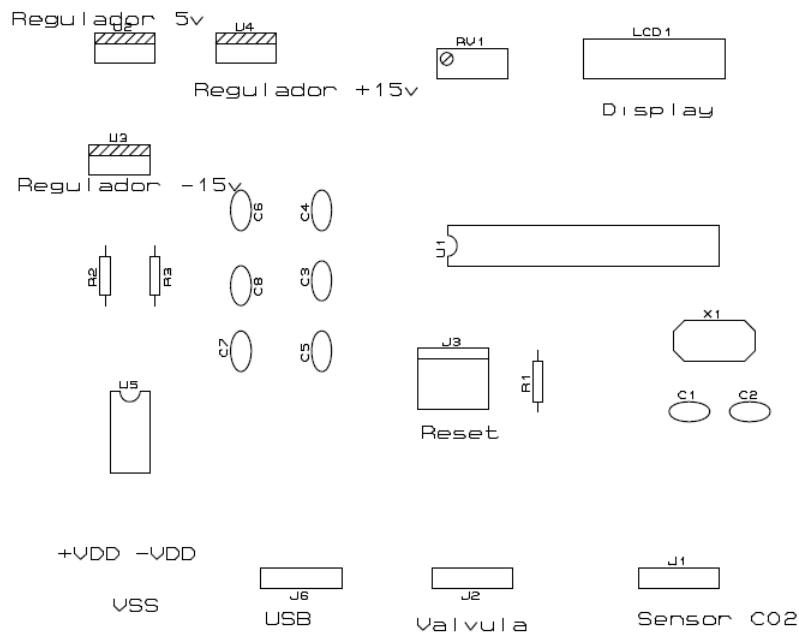


Figura B.3: Diseño del circuito impreso para placa, cara frontal.

## Apéndice C

# Listado de Componentes

En la siguiente tabla se enlistan todos los componentes electrónicos utilizados en la fabricación de la tarjeta electrónica para el control de dióxido de carbono en microclimas de jitomate.

<b>Cantidad</b>	<b>Componente</b>	<b>Descripción</b>
1	K-30, 10,000 ppm	Sensor de CO <sub>2</sub> .
1	8202 ASCO	Válvula proporcional solenoide.
1	908 ASCO	Controlador para válvula proporcional.
1	Atmega 328p	Microcontrolador.
1	7805	Regulador de voltaje +5v.
1	7815	Regulador de voltaje +15v.
1	7915	Regulador de voltaje -15v.
1	TL081	Amplificador operacional.
1	Pushbotton	Botón para reset.
1	Crystal 16Mhz	Oscilador para el microcontrolador.
1	LCD	Display de salida, interfaz con el usuario.
1	Resistencia	1K $\Omega$ .
2	Resistencia	100K $\Omega$ .
2	Capacitores	22pF.
3	Capacitores	100mF.
3	Capacitores	33pF.
1	DB-9	Conector macho-hembra.
1	Modulo FTDI Arduino	Conensor USB-serial, interfaz Arduino.

Tabla C.1: Componentes electrónicos usados en la implementación del sistema.



## Apéndice D

# Descripción de Terminales de Componentes

### D.1. Sensor K-30, 10,000 ppm CO<sub>2</sub>

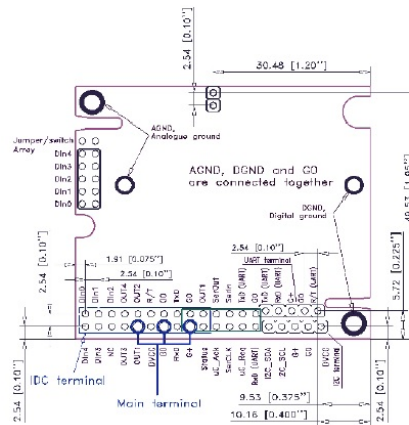


Figura D.1: Descripción de terminales del sensor.

### D.2. Atmega 328p

(PCINT14/RESET) PC6	1	28	PC5 (ADC5/CL/PCINT13)
(PCINT16/RXD) PD0	2	27	PC4 (ADC4S/DA/PCINT12)
(PCINT17/TXD) PD1	3	26	PC3 (ADC3/PCINT11)
(PCINT18/INT0) PD2	4	25	PC2 (ADC2/PCINT10)
(PCINT19/XOC2/AN1) PD3	5	24	PC1 (ADC1/PCINT9)
(PCINT20/XCK/T0) PD4	6	23	PC0 (ADC0/PCINT8)
VCC	7	22	GND
GND	8	21	AREF
(PCINT6/XTAL1/TOSC1) PB6	9	20	AVCC
(PCINT7/XTAL2/TOSC2) PB7	10	19	PB5 (SCK/PCINT5)
(PCINT21/OC0B/T1) PD5	11	18	PB4 (MISO/PCINT4)
(PCINT22/OC0A/AIN0) PD6	12	17	PB3 (MOSI/VOC2A/PCINT3)
(PCINT23/AIN1) PD7	13	16	PB2 (SS/OC1B/PCINT2)
(PCINT0/CLK/MCP1) PB0	14	15	PB1 (OC1A/PCINT1)

Figura D.2: Descripción de terminales del microcontrolador.

### D.3. Controlador de la Válvula ASCO

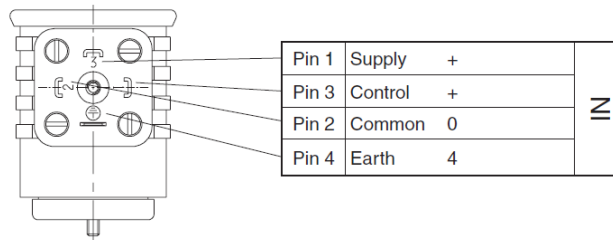


Figura D.3: Descripción de terminales del controlador para la válvula.

### D.4. Amplificador Operacional TL081

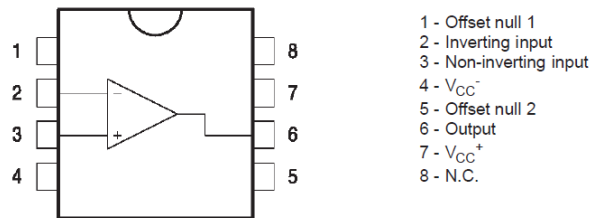


Figura D.4: Descripción de terminales del amplificador operacional.

### D.5. Reguladores de Voltaje

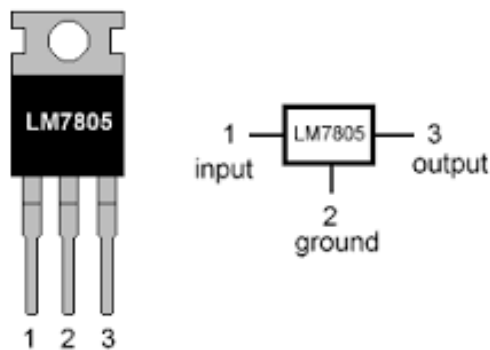
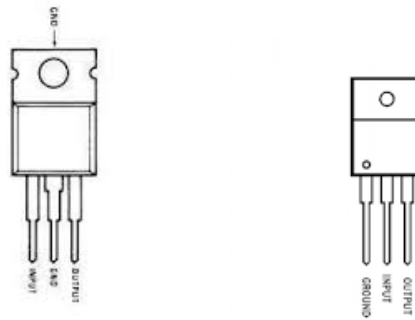


Figura D.5: Descripción de terminales del regulador de voltaje 5v.

APÉNDICE D. DESCRIPCIÓN DE TERMINALES DE COMPONENTES  
D.5. REGULADORES DE VOLTAJE

---



(a) Descripción de terminales del regulador de voltaje +15v.  
(b) Descripción de terminales del regulador de voltaje -15v.

Figura D.6: Descripción de terminales de los reguladores de voltaje +15v, - 15v.



## Apéndice E

# Implementación del Sistema Electrónico

En esta sección se presentan los pasos que se siguieron para la implementación del circuito a partir del diseño electrónico de la figura (B.3).

Se graba el diseño a una placa de cobre con las medidas necesarias y después se imprime el circuito en la placa (Figura E.1). Posteriormente se soldan los componentes a la placa y el resultado es un una tarjeta electrónica con interfaz de entrada para alimentación y salida para la conexión de la pantalla LCD, la válvula y el sensor (Figura E.3 ).

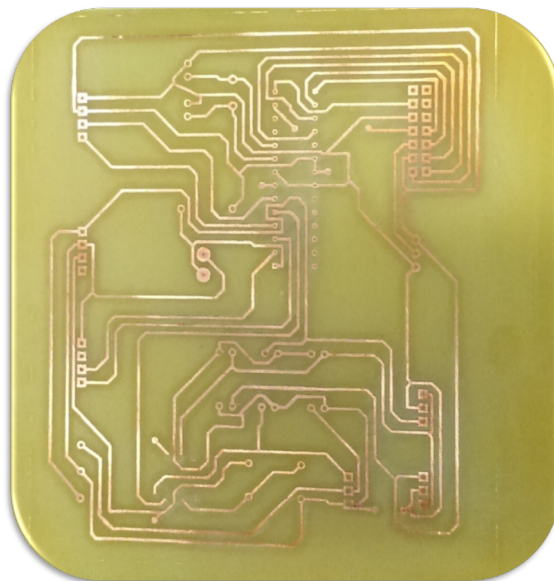


Figura E.1: Circuito impreso en la placa de cobre.

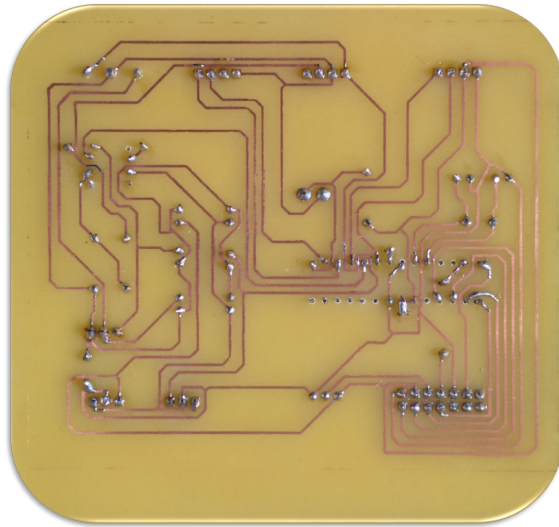


Figura E.2: Elementos soldados al circuito.

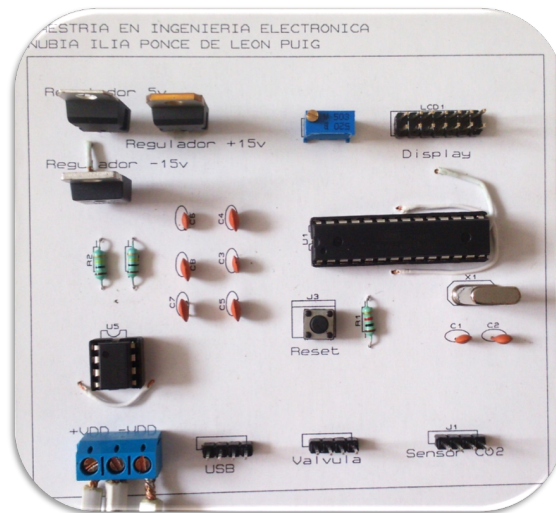


Figura E.3: Tarjeta electrónica final.



Figura E.4: Sistema de control integrado.

## Apéndice F

# Diseño e Implementación de la Fuente de Voltaje Simétrica 24v.

En esta sección se muestra el diseño electrónico para la fuente de voltaje simétrica de 24 volts. La imagen (F.1) ilustra el diseño en Proteus Isis.

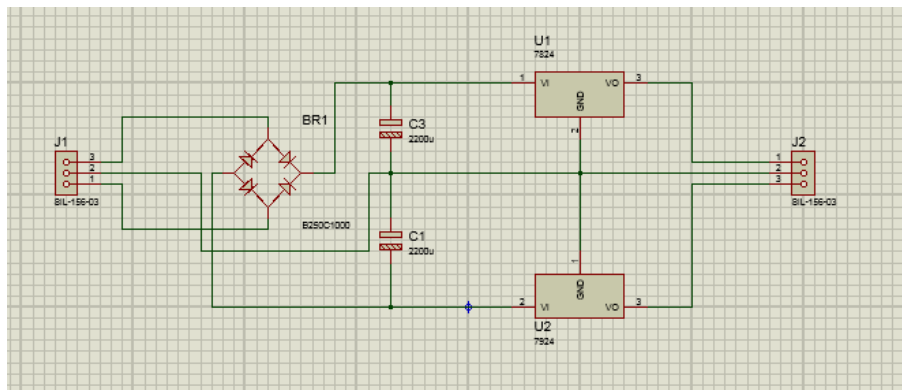


Figura F.1: Diseño electrónico de la fuente simétrica de 24 volts.

Posteriormente se realizó el ruteado de los componentes dentro del diseño para la realización del PCB (Fig. F.4). Los diseños para la impresión del PCB se muestran en la figura (F.3).

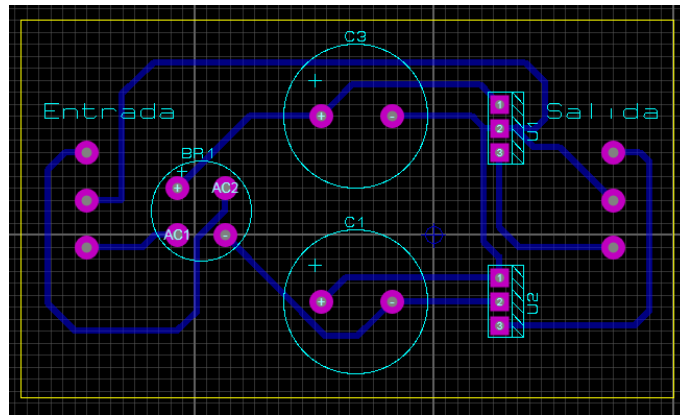


Figura F.2: Diseño del PCB para la fuente de voltaje simétrica de 24 volts.

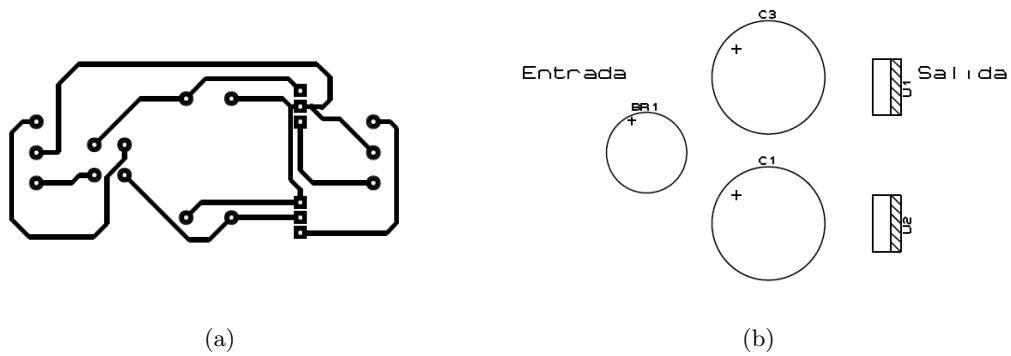


Figura F.3: Diseño para la impresión del PCB.

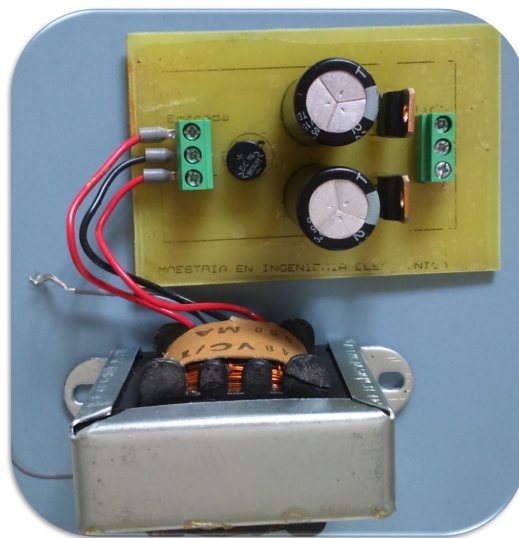


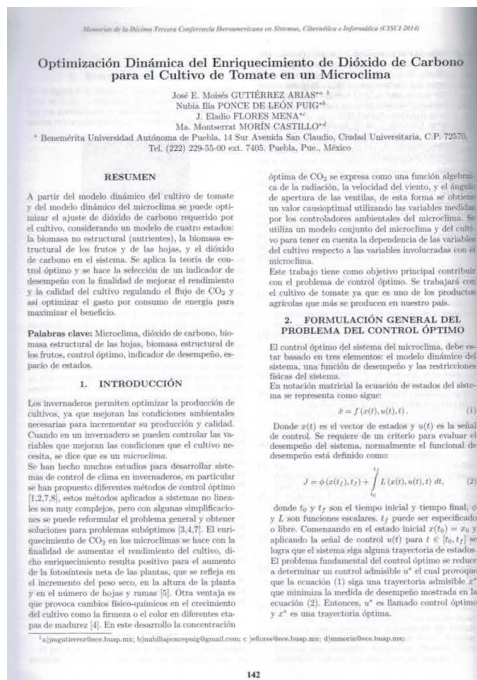
Figura F.4: Implementación final de la fuente de voltaje simétrica de 24 volts.

# Apéndice G

## Participación en Congresos

En esta sección se enlistan las participaciones en congresos nacionales e internacionales.

- Décima Tercera Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática



(a) Artículo publicado en las memorias del congreso.



(b) Portada de las memorias del congreso.

Figura G.1: Memorias de la conferencia.



Figura G.2: Constancia de participación.



Figura G.3: Reconocimiento al mejor trabajo de la sesión.

- First International Conference on Mathematics and its Applications



Figura G.4: Constancia de participación.



Figura G.5: Programa de las conferencias.

- International Conference on Circuits, Systems and Signal Processing

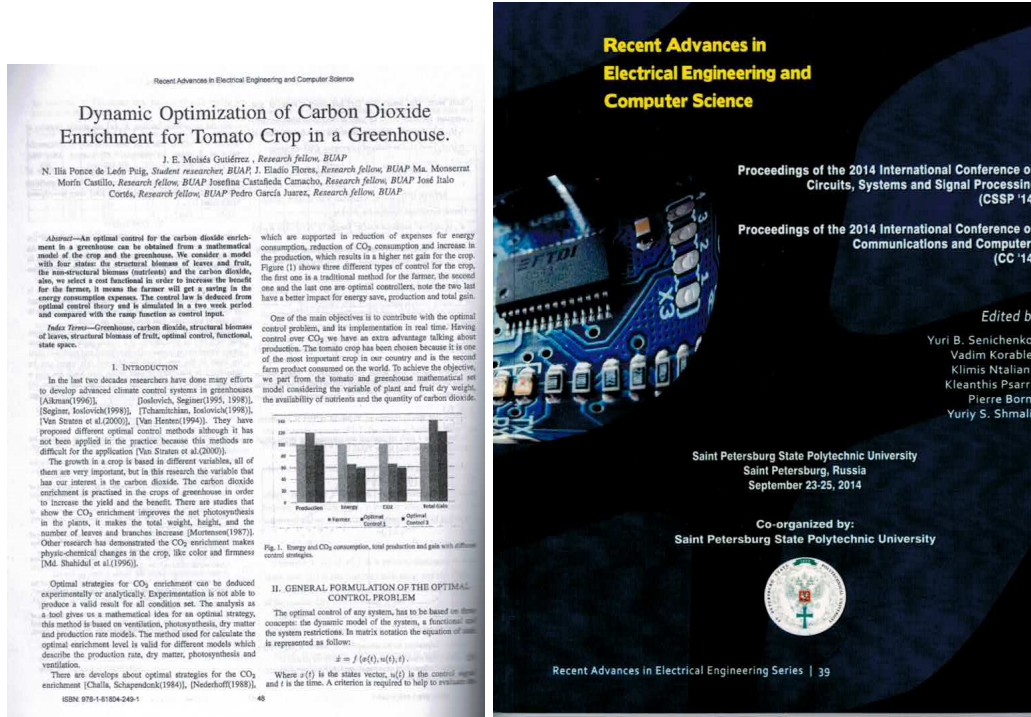


Figura G.6: Memorias de la conferencia.



Figura G.7: Constancia de participación.

- XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático

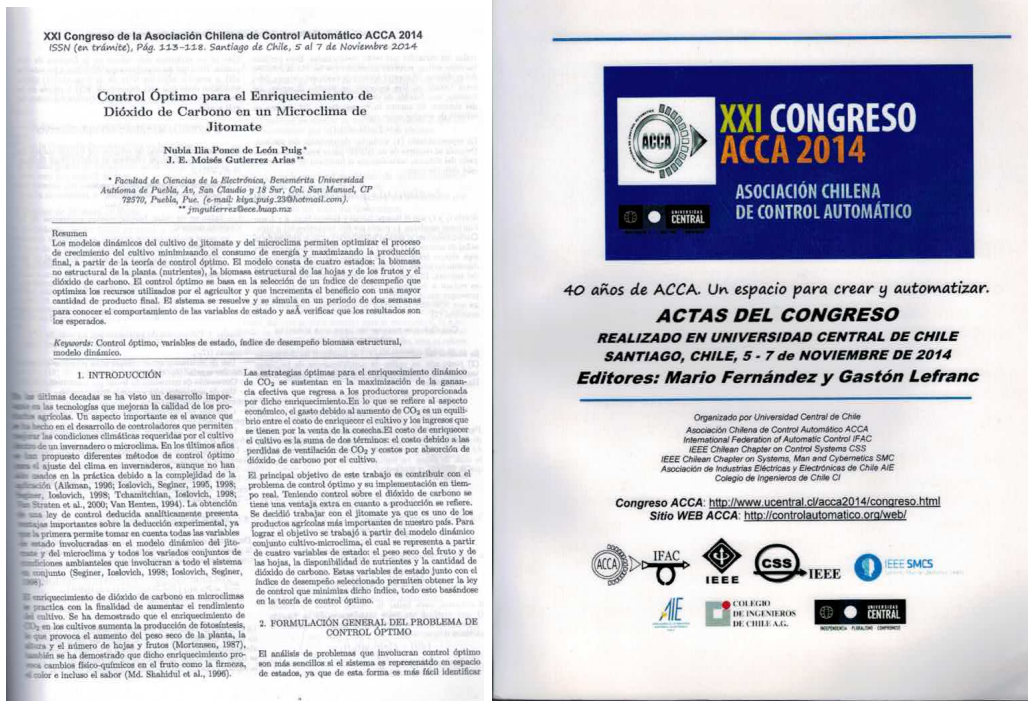


Figura G.8: Constancia de participación.



Figura G.9: Libro de resúmenes del congreso.

■ XXI Congreso Asociación Chilena de Control Automático



(a) Artículo publicado en las memorias del congreso.

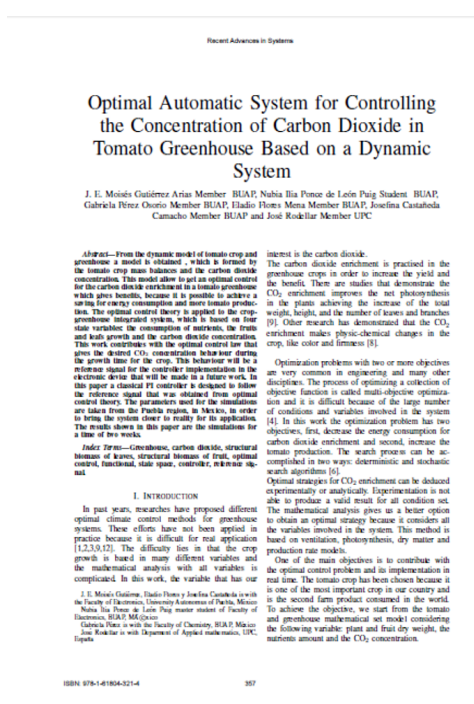
(b) Portada de las memorias del congreso.

Figura G.10: Memorias de la conferencia.



Figura G.11: Constancia de participación.

■ 19 International Conference On Systems, Circuits and Signal Processing



(a) Artículo publicado en las memorias del congreso.

(b) Portada de las memorias del congreso.

Figura G.12: Memorias de la conferencia.



Figura G.13: Constancia de participación.



# Apéndice H

## Estancia Académica

La estancia de investigación se realizó en la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona España y estuvo a cargo del Dr. José Rodellar, jefe del departamento de Matemáticas Aplicadas III.



Figura H.1: Constancia de estancia de investigación.



# Apéndice I

## Publicaciones

Se obtuvo una publicación en la revista Iberoamericana de Sistemas, Cibernética e Informática volumen 11, No. 2, Año 2014.

### Optimización Dinámica del Enriquecimiento de Dióxido de Carbono para el Cultivo de Tomate en un Microclima

José E. Moisés GUTIÉRREZ ARIAS  
Nubia Iliá PONCE DE LEON PUIG  
José E. FLORES MENA

Montserrat MORÍN CASTILLO

Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 14 Sur Avenida San Claudio, Ciudad Universitaria, C.P. 72570, Tel. (222) 229-55-00 ext. 7436. Puebla, Pue., México

#### RESUMEN

A partir del modelo dinámico del cultivo de tomate y del modelo dinámico del microclima se puede optimizar el ajuste de dióxido de carbono requerido por el cultivo, considerando un modelo de cuatro estados: la biomasa no estructural (nutrientes), la biomasa estructural de los frutos y de las hojas, y la concentración de dióxido de carbono. Se aplica la teoría de control óptimo y se selecciona un indicador de desempeño con la finalidad de mejorar el rendimiento y la calidad del cultivo, reduciendo costos por consumo de energía y aumentando la producción final, regulando la concentración de  $\text{CO}_2$ . El sistema se resuelve en MatLab y se simula en un período de dos semanas, con una entrada de control rampa y con la entrada de control deducida a partir de la teoría del control óptimo para comparar los resultados.

**Palabras clave:** Microclima, dióxido de carbono, biomasa no estructural, biomasa estructural de las hojas, biomasa estructural de los frutos, control óptimo, indicador de desempeño, espacio de estados.

#### 1. INTRODUCCIÓN

De todas las actividades para la producción agrícola, la industria de los invernaderos es la que más crecimiento ha tenido. Los invernaderos son estructuras que separan al cultivo del ambiente exterior, esto permite la producción de cultivos en diferentes áreas. Los invernaderos optimizan la producción de cultivos, ya que mejoran las condiciones ambientales necesarias para incrementar su producción y calidad. Cuando en un invernadero se pueden controlar las variables que mejoran las condiciones que el cultivo necesita, se dice que es un *interclima*. Se han hecho muchos estudios para desarrollar sistemas de control de clima en invernaderos, en particular se han propuesto diferentes métodos de control óptimo [1,2,7,8], estos métodos aplicados a sistemas no lineales son muy complejos, pero con algunas simplificaciones se puede reformular el problema general y obtener soluciones para problemas subóptimos [3,4,7].

Las estrategias óptimas para el enriquecimiento dinámico de  $\text{CO}_2$  pueden deducirse experimental o analíticamente, pero la experimentación no es capaz de producir una estrategia óptima que tome en cuenta todo el conjunto de condiciones ambientales, mientras que el método de análisis proporciona un marco matemático que es válido para todos los conjuntos y variables que involucren todas las condiciones ambientales. El enriquecimiento de  $\text{CO}_2$  en los microclimas se hace con la finalidad de aumentar el rendimiento del cultivo, dicho enriquecimiento resulta positivo para el aumento de la fotosíntesis neta de las plantas, que se refleja en el incremento del peso seco, en la altura de la planta y en el número de hojas y ramas [5]. Otra ventaja es que provoca cambios físico-químicos en el crecimiento del cultivo como la firmeza o el color en diferentes etapas de madurez [4]. En este desarrollo la concentración óptima de  $\text{CO}_2$  se expresa como una función algebraica de la radiación, la velocidad del viento, y el ángulo de apertura de las ventillas, de esta forma se obtiene un valor cuasióptimo utilizando las variables medidas por los controladores ambientales del microclima. Se utiliza un modelo conjunto del microclima y del cultivo para tener en cuenta la dependencia de las variables del cultivo respecto a las variables involucradas con el microclima.

Este trabajo tiene como objetivo principal contribuir con el problema de control óptimo. Se trabajará con el cultivo de tomate ya que es uno de los productos agrícolas que más se producen en nuestro país. Teniendo control sobre el dióxido de carbono se tiene una ventaja extra en cuanto a capacidad de producción anual se refiere, el control óptimo sobre el dióxido de carbono busca maximizar la producción de frutos al tiempo que se minimizan costos. Se parte del modelo dinámico conjunto microclima-cultivo tomando en cuenta las variables del peso seco de la planta, peso seco del fruto, disponibilidad de nutrientes y la cantidad de dióxido de carbono.

#### 2. FORMULACIÓN GENERAL DEL PROBLEMA DEL CONTROL ÓPTIMO

El control óptimo del sistema del microclima, debe estar basado en tres elementos: el modelo dinámico del

Figura I.1: Publicación en revista Iberoamericana de Sistemas, Cibernética e Informática.



# Bibliografía

- [1] A. Ritter, N. Machín, and C. Regalado, “Nuevas tecnologías para riego sostenible en planterías,” *Agricultura*, 2000.
- [2] M. Barreiro, J. Olvera, J. R. Olvera, and J. Roque, “De nuestra cosecha: El jitomate,” *Abriendo Surcos*, 2000.
- [3] G. van Straten Gerard van Willigenburg Eldert van Henten, *Optimal Control of Greenhouse Cultivation*. CRC Press, 2011.
- [4] Seginer and Ioslovich, “Seasonal optimization of the greenhouse environment for a simple two-stage crop growth model.,” *Journal of agricultural engineering research*, pp. 145–155, 1998.
- [5] S. Subsecretaría de Agricultura, “Dirección de frutales, hortalizas y ornamentales,” *Programa de apoyo a la inversión en equipamiento e infraestructura*, febrero 2013.
- [6] Ioslovich and Seginer, “Normalized co-state variable for seasonal optimization of greenhouse tomato production.,” *Acta horticultrae*, pp. 87–94, 1995.
- [7] Pucheta, Schugurensky, Fullana, Patino, and Kuchen., “Optimal greenhouse control of tomato-seedling crops.,” *Computers and electronics in agriculture*, vol. 50, pp. 70–82, 2006.
- [8] V. Straten, Challa, and Buwalda, “Towards user accepted optimal control of greenhouse climate,” *Computers and electronics in agriculture*, vol. 26, no. 3, pp. 221–238, 2000.
- [9] Mortensen, “Co2 enrichment in greenhouse.,” *Sci. Horticultrae*, vol. 33, pp. 1–25, 1987.
- [10] M. S. I., T. M., and Yuichi, “Effect of carbon dioxide enrichment on physico-chemical and enzymatic changes in tomato fruits at various stages of maturity,” *Scientia horticultrae*, pp. 137–145, 1996.
- [11] V. Henten, *Greenhouse climate management: An optimal control approach*. PhD thesis, Agricultural University, Wageningen., March 1994.
- [12] Chalabi, “A generalized optimization strategy for dynamic co2 enrichment in a greenhouse.,” *European journal of operational research*, vol. 59, 1992.
- [13] Aikman, “A procedure for optimizing carbon dioxide enrichment of a glasshouse tomato crop.,” *Journal of agricultural engineering research*, vol. 63, no. 2, pp. 171–183, 1996.

- [14] Chalabi, Biro, Bailey, Aikman, and Cockshull, “Optimal control strategies for carbon dioxide enrichment in greenhouse tomato crops - part 1: Using pure carbon dioxide.,” *Biosystems engineering*, pp. 221–228, 2002.
- [15] R. y. P. Financiera Nacional de Desarrollo, Agropecuario, “Panorama del jitomate,” *Secretaría de Hacienda y Crédito Público*, Abril 2014.
- [16] I. N. P. Ramírez, “Diseño e implementación de un sistema de control para el ajuste de temperatura en un invernadero de jitomate,” Master’s thesis, Benémerita Universidad Autónoma de Puebla, 2014.
- [17] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*. Pearson, 3 ed., 1998.
- [18] R. V. G. k. L. S. Pontrygain, V. G. Boltyanskii and E. F. Mishenko, *The Mathematical Theory of Optimal Procces*. Interscience.
- [19] M. H. A. Biswas, “Necessary conditions for optimal control problems with and without state constraint: A comparative study,” *WSEAS TRANSACTIONS ON SYSTEMS AND CONTROL*, June 2011.
- [20] A. J. T. Jerrold E. Marsden, *Cálculo Vectorial*. Pearson, 5 ed., 2004.
- [21] R. L. Mott, *Mecánica de Fluidos*. Perason, Prentice Hall, sexta edición ed., 2006.
- [22] S. das, I. Pan, K. Halder, S. Das, and A. Gupta, “Lqr based improved dsicrete pid controller design via optimum selection of weighting matrices using fractional order integral performance index.,” *Applied mathematical Modelling*, 2013.
- [23] J.-B. He, Q.-G. Wang, and T.-H. Lee, “Pi/pid controller tuning via lqr aproach,” *Chemical Engineering Science*, 2000.
- [24] MODBUS.org, *MODBUS over serial line specification and implentation guide V1.0*, Noviembre 2002.
- [25] A. C. López, *Válvulas de control, selección y cálculo.*, vol. 1. 1 ed., 2014.
- [26] W. Bolton, *Mecatrónica, Sistemas de Control Electrónico en Ingeniería Mecánica y Eléctrica*. Alfaomega, 2da edición ed.
- [27] R. B. Northrop, *Introduction to Instrumentation and Measurments*. Taylor & Francis, second edition ed., 2005.