

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA  
ON/OFF PARA APLICACIONES EN INVERNADERO UTILIZANDO  
ENERGÍA SOLAR Y GAS NATURAL**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

**Luis Alberto Lopez Vargas**

ASESOR: Gustavo Kato Ishizawa

**Lima, noviembre del 2008**

## RESUMEN

El presente documento consta de cuatro capítulos los cuales se exponen a continuación:

1. En el primer capítulo se presenta la problemática del proceso de control de variables ambientales bajo invernadero, los factores del cultivo en ausencia de un sistema de control de variables ambientales y el análisis de la problemática.
2. En el segundo capítulo se presenta el estado de arte de la investigación, la metodología empleada en el control climático bajo invernadero y los conceptos generales del sistema de control. Finalmente, en este capítulo se presenta el modelo teórico de la investigación y las definiciones operativas del sistema de control.
3. En el tercer capítulo se plantea la hipótesis y se definen los objetivos. También se expone la metodología de la investigación y las consideraciones de base para el diseño. Finalmente se muestran los diagramas de bloques, diagramas de esquemáticos de los circuitos del sistema de control, así como también el diagrama de flujo y el esquema del sistema de control.
4. En el cuarto capítulo se muestran los resultados de las pruebas realizadas con los diferentes circuitos diseñados y simulaciones del programa de control. También se exponen los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas y el costo de diseño del sistema de control.

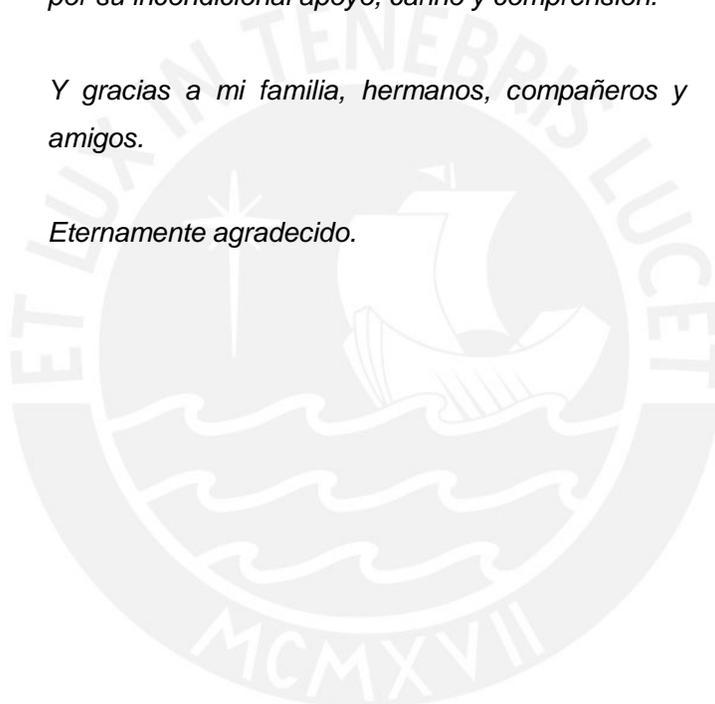
Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo de la investigación del sistema de control ON/OFF de temperatura. También se provee de las recomendaciones para un mejor desempeño del sistema de control.

*A mis Padres*

*Con todo mi amor y cariño para Zoila y Javier,  
quienes me otorgaron lo más bello el mundo y me  
dieron la dicha de ser su hijo, amigo y compañero,  
por su incondicional apoyo, cariño y comprensión.*

*Y gracias a mi familia, hermanos, compañeros y  
amigos.*

*Eternamente agradecido.*



## ÍNDICE

<b><u>ÍNDICE</u></b> .....	<b><i>i</i></b>
<b><u>INTRODUCCIÓN</u></b> .....	<b>1</b>
<b><u>CAPÍTULO 1</u></b>	
<b><u>EL PROCESO DE CONTROL DE VARIABLES AMBIENTALES BAJO INVERNADERO</u></b> .....	<b>2</b>
1.1. El invernadero.....	2
1.2. Situación actual y tendencia del cultivo bajo invernadero en el mundo.....	3
1.3. Situación actual y tendencia del cultivo bajo invernadero en el Perú.....	5
1.4. Factores del cultivo bajo invernadero en ausencia de un sistema de control.....	7
1.5. Declaración del marco problemático.....	8
<b><u>CAPÍTULO 2</u></b>	
<b><u>SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA EN INVERNADERO</u></b> .....	<b>9</b>
2.1. Estado del Arte.....	9
2.1.1. Presentación del asunto de estudio.....	9
2.1.2. Estado de la investigación.....	10
2.2. Control climático en invernadero.....	13
2.2.1. Sistema de control.....	13
2.2.2. Parámetros a considerar en el control climático.....	15
2.2.2.1. Temperatura.....	16
2.2.2.2. Humedad relativa del suelo.....	18
2.2.2.3. Intensidad luminosa.....	19
2.2.2.4. Anhídrido carbónico (CO <sub>2</sub> ).....	21
2.3. Conceptos generales.....	22
2.3.1. Sistema de control.....	22
2.3.2. Homeostasis y entropía.....	22
2.3.3. Controladores.....	23
2.4. Modelo Teórico del sistema de control de temperatura para un invernadero....	24
2.5. Definiciones Operativas.....	25
2.5.1. Indicadores cualitativos.....	25
2.5.2. Indicadores Cuantitativos.....	26

**CAPÍTULO 3**

<b><u>CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA EN UN INVERNADERO</u></b> .....	<b>27</b>
3.1. Hipótesis .....	27
3.1.1. Hipótesis principal .....	27
3.1.2. Hipótesis secundarias .....	27
3.2. Objetivos .....	28
3.2.1. Objetivo general .....	28
3.2.2. Objetivos específicos.....	28
3.3. Metodología de la investigación .....	29
3.3.1. Universo y muestra.....	29
3.3.2. Procedimiento e instrumentos de análisis .....	29
3.4. Consideraciones de base para el diseño.....	30
3.4.1. Diseño mecánico .....	32
3.4.1.1. Explicación básica del funcionamiento de la parte mecánica .....	32
3.4.1.2. Motor DC con caja reductora .....	33
3.4.1.3. Unidad de calefacción a gas (Fuego directo) .....	34
3.4.2. Diseño electrónico .....	36
3.4.2.1. Adaptación de la señal del transductor al controlador .....	36
3.4.2.1.a. Explicación básica del funcionamiento del circuito de adaptación.....	38
3.4.2.1.b. Sensor de Temperatura LM35DZ .....	39
3.4.2.1.c. Amplificador de Instrumentación INA126P .....	40
3.4.2.1.d. Diodo de conmutación de alta velocidad 1N4148 .....	41
3.4.2.2. Sistema de control de temperatura.....	41
3.4.2.2.a. Explicación básica del funcionamiento del circuito de control .....	42
3.4.2.2.b. Controlador megaAVR – ATMEGA8L .....	43
3.4.2.3. Sistema de potencia.....	45
3.4.2.3.a. Explicación básica del funcionamiento del circuito de potencia .....	46
3.4.2.3.b. Circuito controlador de giro de motor L298N.....	47
3.4.2.3.c. Opto acoplador dual MCT6 .....	48
3.4.2.4. Sistema Fotovoltaico .....	49
3.4.2.4.a. Explicación básica del funcionamiento del sistema fotovoltaico... ..	54
3.4.2.4.b. Módulo fotovoltaico policristalino de alto rendimiento KYOCERA modelo LA361J51 .....	54

3.4.2.4.c. Controlador de carga y descarga SunSaver modelo SS-10L-24V .....	57
3.4.2.4.d. Batería de plomo-ácido HOPPECKE de 150Ah. Modelo Solar.Bloc12V150.....	58
3.4.3. Funcionamiento del programa de control .....	59
3.4.3.1. Explicación básica del funcionamiento del programa de control .....	63
3.5. Diagramas de bloques y de esquemáticos de los circuitos del sistema de control de temperatura .....	63
3.5.1. Diagramas de bloques .....	63
3.5.2. Diagramas esquemáticos de los circuitos.....	655
3.6. Diagrama de flujo y esquema del sistema de control de temperatura.....	71
3.6.1. Diagrama de flujo del programa.....	71
3.6.2. Esquema del sistema de control de temperatura .....	73
<b><u>CAPÍTULO 4</u></b>	
<b><u>PRUEBAS, SIMULACIÓN, RESULTADOS Y ANÁLISIS DE COSTOS</u></b> .....	<b>74</b>
4.1. Pruebas.....	74
4.1.1. Prueba del circuito de adaptación de señal.....	74
4.1.2. Prueba del circuito de potencia.....	76
4.1.3. Prueba del circuito de control.....	76
4.2. Simulaciones .....	76
4.2.1. Simulación del programa.....	76
4.3. RESULTADOS .....	78
4.4. ANÁLISIS DE COSTOS .....	78
<b><u>CONCLUSIONES</u></b> .....	<b>80</b>
<b><u>RECOMEDACIONES</u></b> .....	<b>82</b>
<b><u>ANEXOS</u></b> .....	<b>83</b>
<b><u>BIBLIOGRAFÍA</u></b> .....	<b>84</b>

## INTRODUCCIÓN

En las tres últimas décadas, la agricultura en el mundo ha sufrido una transformación. Terrenos semiáridos con escaso aprovechamiento agrícola han pasado a ser fuente de una agricultura de vanguardia, capaz de obtener un alto nivel productivo tanto por su cantidad, como por su calidad.

Este gran avance ha sido posible gracias a la aparición de los invernaderos, que actualmente son el método de cultivo que otorga grandes ventajas con respecto a la agricultura tradicional (reducción del tiempo de cultivo, protección contra climas adversos, entre otros).

La gran mayoría de invernaderos implementados en las regiones del Perú ofrecen condiciones de temperatura inadecuadas para un ambiente de crecimiento y de desarrollo de las plantas cultivadas en invernadero.

Debido a que estos invernaderos carecen de un sistema de control de temperatura, es de suma importancia realizar el diseño de este sistema de control para poder regular la temperatura interna del invernadero y así obtener un producto de mejor calidad a lo obtenido en cultivos sin este tipo de control.

Por medio de este sistema de control será posible medir y controlar la temperatura, lo cual condiciona el ambiente interno en el invernadero.

Por lo tanto, el objetivo de éste trabajo de tesis es diseñar un arreglo de sensores que midan la temperatura interna en el invernadero y mediante el uso de un controlador se logre dar autonomía al invernadero para optimizar las condiciones climáticas (temperatura interna) y obtener un mejor desarrollo de las plantas cultivadas.

## CAPÍTULO 1

### EL PROCESO DE CONTROL DE VARIABLES AMBIENTALES BAJO INVERNADERO

La tecnología para la producción de alimentos en invernaderos ha avanzado considerablemente en los últimos 20 años. Dicha producción, es frecuentemente denominada Agricultura en Ambiente Controlado (CEA) [1]. Hoy en día, el uso de la tecnología y/o equipos electrónicos en la agricultura es imprescindible dado que con el uso de éstos se logra alcanzar un máximo desempeño del terreno cultivado. La regulación del ambiente aéreo y radicular es de suma importancia en los sistemas agrícolas, ésta regulación del ambiente recae en los equipos electrónicos.

Los sistemas agrícolas automatizados están equipados para realizar un control de la temperatura del aire y de las raíces, de la intensidad luminosa, del agua y múltiples variables del ambiente, este control protege a los sistemas agrícolas de los climas adversos, creando un ambiente artificial o microclima, el cual ofrece las mejores condiciones de crecimiento y de desarrollo para las plantas.

#### 1.1. El invernadero

El invernáculo o invernadero es un recinto construido en su mayoría a base de vidrio o plástico en el que se mantienen constantes la temperatura, la humedad y otros factores ambientales para favorecer el cultivo de plantas.

El invernadero aprovecha el efecto producido por la radiación solar que, al atravesar un vidrio u otro material traslucido, calienta los objetos que hay detrás de éstos. El cristal o vidrio utilizado en un invernadero trabaja como medio selectivo de la transmisión para diversas frecuencias espectrales, su efecto es atrapar energía en forma de calor dentro del invernadero, calentando el ambiente interior; se puede demostrar este efecto abriendo una ventana del invernadero: la temperatura disminuye considerablemente. Este principio es la base del sistema de enfriamiento automático (auto ventilación) expuesto en *The Physics of Atmospheres* por J. Houghton [2].

En ausencia de un recubrimiento, el calor absorbido se eliminaría por corrientes convectivas y por la emisión de radiación infrarroja. El objetivo del uso de los vidrios o cristales es impedir la transferencia de calor acumulado hacia el exterior por convección y obstruir la salida de una parte de la radiación infrarroja. El efecto es el de acumulación de calor y aumento de la temperatura interna del recinto.

Los vidrios tienen muy poca resistencia al paso del calor por transmisión, de modo que, contra lo que algunos creen, al tener dos temperaturas distintas a cada lado, hay notables pérdidas por transmisión (el vidrio tiene un factor de transmisión  $K = 6.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Como resultado se obtiene que, a mayor temperatura, menor será el efecto de retención del calor. Houghton indicó en *The Physics of Atmospheres* que al aumentar la temperatura aumentarán las pérdidas disminuyendo el rendimiento del sistema [2].

Un ejemplo de este efecto es el aumento de temperatura que toma el interior de los coches cuando están expuestos al sol. Basta una chapa metálica que dé sombra, impidiendo el paso del sol por el vidrio para elevar la temperatura interna.

Desde la antigüedad, se ha utilizado este efecto tanto en construcciones, como en jardinería, por ejemplo las ventanas de las casas en países fríos son más grandes que las de los cálidos, y están situadas en los haces exteriores, para que el espesor del muro no produzca sombra. Los miradores acristalados son otro medio de ayudar al calentamiento de los locales [2].

## **1.2. Situación actual y tendencia del cultivo bajo invernadero en el mundo**

En las tres últimas décadas, la agricultura en el mundo ha sufrido una transformación. Terrenos semiáridos con escaso aprovechamiento agrícola han pasado a ser fuente de una agricultura de vanguardia, capaz de obtener un alto nivel productivo tanto por su cantidad, como por su calidad.

Este gran avance ha sido posible gracias a la aparición de los invernaderos, que actualmente son el método de cultivo que otorga grandes ventajas con respecto a la

agricultura tradicional (reducción del tiempo de cultivo, protección contra climas adversos, entre otros).

Este rápido desarrollo de los cultivos bajo invernadero se ha visto acompañado por un gran avance en materia fitosanitaria, mejora vegetal, técnicas de cultivo y comercialización. Sin embargo, este auge no se ha traducido en una mejora de la estructura y de la ambientación de los invernaderos debido fundamentalmente al largo periodo de tiempo necesario para renovar las estructuras y a la gran inversión necesaria para ello.

La Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit de la Universidad de Costa Rica, acaba de construir en su finca un invernadero de 2,000 m<sup>2</sup> de extensión donde experimenta nuevas formas de cultivos, sino que ha iniciado la capacitación de grupos de agricultores para el empleo de esta tecnología, con miras a otras formas de comercialización y exportación [3].

Según el Dr. Jean Hugues Chailley, especialista de la firma Richel de Francia, “aunque en Europa y EE.UU. el uso de invernaderos surge en el siglo XIX, en América Latina por sus grandes extensiones de tierra, la adopción de este tipo de producción ha sido más lenta”. Sin embargo, en países como Chile y Argentina ya se han empezado a palpar los primeros frutos del uso de esta tecnología, pues mientras allí son capaces de cosechar entre 150 y 250 toneladas de tomate por hectárea bajo invernadero o plástico, la productividad por hectárea de este cultivo a campo abierto en países como Bolivia es de 25 toneladas [3].

Por otro lado España especialista en todo lo referente al desarrollo de la horticultura o floricultura intensiva, es el lugar del mundo donde se encuentra la mayor concentración de invernaderos; solamente en Almería hay 40,000 hectáreas. Cuando en el mundo se habla de este tipo de estructuras y su tecnología, dos países son la referencia. España (antes mencionado) y Holanda, que cuenta con una tecnología muy sofisticada y muy específica para esta área [4].

### 1.3. Situación actual y tendencia del cultivo bajo invernadero en el Perú

El sector agropecuario desempeña un importante papel dentro de la actividad económica del país, su participación sobre el PBI es del orden del 9% y según Conveagro ocupa el 30.5% de la PEA nacional y produce el 70% de los alimentos que consumimos. Su evolución a lo largo de la última década ha sido favorable en relación con el PBI global.

En el país existen 24 climas y 84 zonas de vida sobre un total de 104 que existen en el planeta. Estas características son importantes porque dan lugar a una diversidad biológica que interactúan y son una fuente natural de ventajas comparativas para el cultivo en invernadero en el Perú.

Según el censo de 1993, la superficie agrícola bordea las 5'476,977 hectáreas que equivalen al 16% del total de la superficie del territorio del Perú [5].

En el Perú, donde el área agrícola es reducida, solamente el 6% de la superficie total del país tiene aptitud agrícola, su utilización adecuada supone el manejo integral de un conjunto de variables entre los cuales están la disponibilidad de recursos como: el agua, el clima, el suelo, entre otros. Así tenemos la región costera árida y con déficit de agua, la región de la sierra especialmente las zonas alto-andinas con drásticas variaciones climáticas [6].

El Perú cuenta con el Instituto Nacional de Investigación Agraria, como entidad del Estado y actor protagonista del Sistema Nacional de Innovación Tecnológica Agraria y Agroindustrial (SNIAA), el cual tiene la función integradora y sinérgica con las otras instituciones del sistema, está orientado a incorporar conocimiento tecnológico al sector agrario nacional, contribuyendo al desarrollo sostenible de la agricultura nacional, al incremento de la competitividad, a la seguridad alimentaria y al desarrollo regional y rural del Perú [7].

Las actividades de investigación del INIA son conducidas por la Dirección General de Investigación Agraria (DGIA). Coordina con los agentes nacionales e internacionales del sistema Nacional de Innovación Agraria y Agroindustrial con el fin de promover un desarrollo concertado de conocimiento y tecnología aplicable al incremento de la competitividad del sector agrario [8].

La Estación Experimental Agraria Santa Ana, es otro organismo descentralizado del Ministerio de Agricultura, que desarrolla acciones de investigación y transferencia de

tecnología, considerando el requerimiento y demanda de los usuarios a fin de contribuir al desarrollo sostenible y competitivo de la agricultura.

El cultivo bajo invernadero en el Perú, recién está tomando gran importancia. El motivo principal por el cual el cultivo bajo invernadero en el Perú no es muy utilizado es la falta de capital para la inversión en la construcción del invernadero.

Las primeras investigaciones en el Perú se llevaron a cabo en el invernadero de investigación en La Molina (Facultad de Agronomía e Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional Agraria La Molina). Tiene un área de 625 m<sup>2</sup> y es utilizado para investigaciones en las áreas de fitopatología, entomología, horticultura, fitotecnia y suelos. Fue construido en 1950 con aluminio y vidrio, con techo a dos aguas. Actualmente se encuentra en refacción debido al paso de los años [9].

Un ejemplo actual de implementación de invernadero en el Perú es la reciente inauguración de un invernadero como parte del proyecto de “Desarrollo de la Capacidad de Conservación y Promoción de los Recursos Genéticos”, el pasado 21 de abril del 2006 se inauguró el nuevo invernadero y la sala de trabajo de la Sub Dirección de Recursos Genéticos y Biotecnología (SUDIRGEB) en la Estación Experimental Agraria (EEA) Donoso del Instituto Nacional de Investigación y Extensión Agraria – INIEA en Huaral.

Esta importante obra permitirá al INIEA contribuir con la conservación y multiplicación de los cultivos nativos y naturalizados que se conservan en la EEA Donoso. Además, los profesionales de la SUDIRGEB podrán caracterizar, evaluar y mantener el material genético en óptimas condiciones, para ofrecerlos a los usuarios en general.

Se espera que con esta nueva infraestructura, el INIEA se constituya como una fuente de especies, que realice trabajos de regeneración e incremento del material de muchas especies en problemas y garantice así una mayor cantidad de plantas sanas para el desarrollo de cultivos [10].

#### 1.4. Factores del cultivo bajo invernadero en ausencia de un sistema de control

Los invernaderos representan un cambio estructural en la forma de cultivar y comercializar productos agrícolas. Esta tecnología abre paso a la generación de verdaderas fábricas de alimentos, que será la forma predominante de agricultura en el futuro.

El desarrollo de un sistema de control climático para invernaderos toma vital importancia debido a las consecuencias favorables que este método conlleva para con el cultivo, como la producción en todo el año, precocidad, calidad, control sobre el cultivo, menor consumo de agua, más cosechas por año, mayores rendimientos, producción en lugares marginales y cosecha oportuna. Estas estructuras cuentan con diseños especiales y entre las ventajas más importantes para el agricultor están las siguientes: permite proteger los cultivos de contingencias climatológicas, plagas y enfermedades, además de controlar temperatura, humedad, nutrición y tiempo de riego.

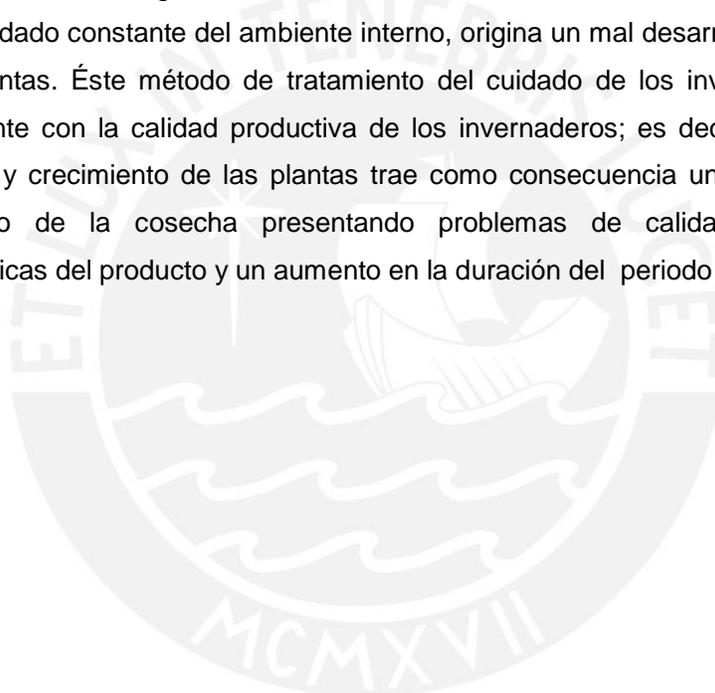
El invernadero es el único sistema de protección que permite el cultivo totalmente fuera de temporada. Las plantas en invernadero necesitan más cuidado y atención en un periodo de tiempo menor al cultivo tradicional; pero los resultados en cuanto a producción son óptimos o las pérdidas son mínimas, en comparación con el tradicional. La calidad del producto final se ve elevada, dándole un valor agregado a la producción.

El cuidado deberá ser minucioso ya que en las condiciones en las que se encuentra el invernadero; ya sea por las condiciones climáticas o por los desperdicios (hojas secas), es un medio de desarrollo de plagas y/o enfermedades de la planta aún mayor que en cultivos tradicionales.

Sin embargo, se sabe por los resultados que un invernadero que cuenta con un sistema de control climático proporciona mejores resultados que un invernadero que no cuenta con uno. En la actualidad un ejemplo vivo es el distrito Almería en España; en el cual, hablar de cultivar en este lugar años atrás era imposible, por las características que presenta el terreno.

### 1.5. Declaración del marco problemático

Todos los invernaderos que carecen de un sistema de control de variables ambientales o climáticas sufren de innumerables variaciones de temperatura que se dan durante las 24 horas del día dentro del invernadero (esto dependiendo de la estación en el cual se encuentra el invernadero), lo cual crea un ambiente interno inadecuado para el desarrollo y crecimiento de las plantas. Estas variaciones de temperatura por la ausencia de un sistema de control de variables que se dan en los invernaderos de las regiones del Perú sumado a la ausencia de recursos humanos para el cuidado constante del ambiente interno, origina un mal desarrollo y crecimiento de las plantas. Éste método de tratamiento del cuidado de los invernaderos afecta directamente con la calidad productiva de los invernaderos; es decir, el inadecuado desarrollo y crecimiento de las plantas trae como consecuencia un mal desarrollo y crecimiento de la cosecha presentando problemas de calidad en cuanto a características del producto y un aumento en la duración del periodo del cultivo.



## CAPÍTULO 2

### SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA EN INVERNADERO

#### 2.1. Estado del Arte

##### 2.1.1. Presentación del asunto de estudio

Actualmente nos encontramos rodeados de equipos y/o sistemas electrónicos muy complejos; esto se debe a que la electrónica se encuentra en un proceso de crecimiento y grandes avances. Gracias a los avances de la electrónica se puede tratar una serie de problemas que antes no era factible.

Hoy en día se están introduciendo, con gran éxito, estos avances tecnológicos al sector agroindustrial obteniendo muy buenos resultados. El cultivo bajo invernadero siempre ha permitido obtener producciones de alta calidad y de mayores rendimientos en cualquier momento del año. A la vez que permiten alargar el ciclo de cultivo, permitiendo producir en las épocas del año más difíciles y obteniéndose mejores precios. Este incremento del valor de los productos permite que el agricultor pueda invertir en tecnologías para el mejoramiento del invernadero como los sistemas de riego localizado y los sistemas de gestión del clima. Esta inversión trae como resultado una mejora de los rendimientos y de la calidad del producto final.

Los controles electrónicos son, hoy en día, de uso generalizado en los invernaderos. Inicialmente se aplicaron para gestionar el aporte de agua y nutrientes a las plantas, optimizando el fertirriego, y se utilizan también para el control de los trabajos de los operarios y, esencialmente, para el control ambiental dentro de los invernaderos.

Estos sistemas de control electrónico se encargan de procesar las señales proporcionadas por un conjunto de sensores, los cuales miden diferentes variables del entorno al cual se desea controlar, obteniendo una respuesta ante una determinada situación.

Los sistemas de control, en general, son implementados en las computadoras de aplicación específica o también conocidos como controladores.

Últimamente una gran cantidad de agricultores han iniciado la instalación de mecanismos que permiten la automatización de la apertura de las ventilaciones, radiómetros que indican el grado de luminosidad en el interior del invernadero,

instalación de equipos de calefacción, riego, etc. Por ello, en el presente estudio se exponen las tecnologías utilizadas y los parámetros más relevantes que intervienen en el control climático de los invernaderos.

### **2.1.2. Estado de la investigación**

La diversificación productiva, tan necesaria en nuestros tiempos, nos indica la necesidad de mejorar nuestros sistemas de producción.

Un invernadero es una herramienta muy útil para producir cultivos fuera de temporada, conseguir mayor precocidad, aumentar los rendimientos, acortar los ciclos vegetativos de las plantas, mejorar la calidad de los cultivos mediante una atmósfera interior artificial y controlada.

Los beneficios que brinda han masificado su uso en la agricultura porque permiten obtener una producción limpia, trabajar el interior durante los días lluviosos y/o en condiciones climáticas adversas (heladas), desarrollar cultivos que necesitan otras condiciones climáticas y evitar los daños de roedores, pájaros, lluvia o el viento.

Se produce un ahorro en la economía, debido a la menor evapotranspiración (pérdida de agua por la evaporación del agua en el suelo) y la transpiración de las plantas, al estar protegidas del viento. Su construcción es simple. Basta una estructura de soporte de madera o metal y una cubierta que puede ser polietileno transparente, policarbonato o vidrios, que lo cubrirá por los cuatro lados y el techo. Así conserva en su interior una buena parte de la temperatura que se produce por el calor del sol o por estufas [11].

Los invernaderos requieren sistemas para regular o controlar la ventilación, la humedad y la temperatura interior.

Las condiciones del crecimiento de los cultivos dentro de los invernaderos, no solamente tienen que ser entendidas de una forma cualitativa, sino además de manera cuantitativa para determinar su impacto sobre la producción. Por tanto, el clima del invernadero puede ser cuantificado en relación a las condiciones externas y a las propiedades físicas del invernadero y su equipamiento como lo demuestra Van De Braak [12].

El crecimiento y desarrollo de los cultivos está influenciado por el clima. Los procesos de fotosíntesis, respiración, división celular, expansión celular, toma de nutrientes y agua se ven modificados principalmente por factores como la temperatura, déficit de presión de vapor, luz y CO<sub>2</sub>. Temperaturas extremas tanto bajas como altas producen la desnaturalización de enzimas y otras proteínas afectando el buen desarrollo de los cultivos, Hanan, Holley y Goldsberry investigaron estos resultados [13]. Los niveles de temperatura que maximizan la producción se sitúan entre 16°C y 20°C para el período nocturno y entre 22°C y 30°C para el diurno para cualquier tipo de cultivo en general. Sin embargo, normalmente divergen del óptimo económico debido a los elevados consumos de energía que ellos suponen, haciéndose necesario gestionar el aporte de calor mediante estrategias de clima. Las estrategias de clima habitualmente implican: utilizar pantallas de ahorro de energía, condicionar el nivel térmico a las distintas fases fisiológicas del cultivo, período diurno-nocturno, saltos térmicos, etc.

La dependencia mostrada por la respuesta fisiológica de muchos cultivos hacia la acumulación de grados-día (integral térmica) permite programarlos en cuanto a fechas de recolección y producción. Un mayor control de la temperatura del invernadero va a determinar, además de un aumento de la producción, un aumento de la calidad del fruto [14].

Debido a las condiciones que se obtienen dentro de los invernaderos las plagas y enfermedades encuentran mejores condiciones para su desarrollo [15].

Existen cuatro tipos de invernaderos:

- **Invernadero frío.**

El invernadero frío es el más económico de mantener, ya que consiste en una estructura que sólo recibe el calor del sol. Si es zona de inviernos fríos, la temperatura interior del invernadero será de aproximadamente 5°C por encima de la temperatura exterior.

Este tipo de invernaderos se usa para sembrar o almacenar plantas de semillero a finales de invierno o primavera (3 ó 4 semanas por delante de la época de plantación en el exterior). También se puede utilizar en verano y hasta principios de otoño para cultivar determinadas plantas. En una zona de inviernos fríos también se puede emplear para guardar las plantas de exterior semi-resistentes.

- **Invernadero fresco.**

Este tipo de invernadero puede mantener una temperatura mínima de 5°C-7°C. Estos invernaderos se calentarían con calor adicional solo durante la noche durante los meses de invierno en zonas de clima frío.

Puede usarse para:

- Proteger a las plantas sensibles a las heladas.
- Para cultivar plantas tres o cuatro semanas antes que en el invernadero frío.
- Para cultivos de estación templada durante el verano.
- Para cultivos de clima fresco durante el otoño e invierno.

- **Invernadero templado**

Este tipo de invernadero puede mantener una temperatura mínima de 13°C con calor adicional durante el día y la noche, dependiendo de su emplazamiento, los costes de calefacción subirán a medida que bajen las temperaturas. Ofrece unas buenas condiciones para el cultivo de hortalizas y de muchas plantas anuales.

- **Invernadero cálido**

Este tipo de invernadero resulta ser el más caro en cuanto a su mantenimiento, ya que mantiene una temperatura mínima de 18°C con la ayuda de calor adicional. Aunque puede resultar demasiado sofocante para muchas hortalizas, puede destinarse al cultivo de plantas tropicales y subtropicales. Para el aporte correcto de agua y nutrientes (solución nutritiva) los controladores procesan las señales proporcionadas por sensores de conductividad eléctrica, pH, volumen drenado y en algunos casos también radiación; y gestionan el aporte de solución a las plantas, y la composición de la misma, mediante electro válvulas. Son dispositivos muy contrastados, no específicos de cultivos forzados bajo plástico, y de uso general en agricultura [16].

## 2.2. Control climático en invernadero

Los controles electrónicos tienen cada vez más importancia en la gestión del clima de los invernaderos.

Todos los equipos de control climático requieren sistemas informáticos para su gestión, debido al gran número de variables e interacciones que se han de tener en cuenta para su manejo. Actualmente estos equipos disponen de sensores capaces de medir las diferentes variables climáticas, principalmente temperatura, humedad relativa o absoluta, radiación solar incidente, concentración de CO<sub>2</sub>, velocidad y dirección del viento, etc. Todos esos datos se registran y representan gráficamente en un ordenador, que además es el encargado de verificar las consignas de control introducidas por el usuario y de enviar las señales pertinentes para que se pongan en funcionamiento o se detengan los distintos equipos de control climático [17].

### 2.2.1. Sistema de control

En las tres últimas décadas, la agricultura de la ciudad de Almería en España ha sufrido una profunda y rápida transformación que continúa hoy día; terrenos semiáridos con escaso aprovechamiento agrícola, han pasado a ser fuente de una agricultura de vanguardia, capaz de obtener un alto nivel productivo tanto por su cantidad y calidad, con más de dos millones de toneladas en 1996. Este gran avance ha sido posible gracias a la aparición de los invernaderos, que actualmente ocupan una superficie superior a las 25,000 hectáreas.

Este rápido desarrollo de los cultivos bajo plástico se ha visto acompañado por un gran avance en materia fitosanitaria, mejora vegetal, técnicas de cultivo y comercialización. Sin embargo, este auge no se ha traducido en una mejora de la estructura y de la ambientación de los invernaderos, debido fundamentalmente al largo período de tiempo necesario para renovar las estructuras, y a la fuerte inversión necesaria para ello.

El invernadero típico de Almería basa parte de su éxito en su sencillez y bajo coste, pero no es lo bastante eficiente en cuanto a su ventilación. Esto provoca una elevada humedad interior, que provoca condensaciones y goteos procedentes de la parte

interior de la cubierta, favoreciendo el ataque de enfermedades criptogámicas, y con ello, el aumento del uso de productos fitosanitarios.

La reducción del uso de productos fitosanitarios resulta imprescindible tanto desde el punto de vista medio ambiental como desde la mejora de la competitividad de nuestros productos.

Además, la falta de ventilación se traduce en un agotamiento de hasta un 80% del CO<sub>2</sub> en la atmósfera del invernadero, llegando a provocar reducciones del crecimiento y del rendimiento.

Para mejorar la ventilación pasiva en el área mediterránea, se han sugerido superficies de ventana entre 18%-25% respecto de la superficie cultivada.

P. Feuilloley, concluye en su estudio sobre la aireación estática de un invernadero, que la altura del cultivo tiene un gran efecto en la tasa de ventilación natural y que el mejor sistema de ventilación debería disponer de apertura lateral del 17% y cenital del 15%, con una superficie de apertura total óptima del 32% de la superficie cultivada [18]. El efecto chimenea que se establece entre la ventilación lateral y cenital es especialmente significativo cuando la velocidad del viento es inferior a 1m/s. Ph. Verheye y H. Verlodt obtuvieron los mejores resultados al comparar diferentes sistemas de ventilación estática, cuando la superficie de apertura era aproximadamente el 30% de la superficie cultivada [19].

El diseño de la ventilación puede realizarse por medio de modelos a escala [20]. Una manera de estudiar la ventilación es generar el flujo en un túnel hidrodinámico con modelos a escala (1:10; 1:50), grabar y digitalizar la imagen, establecer la distribución de temperaturas de la imagen digitalizada y obtener la tasa de ventilación [21].

Para el control ambiental de los invernaderos es necesario modelar su comportamiento, teniendo en cuenta la diversidad de tipos de estructuras y de sistemas de calefacción o refrigeración. Igualmente hay que tener en cuenta los diferentes factores que intervienen: la penetración de la luz, las transferencias de masa y energía y el crecimiento de las plantas.

La ventaja esencial de los modelos es que pueden dar acceso a un juego de consignas de clima, capaces de anticipar el impacto que ejerce una acción sobre los medios de climatización en el proceso estudiado. La modelación de la tasa de ventilación del invernadero es una herramienta esencial del control del clima ya que toda acción sobre el nivel de apertura de la ventana modifica a la vez varias variables de salida (temperatura, humedad relativa y concentración en CO<sub>2</sub> del aire).

Se observan avances, en cuanto a la utilización de algoritmos para la optimización en el manejo del control de la calefacción en invernaderos comerciales. El algoritmo es almacenado en un ordenador, que se comunica con los controladores situados en el invernadero; el cual recibe las predicciones meteorológicas a través de una conexión vía módem.

La utilización de programas informáticos de dinámica de fluidos computacional (CFD) basados en el cálculo numérico, sirven para obtener la distribución de la temperatura y del flujo de aire (vectores de velocidad) dentro del invernadero en función de las condiciones climáticas externas. La modelación del flujo de aire consiste en determinar las variables representativas del flujo (presión, densidad, velocidad, temperatura) en todos los puntos en los que se divide el invernadero. De la variación de esas magnitudes características en el espacio y en el tiempo, se pueden deducir los intercambios de calor y de masa. Estos programas resuelven numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes y la ecuación de conservación de la energía. La aplicación del método de CFD para el análisis de la ventilación en invernaderos ofrece una importante información sobre la influencia del viento y de la temperatura exterior en la ventilación. Actualmente permite el estudio sistemático de la influencia del diseño del invernadero, principalmente del tipo y situación de las ventanas, en el flujo de aire interior.

Hasta la fecha, la aplicación de esta técnica se limita a la investigación y al estudio de la respuesta del invernadero a situaciones particulares y estables en el tiempo. Sin embargo, tanto el avance en los procesos de cálculo numérico como en el de los microprocesadores pueden hacer posible en un futuro no muy lejano la aplicación de la dinámica de fluidos computacional a la gestión del clima del invernadero, de forma cuantitativa y cualitativa mejorando sensiblemente la homogeneidad de los parámetros ambientales y el rendimiento de los equipos y sistemas disponibles en la instalación [17].

### **2.2.2. Parámetros a considerar en el control climático**

Para el desarrollo de los cultivos, en sus diferentes fases de crecimiento, se debe tener en consideración cuatro factores ambientales o climáticos: temperatura, humedad relativa, luz y CO<sub>2</sub>. Para que las plantas realicen sus funciones es necesaria

la integración de los factores y se debe tener en cuenta que estos deben de estar dentro de unos límites mínimos y máximos, fuera de los cuales las plantas no se desarrollan normalmente afectando su metabolismo, pudiendo llegar a la muerte.

### 2.2.2.1. Temperatura

Las plantas necesitan una temperatura adecuada para su crecimiento, de lo contrario éste se detiene. Si ésta desciende a cero grados o menos, los cultivos se pueden dañar seriamente, esto ocurre con los que se encuentran al aire libre, ya sea por efecto de las heladas.

En este sentido, se debe de aprovechar el efecto favorable del invernadero de mantener la temperatura tanto del aire como del suelo, y favorecer el desarrollo de las raíces y de la parte superior de las plantas.

La temperatura es el parámetro más importante a tener en cuenta en el manejo del ambiente dentro de un invernadero, ya que es el que más influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Normalmente la temperatura óptima para las plantas se encuentra entre los 10 y 20° C.

Para el manejo de la temperatura es importante conocer las necesidades y limitaciones de la especie cultivada. Asimismo se deben aclarar los siguientes conceptos de temperaturas, que indican los valores objetivos a tener en cuenta para el buen funcionamiento del cultivo y sus limitaciones [22]:

- **Temperatura mínima letal.**  
Aquella por debajo de la cual se producen daños en la planta.
- **Temperaturas máximas y mínimas biológicas.**  
Indican valores, por encima o por debajo respectivamente del cual, no es posible que la planta alcance una determinada fase vegetativa, como floración, fructificación, etc.
- **Temperaturas nocturnas y diurnas.**  
Indican los valores aconsejados para un correcto desarrollo de la planta.

Tabla 1: Exigencias de temperatura para distintas especies en grados centígrados (°C)

	Tomate y fresa	Pimiento	Berenjena	Pepino	Melón	Sandía
Temp. mínima letal	0 - 2	(-1)	0	(-1)	0 - 1	0
Temp. mínima biológica	10 - 12	10 - 12	10 - 12	10 - 12	13 - 15	11 - 13
Temp. óptima	13 - 16	16 - 18	17 - 22	18 - 18	18 - 21	17 - 20
Temp. máxima biológica	21 - 27	23 - 27	22 - 27	20 - 25	25 - 30	23 - 28
Temp. máxima letal	33 - 38	33 - 35	43 - 53	31 - 35	33 - 37	33 - 37

La temperatura en el interior del invernadero, va a estar en función de la radiación solar, comprendida en una banda entre 200 y 4,000 nm, la misión principal del invernadero será la de acumular calor durante las épocas invernales.

El calentamiento del invernadero se produce cuando el infrarrojo largo, procedente de la radiación que pasa a través del material de cubierta, se transforma en calor, ésta radiación es absorbida por las plantas, los materiales de la estructura y el suelo. Como consecuencia de esta absorción, éstos emiten radiación de longitud más larga que al traspasar por el obstáculo que representa la cubierta, se emite radiación hacia el exterior y hacia el interior, calentando el invernadero.

El calor se transmite en el interior del invernadero por irradiación, conducción, infiltración y por convección, tanto calentando como enfriando. La conducción es producida por el movimiento de calor a través de los materiales de cubierta del invernadero. La convección tiene lugar por el movimiento del calor por las plantas, el

suelo y la estructura del invernadero. La infiltración se debe al intercambio de calor del interior del invernadero y el aire frío del exterior a través de las juntas de la estructura. La radiación, por el movimiento del calor a través del espacio transparente [22].

#### **2.2.2.2. Humedad relativa del suelo**

La humedad es la masa de agua en unidad de volumen, o en unidad de masa de aire. La humedad relativa (HR) es la cantidad de agua contenida en el aire, en relación con la máxima que sería capaz de contener a la misma temperatura.

Existe una relación inversa de la temperatura con la humedad por lo que a elevadas temperaturas, aumenta la capacidad de contener vapor de agua y por tanto disminuye la HR, a temperaturas bajas la HR aumenta.

Cada especie tiene una humedad ambiental idónea para vegetar en perfectas condiciones: la HR del tomate, pimiento y de la berenjena está sobre el 50%-60%; el melón, entre el 60-70%; el calabacín, entre el 65-80% y el pepino entre el 70-90%.

La HR del aire es un factor climático que puede modificar el rendimiento final de los cultivos. Cuando la HR es excesiva las plantas reducen la transpiración y disminuyen su crecimiento, se producen abortos florales por apelmazamiento del polen y un mayor desarrollo de enfermedades criptogámicas. Por el contrario, si es muy baja, las plantas transpiran en exceso, pudiendo deshidratarse.

Para que la HR se encuentre lo más cerca posible del óptimo, el agricultor debe ayudarse del higrómetro (instrumento de medición de la HR del aire). El exceso puede reducirse mediante ventilado, aumento de la temperatura y evitando el exceso de humedad en el suelo. La falta puede corregirse con riegos, llenando canalillas o bassetas de agua, pulverizando agua en el ambiente, ventilado y sombreado. La ventilación cenital en invernaderos con anchura superior a 40 metros es muy recomendable, tanto para el control de la temperatura como de la HR [23].

En el mercado existen equipos que se encargan de solucionar los problemas de la HR, usando el pulverizador de partículas de agua de alta presión con niebla de gotitas de 10 micrones que se evaporan rápidamente en el aire para refrescar y para humedecer el ambiente (El proceso de llenar poros de una membrana hidrofóbica de agua), se mejoran los procesos de la propagación y de la germinación mientras que el sistema mantiene una humedad alta (sobre el 90%) para la producción eficaz.

Los sistemas convencionales tales como cojín y ventilador no proporcionan el refresco requerido o los resultados son desiguales. Los ventiladores grandes requieren e incurren en costes energéticos enormes [22].

La computadora o los sistemas de control análogos controlan con exactitud la humedad y la temperatura a los niveles exigentes de tal modo que reducen costes energéticos. Además, estos sistemas de control pueden integrar el resto de funciones y de los sistemas del invernadero tales como calderas y válvulas de la irrigación.

Los sensores permiten mediante lecturas de humedad, o combinadas con otras de temperatura, obtener índices tan importantes como la humedad relativa, humedad absoluta, punto de rocío, déficit hídrico y déficit de presión de vapor.

Uno de los sensores más utilizados en control climático de invernaderos son los psicrómetros, que miden simultáneamente la temperatura del aire seco y la temperatura de termómetro húmedo, obtenida mediante una mecha de algodón que permanece siempre mojada por medio de un pequeño depósito de agua. Al evaporarse el agua de la mecha, enfría el termómetro proporcionalmente a la humedad del aire ambiente. El termómetro seco indica, por el contrario, la temperatura del aire independientemente de su estado higrométrico. La diferencia existente entre la temperatura de ambos instrumentos permite deducir la humedad relativa del aire conocida la presión atmosférica.

Actualmente existen en el mercado sondas de humedad relativa de tipo capacitivo que utilizan materiales higroscópicos cuya resistencia eléctrica disminuye de forma proporcional a la cantidad de vapor de agua absorbida. Presentan la ventaja con respecto a los psicrómetros de no necesitar mantenimiento riguroso, aunque es muy importante que se realice de forma regular una correcta calibración de la sonda [17].

### **2.2.2.3. Intensidad luminosa**

La medida de la radiación solar global incidente sobre un plano horizontal, exterior al invernadero, se realiza mediante un piranómetro colocado a una altura de dos metros sobre el terreno en las proximidades del invernadero aunque generalmente se sitúa sobre la cubierta del mismo. La medida de la radiación solar global incidente sobre un plano horizontal, interior al invernadero, se debe realizar a la altura de la masa foliar de las plantas, aunque normalmente se coloca muy por encima del dosel vegetal.

El sensor de intensidad luminosa permite la medida de la radiación foto sintéticamente activa (PAR), mediante un diodo semiconductor de silicio, en el cual los rayos luminosos incidentes provocan variaciones en la corriente eléctrica ya que su resistividad experimenta un descenso muy importante cuando se proyecta un haz luminoso cerca de la punta o electrodo montado en su base. Su rango de medida está comprendido entre 380 y 780 nm y su precisión es de menos de un 5% de la radiación medida. Tiene gran sensibilidad y rapidez de respuesta, aunque se ven afectados fácilmente por perturbaciones externas.

Aunque su uso en invernaderos está poco extendido, también es posible determinar la radiación neta y la radiación difusa, mediante sensores similares a los descritos anteriormente [17].

A mayor luminosidad en el interior del invernadero se debe aumentar la temperatura, la HR y el CO<sub>2</sub>, para que la fotosíntesis sea máxima; por el contrario, si hay poca luz pueden descender las necesidades de otros factores.

Para mejorar la luminosidad natural se usan los siguientes medios:

- Materiales de cubierta con buena transparencia.
- Orientación adecuada del invernadero.
- Materiales que reduzcan el mínimo las sombras interiores.
- Aumento del ángulo de incidencia de las radiaciones sobre las cubiertas.
- Acolchados del suelo con plástico blanco.

En verano para reducir la luminosidad se emplean:

- Blanqueo de cubiertas.
- Mallas de sombreo.
- Acolchados de plástico negro.

Es interesante destacar el uso del blanqueo ya que esta labor está en función del desarrollo del cultivo y de las temperaturas, y tiene efectos contradictorios que hay que conocer para hacer un correcto uso. Hay que saber que la planta sombreada se ahila y se producen abortos de flores en determinadas especies sensibles a la luz (especialmente tomate, pimiento y berenjena), por lo que el manejo del riego y de la solución nutritiva tiene que ir unida al efecto que produce el blanqueo. Los plásticos sucios o envejecidos provocan el mismo efecto que el blanqueo [24].

#### 2.2.2.4. Anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>)

El anhídrido carbónico de la atmósfera es la materia prima imprescindible de la función clorofílica de las plantas. El enriquecimiento de la atmósfera del invernadero con CO<sub>2</sub>, es importante en muchos cultivos, tanto en hortalizas como en flores.

La concentración normal de CO<sub>2</sub> en la atmósfera es del 0,03%. Este índice debe aumentarse a límites de 0,1%-0,2%, cuando los demás factores de la producción vegetal sean óptimos, si se desea aprovechar al máximo de la actividad fotosintética de las plantas. Las concentraciones superiores al 0,3% resultan tóxicas para los cultivos.

La concentración de este gas es variable a lo largo del día. Alcanza el máximo de la concentración al final de la noche y el mínimo a las horas de máxima luz que coinciden con el mediodía. En un invernadero cerrado por la noche, antes de que se inicie la ventilación por la mañana, la concentración de CO<sub>2</sub> puede llegar a límites mínimos de 0,005%-0,01%, que los vegetales no pueden tomarlo y la fotosíntesis es nula. En el caso que el invernadero esté cerrado durante todo el día, en épocas demasiado frías, esa concentración mínima sigue disminuyendo y los vegetales se encuentran en situación de extrema necesidad en CO<sub>2</sub> para poder realizar la fotosíntesis.

Los niveles aconsejados de CO<sub>2</sub> dependen de la especie o variedad cultivada, de la radiación solar, de la ventilación, de la temperatura y de la humedad. El nivel óptimo de asimilación del CO<sub>2</sub> está entre los 18°C y 23°C de temperatura, descendiendo por encima del 23°C-24°C. Respecto a la luminosidad y humedad, cada especie vegetal tiene un óptimo distinto.

El efecto que produce la fertilización con CO<sub>2</sub> sobre los cultivos hortícolas, es un aumento de la precocidad de aproximadamente un 20% y aumento de los rendimientos en un 25%-30%, mejora la calidad del cultivo así como la de su cosecha. Sin embargo, no se puede hablar de una buena actividad fotosintética sin una óptima luminosidad. La luz es factor limitante, y así, la tasa de absorción de CO<sub>2</sub> es proporcional a la cantidad de luz recibida además de depender también de la propia concentración de CO<sub>2</sub> disponible en la atmósfera de la planta. Se puede decir que el periodo más importante para el enriquecimiento carbónico es el mediodía, ya que es la parte del día en que se dan las máximas condiciones de luminosidad [22].

La concentración de CO<sub>2</sub> se mide mediante analizadores de gases en el infrarrojo (IRGA) dado que la absorción de radiación infrarroja que se produce en una muestra

de aire es proporcional a su concentración en  $\text{CO}_2$ . La precisión de los sensores por absorción de infrarrojos es de decenas de partes por millón y varía cuando la humedad relativa es elevada, debido a la alta absorción que también origina el vapor de agua [17].

Para el desarrollo de esta tesis, sólo se toma en cuenta la variable temperatura; dejando abierta la posibilidad de el desarrollo de otras tesis que tomen en cuenta las demás variables no analizadas.

### **2.3. Conceptos generales**

#### **2.3.1. Sistema de control**

Un sistema de control está definido como un conjunto de componentes que pueden regular su propia conducta o la de otro sistema con el fin de lograr un equilibrio en el sistema que forman.

Una de sus características es que sus elementos deben ser lo suficientemente sensitivos y rápidos como para satisfacer los requisitos para cada función del control [25].

#### **2.3.2. Homeostasis y entropía**

La homeostasis es la propiedad de un sistema que define su nivel de respuesta y de adaptación al contexto.

Es el nivel de adaptación permanente del sistema o su tendencia a la supervivencia dinámica. Los sistemas altamente homeostáticos sufren transformaciones estructurales en igual medida que el contexto sufre transformaciones, ambos actúan como condicionantes del nivel de evolución.

La entropía de un sistema es el desgaste que el sistema presenta por el transcurso del tiempo o por el funcionamiento del mismo. Los sistemas altamente entrópicos tienden a desaparecer por el desgaste generado por su proceso sistémico. Los mismos deben tener rigurosos sistemas de control y mecanismos de revisión, reelaboración y cambio permanente, para evitar su desaparición a través del tiempo.

En un sistema cerrado, la entropía siempre debe ser positiva. Sin embargo en los sistemas abiertos biológicos o sociales, la entropía puede ser reducida o mejor aun transformarse en entropía negativa, es decir, un proceso de organización más completa y de capacidad para transformar los recursos. Esto es posible porque en los sistemas abiertos los recursos utilizados para reducir el proceso de entropía se toman del medio externo. Los sistemas vivientes se mantienen en un estado estable y pueden evitar el incremento de la entropía y aún desarrollarse hacia estados de orden y de organización creciente [26].

### 2.3.3. Controladores

Los controladores lógicos programables o PLC de *Programmable Logic Controller*, son dispositivos electrónicos muy usados en automatización industrial.

Su historia se remonta a finales de la década de 1960, cuando la industria buscó en las nuevas tecnologías electrónicas una solución más eficiente para reemplazar los sistemas de control basados en circuitos eléctricos con relés, interruptores y otros componentes comúnmente utilizados para el control de los sistemas de lógica combinacional.

Hoy en día, los PLC no sólo controlan la lógica de funcionamiento de máquinas, plantas y procesos industriales, sino que también pueden realizar operaciones aritméticas, manejar señales analógicas para realizar estrategias de control, tales como controladores proporcional integral derivativo (PID).

Los PLC actuales pueden comunicarse con otros controladores y computadoras en redes de área local, y son una parte fundamental de los modernos sistemas de control distribuido. Actualmente el PLC, es el controlador por excelencia en las todas industrias a nivel mundial.

Un microprocesador es un conjunto de circuitos electrónicos altamente integrado para cálculo y control computacional. El microprocesador es utilizado como Unidad Central de Proceso en un sistema microordenador y en otros dispositivos electrónicos complejos como cámaras fotográficas, impresoras y en pequeños aparatos extraíbles de otros aparatos más complejos como por ejemplo equipos musicales de automóviles.

Hoy en día, el uso de microprocesadores como controlador se ha visto desplazado por una serie de alternativas de menor costo y de mayor o similares características para realizar el control en invernaderos.

El FPGA es el acrónimo de *Field Programmable Gate Array* (Matriz de puertas programable por un usuario en el 'campo' de una aplicación). Se trata de dispositivos electrónicos digitales programables de muy alta densidad.

Dado que las características de las FPGA son su flexibilidad, capacidad de procesado en paralelo y velocidad, esto les convierte en dispositivos idóneos para la simulación y depuración en el diseño de microprocesadores, simulación y depuración en el diseño de ASICs (Circuito Integrado para Aplicaciones Específicas), procesamiento digital de señales, sistemas aeronáuticos y militares.

#### **2.4. Modelo Teórico del sistema de control de temperatura para un invernadero**

Para iniciar el diseño de un sistema de control de temperatura bajo invernadero es de mucha prioridad comenzar el análisis tomando conocimiento de las dimensiones del área del invernadero, esto ayudará a realizar una selección óptima del número de sensores y de los mismos sensores y/o componentes adecuados que permitan realizar un buen desempeño dentro de los márgenes requeridos por el sistema a realizar.

Una vez identificado los sensores a utilizar para el invernadero, se deberá de proceder a caracterizar cada uno. Esto nos proporcionará los límites de detección de cada sensor. En la selección de los sensores debe de considerarse los tiempos en los cuales fluye la señal, desde los sensores pasando por la parte de adaptación electrónica hasta el controlador y finalmente hacia los actuadores existentes. Se deberá de elegir los sensores de acuerdo al controlador a usar y a los actuadores (de esta selección depende la precisión del sistema).

Los rangos de temperatura están directamente relacionados con el tipo de cultivo a cultivar; por lo que es indispensable la elección de un tipo de cultivo para poder

determinar los rangos en los cuales los sensores de temperatura se van a emplear en el diseño así como también el tipo de sensor a emplear y la configuración de estos.

El componente más importante en un sistema de control es el controlador, por lo cual realizar una buena selección de este equipo teniendo como referencia la velocidad de respuesta que se requiere del sistema para realizar una optimización de la temperatura interna del invernadero; es de gran importancia para el sistema a diseñar.

## 2.5. Definiciones Operativas

### 2.5.1. Indicadores cualitativos

Permiten conocer la calidad, los grados de mejora de ciertas características clave del proceso de control ambiental en invernadero.

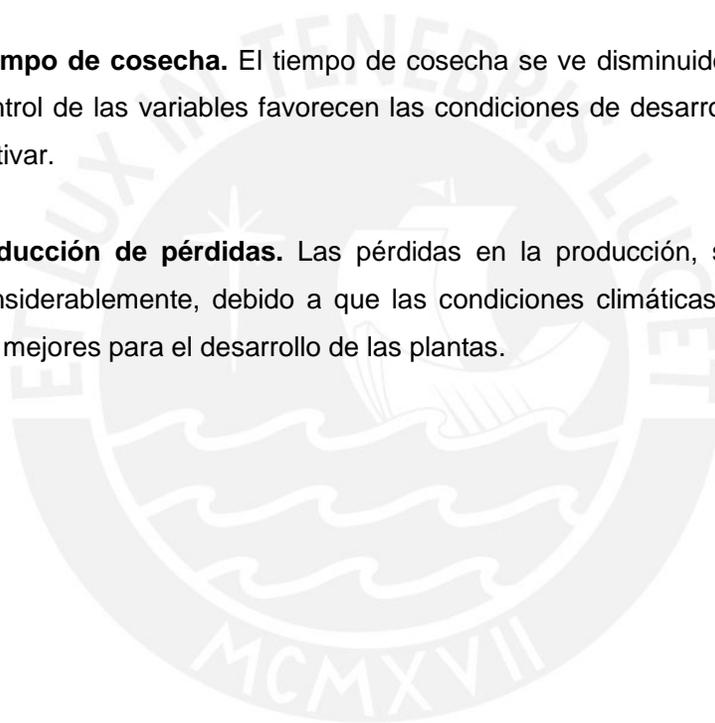
- **Calidad de la cosecha.** La calidad de la cosecha se ve mejorada en una forma muy considerable, pues las condiciones en las cuales las plantas se desarrollan son las óptimas para el cultivo de éstas; el producto final es de muy alta calidad lo cual implica un mayor precio del producto.
- **Control de los recursos.** Se evita la generación de grandes cantidades de residuos, controlando la temperatura para que el ambiente en invernadero sea el óptimo para la cosecha. El control es enfocado hacia una especie de plantación evitando el crecimiento de hierbas que consumen los recursos destinados a las plantas principales.
- **Reducción de aplicación de químicos.** Los nutrientes artificiales utilizados son mínimos o casi nulos, por lo que la cosecha se ve favorecida en cuanto a la calidad de la misma.
- **Temporada de cosecha.** La cosecha en invernadero se puede realizar totalmente fuera de temporada, lo cual permite tener una producción en los 12 meses del año totalmente homogéneo; es decir la calidad del cultivo es

equivalente que cosechar tanto en temporadas altas como en temporadas bajas.

### 2.5.2. Indicadores Cuantitativos

Indica numéricamente los logros o degradaciones de ciertas características del proceso de control ambiental en invernadero.

- **Tiempo de cosecha.** El tiempo de cosecha se ve disminuido debido a que el control de las variables favorecen las condiciones de desarrollo de la planta a cultivar.
- **Reducción de pérdidas.** Las pérdidas en la producción, se ven reducidas considerablemente, debido a que las condiciones climáticas del sembrío son las mejores para el desarrollo de las plantas.



### **CAPÍTULO 3**

#### **CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA EN INVERNADERO**

Para el diseño del sistema de control de temperatura es necesario realizar un análisis de los requerimientos del sistema a diseñar. Por tanto la investigación se inicia en el reconocimiento del problema a solucionar.

##### **3.1. Hipótesis**

###### **3.1.1. Hipótesis principal**

El proceso de desarrollo tecnológico del invernadero es determinado por factores que presentan deficiencias afectando la calidad productiva del invernadero, derivando en dificultades para el cumplimiento de los requerimientos del consumidor final. Entonces, la implementación de un sistema de control de temperatura empleando energía solar y gases naturales con un muestreo constante de la temperatura para el cultivo de una especie específica, permite la introducción de un sistema para el desarrollo del cultivo permitiendo realizar el cultivo fuera de temporada.

###### **3.1.2. Hipótesis secundarias**

- 1) La implementación de un sistema de control de temperatura empleando energía solar y gases naturales permite la optimización del clima dentro del invernadero.
- 2) La implementación de un sistema de control de temperatura en un invernadero otorga cierta autonomía al invernadero durante las 24 horas del día sin depender del hombre constantemente.
- 3) El control de la temperatura en el invernadero, permitirá incrementar la calidad productiva de la cosecha en invernadero; se reducirá el tiempo de duración de

la cosecha gracias a las buenas condiciones ambientales que otorga el sistema dentro del invernadero.

### 3.2. Objetivos

#### 3.2.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de control de temperatura empleando energía solar y gases naturales, para mejorar la producción del cultivo en invernadero, obteniendo como resultado especies de calidad.

#### 3.2.2. Objetivos específicos

- 1) Creación de un ambiente adecuado (microclima) en una muestra de invernadero (maqueta) para mejorar el cultivo.
- 2) Hacer del invernadero una herramienta de cultivo más independiente del hombre, empleando un sistema de control de temperatura en el invernadero para la regulación del ambiente interno del mismo.
- 3) Incrementar la calidad de la cosecha y reducir la duración del tiempo del cultivo en un invernadero.

### 3.3. Metodología de la investigación

#### 3.3.1. Universo y muestra

El universo está formado por los dos invernaderos de propiedad del GRUPO DE APOYO AL SECTOR RURAL-PUCP, los cuales están destinados para el cultivo de especies como tomate, lechuga, fresa, etc.

La muestra que se utilizará para llevar a cabo este trabajo de investigación está conformada por una maqueta de uno de los invernaderos del GRUPO DE APOYO AL SECTOR RURAL-PUCP, en el cual se realizará el diseño del acondicionamiento de las herramientas necesarias para que el ambiente interno mantenga la temperatura adecuada en los rangos de exigencias biológicas de las especies. Para que el cultivo se desarrolle bajo metodologías de control ambiental en invernadero.

#### 3.3.2. Procedimiento e instrumentos de análisis

En lo que se refiere al procedimiento, se detalla a continuación el desarrollo de la investigación:

En el presente capítulo se brinda la información sobre el sistema de control a diseñar y funcionamiento de la misma, así como también del diseño electrónico realizado en la adaptación de la señal a trabajar y de potencia.

Este documento provee las especificaciones técnicas, eléctricas de los equipos utilizados y características funcionales del controlador ATMEGA8L al ser éste el empleado en el diseño del sistema de control propuesto en la presente tesis.

Se proporciona las fuentes de los fabricantes de los distintos dispositivos, para facilitar la labor de integración de este mecanismo con los distintos componentes electrónicos.

Se espera que esta información contribuya con futuras investigaciones en el desarrollo de sistemas de control aplicadas al sector rural.

### 3.4. Consideraciones de base para el diseño

El nivel de respuesta (dinamismo) requerido por el sistema a diseñar no es muy complejo debido a que la variación de temperatura ambiental interna en el invernadero es lenta.

El control del sistema no es crítico; es decir, no está en riesgo vida humana. La referencia de temperatura varía dentro de un rango el cual es manejable por el programa. Los extremos del rango de temperatura con el que se va a realizar el diseño son los mínimos y máximos biológicos permitidos; y no los mínimos y máximos letales para las plantas (Ver Tabla 1).

El número de sensores a emplear depende del volumen del invernadero al cual se desea implementar el sistema a diseñar; es decir, depende del área que debe de cubrir dentro del invernadero y de las ubicaciones que se le otorgue a los diferentes sensores en un plano vertical dentro del área del invernadero para una mayor precisión con respecto a la variable temperatura. La disposición de los sensores afecta directamente al control de temperatura, debido a que ésta no es uniforme en todo el volumen del invernadero, se debe de tomar un promedio de la temperatura de los diferentes sensores en las diferentes posiciones dentro del volumen del invernadero. El programa del controlador se encarga de realizar un promedio de las diferentes temperaturas muestreadas.

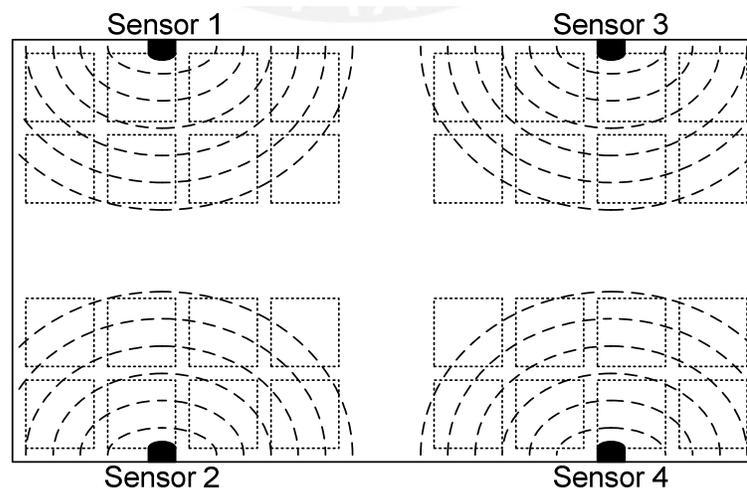


Figura 1: Esquema de distribución de los sensores para la muestra.

Para que la señal de entrada en el módulo de control del sistema se encuentre dentro del rango en el que opera el controlador, la señal que llega al controlador debe de ser acondicionada, se implementa un circuito de adaptación y amplificación de la señal. La elección del valor de la ganancia del amplificador debe de ser acorde con el valor que se requiere a la salida del circuito de adaptación de la señal del sistema.

Con el diseño del sistema de control de temperatura se pretende brindar un control de la variable en mención para otorgar una mejora en el ambiente interno del invernadero; pero hay que tener presente que las variables ambientales dentro de un invernadero están relacionadas directamente unas con otras, tanto así que la modificación del valor de una variable traerá como consecuencia la variación de las demás variables dentro del invernadero.

El tipo de cultivo para el cual se ha realizado el diseño abarca un gran número de cultivos, en el invernadero del grupo de apoyo al sector rural se cultivan las siguientes especies: tomate, pimiento, fresa entre otros; estos cultivos se encuentran dentro del rango adecuado para un buen desarrollo de la planta que es otorgado por el sistema a diseñar.

Para descender la temperatura dentro del invernadero basta con la apertura de las ventanas. Debido a la conducción, infiltración y convección mencionado anteriormente en el ítem 2.2.2.1.

Para el diseño del control de temperatura de un invernadero, se analizaron los requerimientos del sistema en conjunto y se dividió este estudio en tres partes:

- Diseño Mecánico.
- Diseño Electrónico.
- Funcionamiento de la programación.

### 3.4.1. Diseño mecánico

Se definen los distintos mecanismos a implementar para la realización del control de temperatura dentro del invernadero. El método de ventilación dentro del invernadero se realizará por medio de la abertura y cierre de las ventanas del invernadero por el accionamiento de un arreglo de motores eléctricos para que la temperatura disminuya o aumente por transferencia de calor del ambiente interno con el ambiente externo al invernadero (conducción, infiltración y convección). Este método de enfriamiento del invernadero es eficaz y es empleado en ausencia de un actuador que disminuya la temperatura directamente. Como alternativa se puede emplear un par de ventiladores los cuales deberán de ser colocados de manera que el flujo de aire caliente interno del invernadero fluya hacia el ambiente externo del mismo y se refresque el ambiente interno con aire del exterior del invernadero.

Para el calentamiento del invernadero se utilizó un sistema de calefacción a gas, el cual eleva la temperatura del ambiente en pocos minutos (este es fabricado específicamente para aplicaciones en invernaderos), éste equipo es diseñado con las características solicitadas.

#### 3.4.1.1. Explicación básica del funcionamiento de la parte mecánica

Cuando el controlador finalice la operación de comparación del valor de temperatura ambiente interna del invernadero con los valores de temperatura para un desarrollo adecuado de las plantas (temperatura máxima biológica, temperatura mínima biológica y temperatura óptima respectivamente), activará los mecanismos de control (actuadores) de temperatura adecuados dependiendo de los requerimientos del ambiente del invernadero; es decir:

- Si la temperatura que es muestreada en el invernadero es mayor que la temperatura máxima biológica, entonces el controlador activa todos los motores eléctricos abriendo todas las ventanas del invernadero para que, por medio de la transferencia de calor, la temperatura interna del invernadero disminuya considerablemente. Los actuadores restantes permanecen inhabilitados; es decir, la unidad de calefacción permanece desactivada.

- Si la temperatura que es muestreada en el invernadero es menor que la temperatura máxima biológica y mayor que la temperatura óptima, entonces el controlador activa dos de los motores reductores abriendo dos de las ventanas del invernadero para que por medio de la transferencia de calor la temperatura interna del invernadero disminuya. Los demás actuadores permanecen inhabilitados; es decir la unidad de calefacción permanece desactivada.

(En los casos anteriores se puede hacer uso de ventiladores para un mejor control de la temperatura).

- Si la temperatura que es muestreada en el invernadero es menor que la temperatura mínima biológica, entonces el controlador activa la unidad de calefacción a gas y activa a todos los motores eléctricos cerrando todas las ventanas del invernadero, para que por medio de la transferencia de calor entre la combustión del gas y el ambiente interno del invernadero, aumente considerablemente la temperatura en el interior del invernadero.
- Si la temperatura que es muestreada en el invernadero es mayor que la temperatura mínima biológica y menor que la temperatura óptima, entonces el controlador activa todos los motores eléctricos cerrando todas las ventanas del invernadero para que por medio de la transferencia de calor la temperatura interna del invernadero aumente. Los demás actuadores permanecen inhabilitados; es decir la unidad de calefacción permanece desactivada.

Las posiciones de los motores se controlan por medio de interruptores de final de carrera, indicando al controlador que las ventanas se encuentran cerradas o abiertas.

#### **3.4.1.2. Motor DC con caja reductora**

Se hará uso de motores DC con caja reductora de 12VDC. Mediante el acople mecánico por medio de engranajes del eje del motor con el eje de las ventanas se realizará la apertura y cierre de estas mismas cuando el control así lo requiera. La caja reductora depende del torque deseado (según el peso de las ventanas a mover) y de

la reducción de la entrada con respecto a la salida de la caja reductora. El peso individual de las ventanas del invernadero es de 260g, entonces sabemos que:

$$\tau = \vec{r} \times \vec{F} = r \times F \times \text{sen } \theta \dots \dots \dots (1)$$

Donde "r" es la posición de la fuerza, "F" es el vector de fuerza, "τ" es el torque de la fuerza "F" y "θ" es el ángulo entre "r" y "F".

Para este caso tenemos:

Sen θ = Sen 90° = 1 (caso critico).

r = 15cm y F = 0.26 Kg.

Entonces:

El momento que requerido para mover la ventana es de 15 cm x 0.26 Kg. = 3.9 Kg.cm

De acuerdo a lo analizado, se selecciona el motor con caja reductora de la marca MS- Motor de 4kg.cm@12VDC y 400mA, modelo 07350-250, el cual cumple los requerimientos del sistema.



Figura 2: Motor DC con caja reductora

**3.4.1.3. Unidad de calefacción a gas (fuego directo)**

El gas natural es una de las energías de suministro continuo más económicas. La calefacción de Gas Natural proporciona una temperatura estable y uniforme.

La unidad calefactora seleccionada es la más adecuada para otorgar calor dentro del invernadero, pues está diseñada para el uso específico en invernaderos de acuerdo a las dimensiones del invernadero para el suministro de calor en BTU, el calefactor cumple con calentar el invernadero en su totalidad. El empleo de este tipo de calefacción nos permitirá un ahorro de energía del sistema de energía solar pues está limitada en potencia/horas.

El modelo del calefactor a gas seleccionado es el CGFD-150 con una capacidad de 150,000 BTU/SALIDA nominal, capaz de calentar un área cerrada de 72m<sup>2</sup>, con una elevación de temperatura nominal de 15°C a 20°C y con un consumo de gas LP Butano de 2.97 Kg./hora o de gas natural de 4.17 m<sup>3</sup>/hora.

El fabricante de estos equipos (CALELEC S.A.) realiza las modificaciones adecuadas según los requerimientos y exigencias del cliente, para este sistema se puede emplear un elevador de tensión de 12VDC a 115VDC o como es el caso de este diseño, el de realizar un pedido al fabricante de modificación para que el equipo trabaje con un voltaje de entrada de 12VDC.

El sistema de encendido y apagado del equipo es electrónico y cuenta con un sistema de seguridad de trabajo. Para la suministro del gas al equipo calefactor se emplea un tanque promedio de 36 litros.



Figura 3: Unidad de calefacción a gas línea CGFD

### **3.4.2. Diseño electrónico**

El diseño electrónico se divide en cuatro partes:

- Adaptación de la señal del transductor al controlador.
- Sistema de control de temperatura.
- Sistema de potencia.
- Sistema fotovoltaico.

#### **3.4.2.1. Adaptación de la señal del transductor al controlador**

Esta parte del diseño está enfocada a la adaptación (amplificación, filtrado y protección) de la señal desde la salida del sensor de temperatura hasta la entrada del controlador.

Para la elección del sensor de temperatura, se tomó como base de elección que el sistema a diseñar no es crítico. Por lo tanto, dicho sensor de temperatura a emplear en el diseño podrá ser uno de aplicación general de salida analógica y que no requiera circuito de calibración alguno. Entonces, se seleccionó el sensor del tipo LM35, el cual otorga una adecuada resolución para el rango con el cual el sistema va a operar; es decir, cumple con las características requeridas para el muestreo de temperatura, es lineal (la temperatura es proporcional con la señal enviada por el sensor) y no requiere circuito de calibración alguno.

La amplificación de la señal del sensor debe de ser del tipo de ganancia lineal para que la señal que entrega el sensor sea proporcional a la señal de entrada al controlador en todo el rango de trabajo en que opere el sensor (característica muy importante para el diseño del sistema). Además, cuenta con una baja distorsión por ruido, lo que hace que el amplificador de instrumentación INA126 cumpla con los requerimientos que se desean para el sistema de adaptación de señales del sistema de control de temperatura.

Para el valor de la ganancia del amplificador se tomó como punto de partida del diseño los valores críticos que llegarían al controlador. Luego se asume un valor máximo en la

salida del sensor; es decir, un valor crítico de temperatura, el cual debe de ser mayor al valor de la temperatura máxima letal, este valor máximo debe de ser equivalente con el valor máximo a la salida del amplificador, es decir, debe de ser el máximo permitido por el controlador en este caso es de 5VDC. Entonces se asume el valor de 63 como valor máximo en la entrada del amplificador, con lo cual en la entrada del controlador se debe de tener un valor aproximado de 5VDC.

Por tanto:

$$63 \times 10\text{mV} \times X \cong 5\text{V} \Rightarrow X \cong 7.93$$

Entonces se asume  $X = 8$ , donde  $X$  es la ganancia del amplificador.

Ahora:

$$63 \times 10\text{mV} \times 8 = 5.04\text{V}, \text{ Valor crítico máximo.}$$

Entonces, el valor escogido de ganancia es el adecuado, pues 63°C es un valor máximo de temperatura que el sistema puede llegar a reconocer; es decir que valores de temperatura mayores a 63°C el sistema lo toma como si fuese 63°C y por tanto como este valor es mayor a la temperatura máxima letal el sistema de control de temperatura descenderá la temperatura del invernadero hasta alcanzar la temperatura óptima del cultivo.

Cabe señalar que para que el amplificador tenga una ganancia de 8, el fabricante recomienda hacer uso de la ecuación (3) para obtener el valor de la resistencia  $R_G$  en el amplificador:

$$G = 5 + \frac{80K}{R_G} \dots\dots\dots(2)$$

Donde:  $G$  es la ganancia del amplificador y  $R_G$  es el valor de la resistencia del amplificador.

De lo anterior tenemos que:

$$R_G = 26.67\text{K}\Omega.$$

La señal que se brinda a la salida del amplificador esta en el rango de los mV, esto sumado al ruido existente, hacen que el reconocimiento de la señal del sensor sin tratarla sería muy dificultoso. Por tal motivo, la señal es amplificada y filtrada después para obtener una señal la cual se pueda manejar sin dificultad alguna eliminando ruido alguno del sistema de muestreo por medio de este método (amplificación-filtrado).

Debido a que el sistema no es crítico, por diseño se debe tener una frecuencia de corte del filtro pasa bajos del sistema para la eliminación del ruido de 30Hz. El ruido analizado posee un valor máximo de 20KHz y 60KHz.

El tipo de señal requerida a la entrada del controlador no es muy compleja; por lo que el filtrado de la señal a la salida del sistema de amplificación, se realiza por medio de un filtro pasa bajo del tipo pasivo (resistencia-condensador). El empleo de un filtro de otro tipo ya sea Butterworth o Chebyshev es aplicable cuando se requiera un tipo de señal más compleja.

Entonces tenemos:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R C} = 30Hz \dots\dots\dots(3)$$

Se asumió un valor para el condensador de 47uF, entonces la resistencia  $R = 110\Omega$ .

Se realizó un sistema de protección (resistencia, diodos) para que el controlador reciba la señal dentro del rango de 0V a 5V. Se tiene en cuenta que el sensor opera en entre 2°C y 150°C, debido a que la configuración del sensor utilizada es la básica del sensor es la configuración básica.

El reconocimiento de la señal por parte del controlador después de la adaptación no tiene ninguna dificultad, pues está en el rango al cual el controlador opera (rango de operación del ADC del controlador).

#### **3.4.2.1.a. Explicación básica del funcionamiento del circuito de adaptación**

La señal de salida del sensor de temperatura pasa por una resistencia de protección de  $100\Omega$ , la señal del sensor esta en el rango de 20mV a 1.5V por configuración del sensor de temperatura (rango de operación 2°C - 150°C), esta señal de salida del sensor es de magnitud pequeña, por lo que es preferible amplificarla para evitar errores de muestreo por parte del controlador y limitarla. La señal es amplificada por un amplificador de instrumentación (INA126) con una ganancia de 8.

La señal de salida del amplificador esta en el rango de 160mV y 12VDC. Como se desea que el voltaje de llegada al controlador sea menor de 5VDC entonces por medio

del diseño de adaptación el valor de la temperatura dentro del invernadero no será mayor a  $63^{\circ}\text{C}$  o a  $5.04\text{VDC}$ . Posteriormente la señal de salida del amplificador es filtrada mediante un filtro pasa bajos (RC) con una frecuencia de corte de  $30\text{Hz}$ .

Teniendo en cuenta que el controlador es un circuito con tecnología de Lógica Transistor-Transistor, se utilizó un sistema de protección por medio de diodos de conmutación de alta velocidad los cuales protegen al controlador de valores de voltaje fuera de los máximos permitidos por el controlador ( $5\text{VDC}$  y  $0\text{VDC}$ ).

Luego la señal que recibe el controlador es comparada con tablas para saber si la temperatura interna del invernadero se encuentra en el rango adecuado de temperatura para el correcto crecimiento de las plantas (Ver Figura 24: Diagrama de flujo del programa).

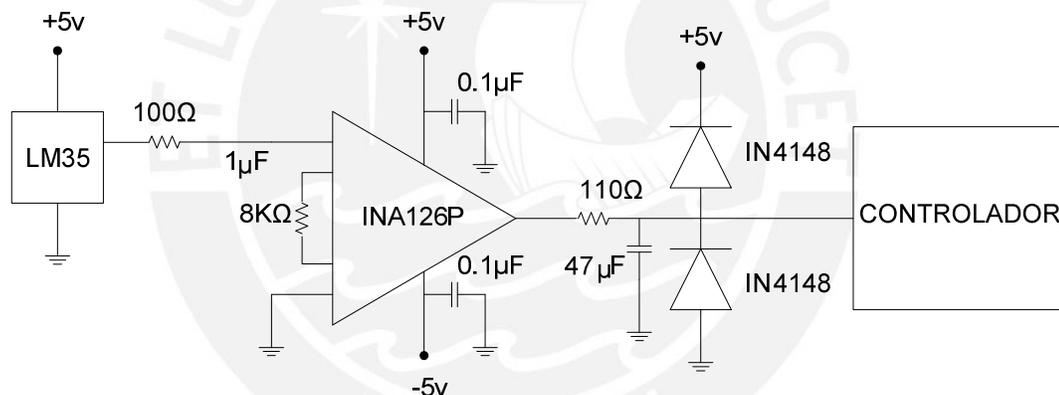


Figura 4: Diagrama esquemático del circuito de adaptación de la señal del sensor al controlador.

#### 3.4.2.1.b. Sensor de Temperatura LM35DZ

Es un sensor de temperatura con precisión calibrada de  $1^{\circ}\text{C}$  y rango de trabajo desde  $+2^{\circ}\text{C}$  a  $+150^{\circ}\text{C}$  de acuerdo a la configuración básica, la cual es empleada en el diseño del sistema.

Este sensor es utilizado debido a su precisión y facilidad de uso, al no necesitar de ningún circuito externo para su implementación y calibración.



#### 3.4.2.1.d. Diodo de conmutación de alta velocidad 1N4148

El 1N4148 es un diodo de conmutación de alta velocidad fabricados con tecnología planar y en encapsulado herméticamente sellado SOD27.

Empleados en sistemas de rápida respuesta o de conmutación de alta velocidad.

Características:

- Encapsulado herméticamente sellado.
- Alta velocidad de conmutación: máximo 4ns.
- De aplicaciones general.
- Voltaje continuo de reversa: máximo 75V.
- Pico de voltaje repetitivo de reversa: máximo 75V.
- Pico de corriente repetitivo directo: máximo 450mA.



Figura 7: Diodo de conmutación de alta velocidad

#### 3.4.2.2. Sistema de control de temperatura

Para la elección del controlador del sistema a diseñar se consideró que dicho controlador cuente como mínimo de un convertor análogo digital, de un reloj interno, de registros, puertos de entrada/salida y de memoria no volátil. Entre los controladores que se encuentran en el mercado, el que cumple con las características antes mencionadas es el de la familia AVR del fabricante ATMEL específicamente el controlador ATMEGA8L, el cual cuenta con 6 convertidores análogo/digital (4 de 8 bits c/u y 2 de 10 bits c/u), 32 registros de propósito general, 23 puertos de entrada y/o salida, 512 bytes de memoria EEPROM para grabar datos, reloj interno de 8MHZ y

8Kbytes de memoria flash programable entre las características más resaltantes de este controlador.

El controlador seleccionado en comparación con otros controladores de otros fabricantes (PIC de Microchip o 68HC908 Series de Motorola) es el más adecuado ya sea por el precio del controlador y por el desempeño del mismo.

Algunos de estos controladores poseen algunas características como conversores análogo/digital, reloj interno, memoria flash, pero no con todas las características requeridas para el controlador de este trabajo de tesis. Si uno desea un controlador que posea todas las características requeridas el precio es alto, los demás fabricantes de controladores ofrecen controladores de mejor calidad a un precio considerablemente alto.

Para realizar la tarjeta de control del sistema de control, se utilizó el manual del controlador donde se indica los requerimientos básicos para realizar la tarjeta de control del controlador ATMEGA8L (Ver Anexo 2) y el esquema de la tarjeta de control. Éste esquema se adaptó para el sistema de control a diseñar; es decir se modificó el esquemático de la tarjeta de control de referencia para el uso de la tarjeta del controlador del sistema a diseñar habilitando cuatro puertos de entrada (convertidores ADC) y cuatro puertos de salida como controladores de los actuadores del sistema.

Para la adaptación de la alimentación se emplea un regulador de voltaje de 12VDC a 5VDC de 20 watts., el cual transfiere energía a la tarjeta de control para aislar la alimentación de la parte de control con la parte de potencia. La elección de la potencia del transformador se debe a los 5 voltios y los 3 amperios con los que opera en un caso crítico la tarjeta de control.

#### **3.4.2.2.a. Explicación básica del funcionamiento del circuito de control**

El controlador realiza un promedio de los valores obtenidos por los sensores en los cuatro convertidores análogo/digital para luego realizar una comparación entre el valor promedio obtenido con los valores de temperatura óptima, temperatura máxima biológica y temperatura mínima biológica. De acuerdo a la comparación realizada por el controlador, éste envía una señal de control a los actuadores correspondientes; encendiendo (ON) o apagando (OFF) los actuadores que le correspondan al resultado

de la comparación realizada de ahí el nombre del sistema de control a diseñar “control ON/OFF”.

El controlador realiza una operación de cuenta después de habilitar o deshabilitar los actuadores que toma unas milésimas de segundo, el controlador se encuentra en un estado de reposo en el cual el controlador solo realiza una cuenta ascendente. Luego de llegar a la cuenta final el controlador continúa con el mismo procedimiento de lectura de temperatura de los sensores, comparación de las temperaturas y activación o desactivación de los actuadores correspondientes para un adecuado cuidado del ambiente interno del invernadero.

El ciclo del sistema de control a diseñar continúa de forma continua e indefinidamente, siempre y cuando el sistema de control de temperatura a diseñar se encuentre alimentado con un nivel de tensión requerido por el controlador para un funcionamiento adecuado del sistema (Ver Anexo 2, características eléctricas).

#### **3.4.2.2.b. Controlador megaAVR – ATMEGA8L**

Los ATMEGA8L son controladores que pertenecen a la línea de familia de la compañía ATMEL. Se basan en el núcleo AVR añadiendo muchas características especiales al controlador.

Se eligió trabajar con este controlador debido a que posee las características adecuadas que lo hacen el más adecuado para el sistema.

Lo más resaltante es que cuenta con puertos análogo-digital que son empleados en el muestreo de los sensores de temperatura.

Las características más importantes para el sistema a diseñar que ofrece el controlador ATMEGA8L son:

- 8Kbytes de memoria flash programable y datos.
- 512 bytes de memoria EEPROM para grabar datos.
- 1Kbytes de memoria interna SRAM.
- 6 puertos análogos/digital muy importantes en el sistema a diseñar.
- 32 registros de propósito general.
- 23 puertos de entrada y/o salida.
- Rango de operación Industrial (-40°C a 85°C).

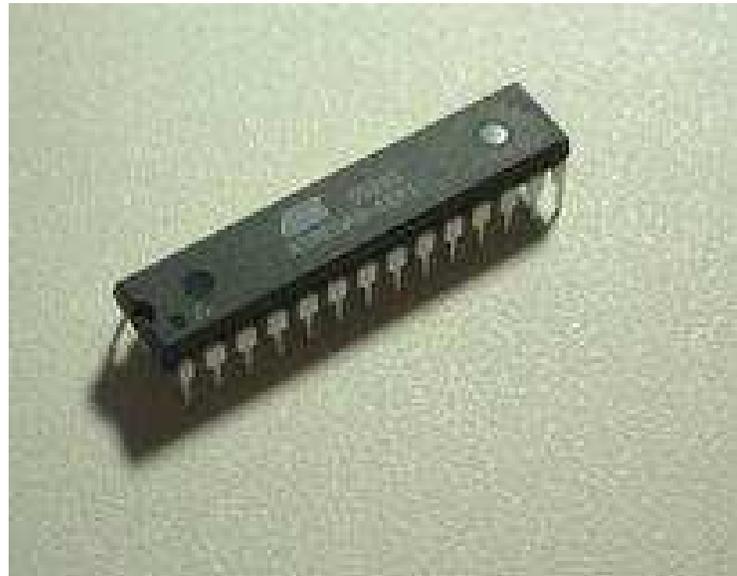


Figura 8: Controlador AVR ATMEGA8L.

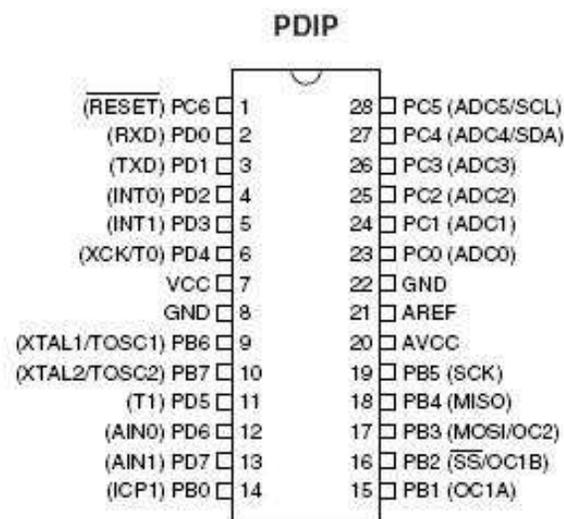


Figura 9: Pines del controlador AVR Atmel ATMEGA8L.

### 3.4.2.3. Sistema de potencia

En esta parte se realizó el diseño electrónico de la parte de potencia del sistema. Se aisló la parte lógica del sistema de la parte mecánica para un buen desempeño del sistema; pues el ruido generado por los motores distorsiona la señal que llega al controlador. La señal obtenida por el controlador no sería la deseada pues la lectura de los ADC del controlador tendría errores por el ruido de los motores con caja reductora y por el motor del calefactor a gas.

Para aislar la parte de control con la parte de potencia del sistema se empleó opto-acopladores del tipo MCT6, pues este circuito integrado posee dos sistemas de aislamiento (dos diodos y dos optotransistores) los cuales son empleados para aislar diferentes circuitos en un mismo sistema de circuitos.

La configuración empleada para este tipo de aislamiento (resistencia-transistor) otorga una forma segura del control de los actuadores debido a que se emplea tensiones de voltaje adecuados para un correcto control (ON=5VDC, OFF=0.7VDC) dependiendo del actuador que se controle.

Para el control de los motores reductores se empleó el circuito integrado L298N debido a sus características, lo más resaltante es la corriente con la cual se manejan los motores que es menos de dos amperios por cada motor; este controlador de giro de motor soporta como máximo dos amperios por cada canal de motor.

Para el control del equipo calefactor basta solo con la configuración resistencia transistor luego del opto acoplador, pues el encendido y apagado de este dispositivo es digital; es decir, bastará que se polarice el transistor para que el calefactor se encienda con 5VDC aproximado y se apague con 0VDC aproximado.

Se utilizó resistencias de  $1K\Omega$  en las salidas de los opto-acopladores para mantener una tensión elevada en dichas resistencias, para que la tensión sea equivalente a un '1' lógico (5VDC aproximado) para poder controlar los actuadores del sistema de control. El sistema hace que el transistor que está conectado con el equipo de encendido de potencia pase de corte a saturación o de '0' lógico a '1' lógico y viceversa.

Para el control de los motores con caja reductora se empleó el circuito antes mencionado sumado al circuito integrado L298, el cual se encarga del control de los motores que realiza la apertura y cierre de las ventanas del invernadero (Ver Figura 11). Se emplea interruptores de final de carrera para indicar si es que las ventanas están abiertas o cerradas.

Para el calefactor basta solo con el esquema de aislamiento empleando resistencia-transistor, MCT6 y resistencia de salida para activarlo o desactivarlo; pues éste equipo se enciende y apaga electrónicamente.

#### **3.4.2.3.a. Explicación básica del funcionamiento del circuito de potencia**

Luego de realizado la comparación de las temperaturas, el controlador envía una señal de activación o desactivación de los actuadores.

La señal es un '1' lógico para habilitar o un '0' lógico para deshabilitar; es decir, se eleva la tensión a aproximadamente 5VDC en el pin del actuador para que se encienda y 0VDC en el pin del actuador para que se apague o deshabilite.

La señal enviada llega a un circuito resistencia-transistor que se encarga de asegurarse que la corriente que llega al circuito integrado MCT6 (circuito de aislamiento led-optotransistor) produzca el efecto necesario para que el transistor del integrado se polarice adecuadamente (se encuentre en saturación o en corte) obteniendo una tensión aproximada de 5VDC o de 0VDC en la resistencia de salida del circuito de aislamiento; habilitando cuando la señal enviada sea un '1' lógico (el transistor se encuentra en saturación y la tensión de la resistencia de salida es 5VDC aproximado) o deshabilitando cuando la señal enviada sea un '0' lógico (el transistor se encuentra en corte y la tensión de la resistencia de salida es 0VDC aproximado).

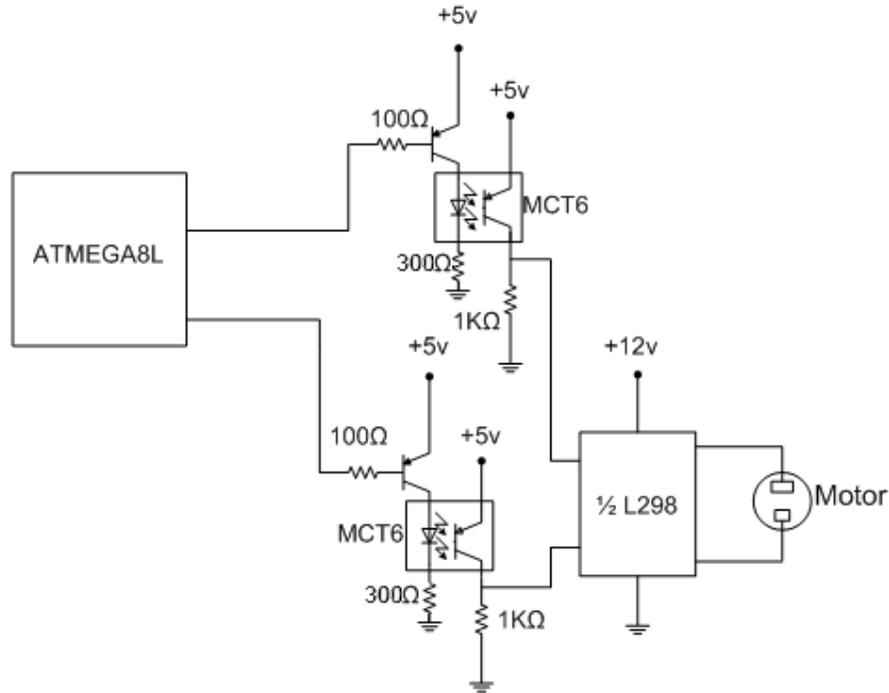


Figura 10: Esquemático del circuito de electrónica de potencia del sistema.

#### 3.4.2.3.b. Circuito controlador de giro de motor L298N

El circuito L298 es el típico puente H o controlador de giro de motores. Facilita el control de giro de hasta dos motores. Su implementación en el sistema es el básico, el cual se encuentra en la hoja de datos del dispositivo (Ver Anexo 4). Las principales características del circuito L298 son que este circuito integrado está diseñado para controlar el sentido de giro de dos motores al mismo tiempo, la corriente máxima de estos motores debe de ser como máximo de dos (2) amperios y cuenta con un circuito de protección de cruce de giro de los motores.

El precio de este integrado comparado con un circuito de potencia diseñado con mosfets o transistores de corrientes altas es considerablemente bajo.

El desempeño del circuito controlador de giro de motor es el deseado para el sistema a diseñar. Los diferentes fabricantes de este circuito integrado ofrecen en las hojas de datos del L298N el diagrama de pistas de la tarjeta de control para dicho circuito

integrado con la disposición de los elementos que se necesitan para realizar la tarjeta de control de giro de los motores a controlar.

Este tipo de circuito integrado es ampliamente utilizado en estos tipos de aplicaciones mecánicas (control de motores reductores de bajo amperaje).



Figura 11: Circuito L298N puente H

#### 3.4.2.3.c. Opto acoplador dual MCT6

El circuito integrado MCT6 es el típico opto aislador empleado en el campo de la electrónica con el fin de aislar la parte de control con la parte de potencia de un sistema.

El MCT6 es un estándar de opto acopladores duales, cada canal es un fototransistor NPN plano de silicio ópticamente acoplado a un galio arsenide diodo de emisión infrarrojo. El MCT6 es construido con un alto aislamiento de voltaje.

Características:

- Dos canales aislados por paquete.
- Elección entre tres valores de corrientes de trabajo.
- Proporción de Transferencia de Corriente, mínimo del 20 %.
- UL E90700



Figura 12: Opto acoplador MCT6

#### 3.4.2.4. Sistema Fotovoltaico

En el diseño del sistema de control de temperatura se incluye un sistema fotovoltaico, el cual provee de tensión y potencia a todo el sistema a diseñar. Se toma en consideración que el sistema fotovoltaico diseñado cumple con los requisitos mínimos requeridos para un sistema fotovoltaico según el “Reglamento técnico de especificaciones técnicas y procedimientos de evaluación del sistema fotovoltaico y sus componentes para electrificación rural” del Perú (Ver Anexo 1), el cual establece las especificaciones técnicas y los procedimientos de evaluación que debe cumplir el sistema fotovoltaico y sus componentes.

El sistema fotovoltaico que suministra de energía al sistema de control de temperatura cuenta con un generador fotovoltaico compuesto por módulos fotovoltaicos de alto rendimiento, una batería de plomo-acido, un controlador de carga y un convertidor CC/CC.

Los módulos fotovoltaicos o colectores solares fotovoltaicos (llamados también paneles solares) están formados por un conjunto de celdas (células fotovoltaicas) que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos.

Las placas fotovoltaicas se dividen en monocristalinas las cuales se componen de secciones de un único cristal de silicio (reconocibles por su forma circular o hexagonal), policristalinas las cuales están formadas por pequeñas partículas cristalizadas y las amorfas que son cuando el silicio no se ha cristalizado. Para el sistema fotovoltaico a diseñar se toma en consideración la del tipo policristalino debido a su rendimiento y precio.

Para la selección de los paneles fotovoltaicos, tomo como referencia la potencia máxima crítica requerida por parte de los motores con caja reductora (33.6 Watts); debido a que ésta es mayor a diez veces la potencia requerida por la parte de la tarjeta de control y de potencia del sistema (1.65 Watts).

El tamaño del panel fotovoltaico se determina de acuerdo a lo siguiente:

$$A_r = 1200 \times E_d / I_d$$

Donde:

$A_r$ : Tamaño del panel fotovoltaico [Wp]

$E_d$ : Demanda de electricidad [kWh/día]

$I_d$ : Irradiación [kWh/m<sup>2</sup>/día]

Tenemos:

En el motor DC con caja reductora, la corriente nominal es de 0.4 amperios, entonces la corriente de arranque del motor es aproximadamente 7 veces la corriente nominal del mismo.

Entonces:

$$E_d = (0.4 \text{ Amps.} \times 7 \times 12 \text{ Volts.}) \times 24 \text{ horas} = 0.8064 \text{ [kWh/día]}$$

Para calcular la irradiación en el área de ubicación donde se encuentra el invernadero, se emplea las tablas de irradiación solar en el Perú (Ver Tabla 2).

Para este caso la irradiación promedio es  $4.39 + 3.99 / 2 = 4.19 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ .

La irradiación horizontal se debe de corregirse con un factor de orientación e inclinación, la corrección puede hacerse en el ángulo de inclinación mayor a 15° a la latitud para nivelar las fluctuaciones estacionarias (esto se llama optimización de invierno).

Entonces la irradiación queda como sigue según las tablas de los factores de inclinación (Ver Tabla 3). Para los 15°S del hemisferio sur tenemos que el promedio del factor de inclinación es de 0.96.

La irradiación total para el sistema analizado es:

$$4.19 \times 0.96 = 4.02 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$$

Por tal tenemos que:

$$Ar = 1200 \times 0.81 / 4.02 = 241.8 \text{ [Wp]}$$

Esto significa que para este sistema de control el tamaño del panel que se requiere es de 242 x 100 cm.

Tabla 2: Tabla de Radiación solar del Perú (fuente: *World Solar Irradiation Database*)

Promedio diario mensual para el Perú (kWh/m <sup>2</sup> /día)																			
Site	Lat	Long	Ele	Yr	I	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Avg	Sr
Abancay	13.63 S	72.88	2398	2	I	5.42	4.89	5.03	4.94	4.72	4.56	4.81	5.11	5.08	5.86	5.97	5.33	5.14	H
Angostura	15.17 S	71.63	4155	3	I	5.47	4.92	4.89	4.97	4.83	4.78	4.89	5.36	5.42	6.86	6.14	5.64	5.28	H
Alacocha	10.58 S	76.22	4023	2	I	4.78	4.44	4.75	5.08	5.00	4.94	5.11	5.28	4.94	5.53	5.44	5.11	5.03	H
Bañosmarca	6.68 S	78.52	2600	3	I	4.75	4.67	4.64	4.69	4.56	4.94	5.11	5.17	5.17	5.17	5.53	5.39	4.96	H
Cajamarca	7.17 S	78.52	2750	1	I	4.56	4.89	4.25	4.44	4.58	4.28	4.44	5.08	4.72	4.75	5.11	5.08	4.68	H
Calana	17.93 S	70.18	590	3	I	6.44	6.19	5.72	5.11	4.33	4.03	4.11	4.69	5.28	6.39	6.44	6.42	5.43	P
Cuzco de Marte	12.07 S	77.03	137	1	I	4.94	5.58	5.17	5.39	4.06	2.89	2.56	2.83	3.56	3.5	5.28	5.06	4.24	H
Capachica	15.63 S	69.83	3868	3	I	5.47	5.44	5.19	5.31	4.89	4.83	5.03	5.44	5.78	6.17	6.28	5.64	5.46	H
Cañete	13.10 S	76.30	36	3	I	5.19	5.19	5.14	4.97	3.92	2.97	2.92	3.17	3.56	4.25	4.75	5.22	4.27	H
Curtavio	7.92 S	79.17	51	3	I	5.53	5.44	5.5	5.0	4.89	4.06	4.14	4.08	4.5	5.06	5.67	5.67	4.96	H
Casa Grande	7.77 S	79.17	158	3	I	5.39	5.33	5.39	5.0	5.19	3.92	4.06	4.28	4.42	4.97	5.14	5.53	4.88	H
Caylloma	15.18 S	71.77	4320	2	I	5.56	4.92	4.78	4.86	4.75	4.78	4.97	5.44	5.31	6.06	6.14	5.86	5.28	H
Cayalli	6.88 S	79.57	150	2	I	5.36	5.81	5.5	5.39	5.25	4.44	4.72	5.08	5.22	5.78	5.86	6.03	5.37	H
Characato	16.47 S	71.45	2461	3	I	6.14	5.33	6.56	5.50	5.22	4.81	5.19	5.64	6.11	6.92	7.06	6.58	5.84	H
Comococha	10.12 S	77.33	4020	3	I	4.86	4.33	4.44	4.72	4.78	4.89	5.17	5.42	5.25	4.69	5.53	5.08	4.95	H
Cuenca Rio Verde	15.48 S	70.67	4260	3	I	5.47	4.81	5.00	5.14	4.89	4.83	4.97	5.36	5.42	5.94	5.92	5.53	5.27	H
Cuzco	13.52 S	71.95	3365	3	I	5.19	4.69	4.92	5.03	4.81	4.78	5.06	5.11	5.17	5.64	5.75	5.22	5.11	H
Desaguadero	16.65 S	69.00	3850	3	I	5.72	5.56	5.58	5.53	4.92	4.67	4.81	5.39	5.47	6.17	6.06	5.67	5.46	H
Don Martín	11.03 S	77.68	50	3	I	5.33	5.06	5.06	4.86	4.0	3.25	3.36	3.58	3.97	4.36	5.03	5.44	4.44	H
El Fraile	16.15 S	71.18	4015	2	I	5.39	4.39	4.47	4.56	4.75	4.67	4.81	5.22	5.67	6.06	5.94	5.67	5.13	H
Fundo Iberia	11.35 S	69.57	180	3	I	4.81	4.67	4.64	4.31	4.25	4.31	4.69	5.25	5.03	5.0	5.06	4.61	4.72	H
Granja M. Sasso	6.52 S	79.92	45	1	I	5.75	5.81	6.22	6.28	5.83	5.0	4.86	5.31	5.81	6.0	5.94	5.89	5.72	H
Hacienda Majoro	14.83 S	74.97	620	3	I	5.56	5.72	5.81	5.06	5.03	4.28	4.53	5.06	5.81	6.58	6.36	5.94	5.48	H
Haciendita	17.02 S	71.62	450	2	I	6.42	5.58	5.92	5.33	4.39	4.06	3.94	4.5	4.78	6.08	6.42	5.56	5.25	H
Huaraz	9.53 S	77.52	3207	2	I	5.06	4.83	5.08	5.11	5.25	5.11	5.39	5.72	5.47	5.28	5.72	5.5	5.29	H
Huancayo	12.05 S	75.18	3350	3	I	5.25	4.86	4.94	4.64	4.92	4.83	5.0	5.11	5.11	5.33	5.83	5.39	5.1	H
Huancayo	12.12 S	75.33	3380	3	I	7.38	6.71	6.54	6.54	6.18	6.28	6.3	6.75	7.18	7.47	7.75	7.21	6.86	P
Huamuc	9.90 S	75.75	1912	2	I	4.67	4.53	4.64	4.64	4.78	4.58	4.81	5.14	4.86	5.08	5.33	4.89	4.83	H
Huayra-Moho	15.35 S	69.50	3890	3	I	5.25	4.69	5.0	5.31	4.83	4.83	5.14	5.56	5.69	5.86	6.03	5.31	5.29	H
Ica	14.08 S	75.73	398	2	I	5.86	5.0	5.42	5.11	4.78	5.75	4.17	4.81	5.25	6.17	6.44	6.14	5.41	H
Imata	15.82 S	71.07	4405	3	I	5.25	4.81	4.78	4.94	4.81	4.72	5.0	5.33	5.31	5.86	5.94	5.53	5.19	H
Juli	16.20 S	69.43	3862	2	I	5.5	4.81	4.47	5.25	5.11	4.78	4.97	4.97	5.47	6.06	6.06	5.33	5.23	H
Kayra	13.55 S	71.88	3219	2	I	5.0	4.47	4.61	4.86	4.64	4.78	4.97	5.03	5.08	5.33	5.56	4.89	4.93	H
Lagunillas	15.58 S	70.92	4280	3	I	5.67	5.22	5.11	5.03	4.67	4.53	4.89	5.53	5.58	6.28	6.39	5.75	5.39	H
Lambayeque	6.70 S	79.90	18	3	I	5.17	5.61	5.5	5.31	5.08	4.64	4.39	4.72	5.03	5.47	5.64	5.81	5.2	H
La Molina	12.08 S	76.95	251	3	I	5.03	5.17	5.25	5.0	3.97	3.33	3.31	3.56	3.75	4.36	4.83	5.08	4.39	H
Lampas Alto	10.08 S	77.28	4030	3	I	4.78	4.11	4.56	4.56	4.78	4.72	5.25	5.42	5.25	4.67	5.44	4.97	4.88	H
Lampas Bajo	10.07 S	77.37	3950	3	I	4.86	4.44	4.56	4.64	4.81	4.92	5.36	5.42	4.19	4.97	5.64	5.53	4.94	H
La Punta	12.07 S	77.17	13	2	I	4.5	5.08	4.94	4.72	3.89	2.94	2.89	3.0	3.17	3.61	4.28	4.86	3.99	H
La Salle	16.40 S	71.53	2330	3	I	6.14	5.33	5.58	5.33	5.22	4.72	5.11	5.64	5.94	6.58	7.06	6.58	5.77	H
Llucma	6.68 S	78.52	2600	1	I	4.64	4.89	4.56	4.08	4.14	4.47	4.39	4.72	5.03	5.28	5.53	5.69	4.78	H
Los Cedros	3.13 S	80.67	5	3	I	4.78	5.39	5.44	5.25	5.28	4.53	4.61	4.67	4.39	4.58	4.86	5.39	4.93	H
Moquegua	17.20 S	70.93	1420	2	I	7.67	5.19	5.89	5.92	5.14	4.92	5.0	5.75	6.5	7.03	7.33	7.28	6.13	H
Neshuya	8.63 S	74.92	340	1	I	4.81	4.72	4.14	3.75	3.78	3.53	4.28	5.03	5.17	5.08	5.17	5.67	4.59	H
Pampa Blanca	17.10 S	71.75	455	2	I	5.28	4.75	5.19	4.78	3.67	3.11	3.42	3.42	3.28	4.42	4.66	5.11	4.27	H
Pampa De Majes	16.35 S	72.17	1433	3	I	6.58	5.97	6.08	5.69	5.22	4.86	5.36	5.81	6.22	7.03	7.31	6.92	6.09	H
Pane	15.42 S	71.07	4524	3	I	5.03	4.69	4.58	4.67	4.33	4.61	4.64	4.83	4.83	5.22	5.72	5.31	4.87	H
Puno	15.83 S	70.03	3875	2	I	5.69	5.22	5.28	5.28	4.97	4.78	5.0	5.61	5.78	6.39	6.61	5.67	5.52	H
Punta de Cotes	17.68 S	71.38	15	2	I	6.67	6.36	6.61	5.19	4.14	3.25	3.0	3.67	3.42	4.58	6.36	6.28	4.96	P
Quezococha	9.68 S	77.35	3935	1	I	4.33	4.22	4.56	4.83	4.72	4.61	5.0	5.25	5.17	4.67	5.31	4.64	4.78	H
Quillabamba	12.83 S	72.72	1660	2	I	4.44	4.33	4.72	4.25	4.33	4.22	4.44	4.44	4.5	4.89	4.97	4.56	4.51	H
Salcedo	15.32 S	70.02	3852	3	I	5.47	5.11	5.11	5.14	4.83	4.61	4.69	5.28	5.5	6.17	5.36	5.64	5.34	H
San Jacinto	9.17 S	78.32	283	3	I	5.06	4.33	5.17	4.94	4.75	4.0	4.33	4.5	4.97	5.72	5.83	5.83	4.95	H
San Jorge	8.53 S	74.87	270	2	I	4.81	4.61	4.67	4.5	4.42	4.36	4.92	5.39	5.0	5.19	4.53	4.61	4.75	H
San Lorenzo	9.75 S	77.47	3750	1	I	4.86	4.44	4.56	4.92	4.72	4.75	5.28	5.42	5.36	5.19	5.75	5.19	5.04	H
San Ramon	11.15 S	75.38	800	3	I	4.5	4.33	4.44	4.5	4.53	4.25	4.64	4.69	4.72	5.19	5.14	5.14	4.67	H
Sibayo	15.48 S	71.45	3847	3	I	5.36	4.69	4.69	4.94	4.81	4.75	4.89	5.0	5.22	5.86	5.94	5.53	5.14	H
Tablazo	5.37 S	81.78	147	3	I	4.19	5.28	5.61	5.17	5.33	4.64	4.83	5.44	5.64	5.89	5.78	6.14	5.33	H
Tarapoto	6.58 S	76.32	356	3	I	4.75	4.67	4.36	4.28	4.17	4.06	4.58	4.83	4.72	4.72	4.69	4.83	4.57	H
Tejedores	4.75 S	80.23	2500	3	I	4.47	4.75	5.08	4.81	5.28	4.86	5.05	5.39	5.64	5.75	5.78	5.58	5.2	H
Tinajones	6.67 S	79.47	220	3	I	5.44	5.61	5.39	5.58	5.72	5.06	5.75	5.86	6.0	6.22	6.5	6.64	5.81	H
Tumelceru	13.12 S	75.07	4600	3	I	4.97	4.67	5.14	4.97	4.67	4.81	5.08	5.42	5.28	5.66	6.97	6.44	5.19	H
Yurac	9.00 S	75.67	420	3	I	4.31	4.0	4.14	4.11	3.94	3.67	4.17	4.72	4.69	4.67	4.64	4.31	4.28	H
Zorritos	3.67 S	80.67	5	2	I	5.03	5.53	5.08	5.42	5.25	5.11	4.75	4.25	4.56	5.11	5.42	5.33	5.07	H

Tabla 3: Tablas con factores de inclinación (fuente: *Solar Electricity*)

Northern Hemisphere Latitudes 0° - 5° N													
Month	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	
SRI	6.14	6.17	6.10	5.58	5.00	5.55	6.01	6.02	5.55	5.48	5.49	6.00	
SSe <sup>†</sup>	18.04	18.11	18.08	18.02	18.00	18.05	18.11	18.08	17.57	17.44	17.41	17.00	
Tilt													
40°S	1.12	1.01	0.87	0.71	0.53	0.52	0.55	0.65	0.79	0.95	1.08	1.15	40°N
35°S	1.13	1.03	0.91	0.76	0.65	0.59	0.62	0.71	0.84	0.98	1.10	1.16	35°N
30°S	1.14	1.05	0.94	0.82	0.71	0.67	0.69	0.77	0.88	1.00	1.11	1.16	30°N
25°S	1.13	1.06	0.97	0.86	0.78	0.73	0.75	0.82	0.91	1.02	1.11	1.15	25°N
20°S	1.12	1.06	0.99	0.90	0.83	0.80	0.81	0.87	0.94	1.03	1.10	1.13	20°N
15°S	1.10	1.06	1.00	0.93	0.88	0.86	0.87	0.91	0.97	1.03	1.08	1.11	15°N
15°N	0.84	0.89	0.94	1.01	1.06	1.08	1.07	1.03	0.98	0.91	0.86	0.83	15°S
20°N	0.78	0.84	0.91	1.00	1.10	1.10	1.08	1.03	0.95	0.87	0.80	0.76	20°S
25°N	0.71	0.78	0.88	0.98	1.06	1.11	1.09	1.02	0.93	0.82	0.73	0.69	25°S
30°N	0.64	0.72	0.83	0.96	1.06	1.11	1.08	1.00	0.89	0.77	0.67	0.61	30°S
35°N	0.56	0.66	0.79	0.93	1.04	1.10	1.07	0.98	0.86	0.71	0.59	0.53	35°S
Tilt													
	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	June	Month
	6.11	6.08	5.57	5.44	5.41	5.00	6.04	6.11	6.08	6.02	6.00	6.05	SRI
	18.01	18.02	17.55	17.48	17.49	18.00	18.14	18.17	18.10	17.58	17.00	17.55	SSe <sup>†</sup>
Southern Hemisphere Latitudes 0°-5° S													
† Time of sunrise for the middle of the month													
† Time of sunset for the middle of the month													
† Tilt angle of module from horizontal (See Figure d.31)													

Los módulos fotovoltaicos Kyocera se caracterizan por su alta eficiencia, por encima del 14%, que lo han convertido en el estándar de la industria fotovoltaica a nivel internacional. Por tal motivo, para este diseño es necesario emplear 06 módulos solares Kyocera fotovoltaico policristalino de alto rendimiento modelo LA361K51 de 51 Vatios y de dimensiones de 44.5 cm (ancho) x 98.5 cm (alto), cumpliendo los requerimientos eléctricos del sistema a diseñar.

La función prioritaria de las baterías en un sistema de generación fotovoltaico es acumular la energía que se produce durante las horas de luminosidad para poder ser utilizada en la noche o durante periodos prolongados de poca iluminación. Para este sistema se toma como referencia un 2 días, esto para cubrir la confiabilidad en el suministro de potencia en el sistema. Otra importante función de las baterías es la de proveer una intensidad de corriente superior a la que el dispositivo fotovoltaico puede entregar en el momento. Tal es el caso de un motor, que en el momento del arranque puede demandar una corriente de 4 a 7 veces su corriente nominal durante unos pocos segundos.

Las baterías de plomo-ácido se aplican ampliamente en los sistemas de generación fotovoltaicos con un desempeño muy por sobre los demás tipos de baterías empleados en sistemas fotovoltaicos. Dentro de la categoría plomo-ácido, las de plomo-antimonio, plomo-selenio y plomo-calcio son las más comunes.

La unidad de construcción básica de una batería es la celda de 2 Voltios. Dentro de la celda, la tensión real de la batería depende de su estado de carga, si está cargando, descargando o en circuito abierto. Se puede hacer una clasificación de las baterías en base a su capacidad de almacenamiento de energía (medido en Ah. a la tensión nominal) y a su ciclo de vida (número de veces en que la batería puede ser descargada en el 50% y cargada a fondo antes de que se agote su vida útil). La capacidad de acumulación de energía de una batería depende de la velocidad de descarga. La capacidad nominal que la caracteriza corresponde a un tiempo de descarga de 10 horas. Cuanto mayor es el tiempo de descarga, mayor es la cantidad de energía que la batería entrega. Un tiempo de descarga típico en sistemas fotovoltaicos es 100 horas. Por ejemplo, una batería que posee una capacidad de 80 Ah. en 10 horas (capacidad nominal) tendrá 100 Ah. de capacidad en 100 horas. Dentro de las baterías de plomo-ácido, las denominadas estacionarias de bajo contenido de antimonio son una buena opción en sistemas fotovoltaicos. Ellas poseen unos 2,500 ciclos de vida cuando la profundidad de descarga es de un 20 % (es decir que la batería estará con un 80 % de su carga) y unos 1,200 ciclos cuando la profundidad de descarga es del 50 % (batería con 50 % de su carga).

Tenemos como carga crítica  $0.4 \text{ amperios} \times 7 = 2.8 \text{ amperios}$  por parte de los motores DC con caja reductora.

El sistema requiere mantener 2.8 amperios por 2 días según diseño; es decir debe de mantener 2.8 amperios por 48 horas.

Entonces la batería debe de tener una capacidad de:

$$2.8 \times 48 = 134\text{Ah.}$$

De acuerdo a la capacidad requerida por parte del sistema para cumplir con la confiabilidad de los 2 días en el que sistema fotovoltaico, se selecciona la batería de plomo-ácido de 150Ah@12VDC de la marca HOPPECKE. [27]

Para la elección del controlador de carga se toma en consideración la carga que se desea controlar. El caso crítico del sistema es cuando se enciende el sistema de actuadores, pues se cuenta con motores que tienen una corriente nominal de 0.4 amperios. Entonces la corriente instantánea en el arranque secuencial de los motores es aproximadamente de  $0.4 \times 7 = 2.8 \text{ amperios}$ . Se optó por la selección de un controlador de carga de 10 amperios y de 12VDC, esto último debido a que el sistema

fotovoltaico trabaja con esta tensión para la carga de la batería del sistema fotovoltaico.

El acondicionamiento de la tensión en corriente continua puede ser realizada por un convertidor CC/CC o por un regulador de potencia, esto para la alimentación del circuito de control así como también de la alimentación de la parte de control del circuito de potencia adecuadamente aislado.

#### **3.4.2.4.a. Explicación básica del funcionamiento del sistema fotovoltaico**

El módulo fotovoltaico transforma la energía solar en energía eléctrica otorgando energía a la batería; el paso de esta energía es controlada por el controlador de carga el cual permite la carga y descarga de la batería del sistema fotovoltaico así como también de la alimentación del sistema de control de temperatura, este controlador de carga se alimenta de la energía suministrada por el módulo fotovoltaico a la batería.

El módulo fotovoltaico carga la batería, mientras que la tensión de salida del módulo fotovoltaico no esté fuera del rango de operación del controlador de carga (tensión máxima y mínima para evitar sobrecarga y descarga de la batería del sistema) el modulo seguirá alimentando a la batería. Cuando el modulo se encuentre fuera del rango de operación, la batería abastecerá de energía al controlador de carga y al sistema de control de temperatura.

También el controlador de carga regula la tensión suministrada al sistema de control de temperatura para poder alimentarla con la tensión adecuada para un buen funcionamiento del sistema de control de temperatura.

#### **3.4.2.4.b. Módulo fotovoltaico policristalino de alto rendimiento KYOCERA modelo LA361J51**

La tecnología de última generación de las celdas Kyocera, conjuntamente con procesos de fabricación totalmente automáticos, dan como resultado estos módulos fotovoltaicos policristalinos de alta eficiencia.

La eficiencia de conversión de las celdas solares Kyocera es superior al 14%.

El frente del módulo es de vidrio templado, de bajo contenido de hierro. Las celdas están encapsuladas entre capas de material plástico (E.V.A. o acetato vinil etilénico) para darles resistencia a la humedad, estabilidad a la radiación ultravioleta y aislamiento eléctrico. La cara posterior está formada por un polímero de capas múltiples de alta resistencia a la acción mecánica.

El marco es de aluminio anodizado, para dar al módulo su resistencia estructural y facilidad de instalación.

Se encuentran encapsuladas en una base de acetato vinilo etilénico con fluoruro de polivinilo lo que los hace capaces de resistir condiciones ambientales severas.

#### Características:

- La superficie de vidrio es resistente a los impactos y permite una máxima transmisión de la luz.
- Cada celda solar cristalina está encapsulada y adherida a la superficie del vidrio en capas múltiples de acetato vinil etileno y laminada con un respaldo de Tedlar blanco para asegurar una larga vida en condiciones ambientales extremas.
- Una caja de uniones para uso a la intemperie da espacio para todos los métodos de cableado incluyendo conectores de alivio a la tensión resistentes a la humedad.
- Marcos tubulares de aluminio anodizado añaden fuerza y durabilidad a los módulos.
- Orificios de montaje.
- Diodos de paso ya incluidos en la caja de uniones para una operación confiable.
- Los módulos Kyocera están fabricados cumpliendo estándares internacionales y de Estados Unidos. Todos son probados en la fábrica para verificar un rendimiento superior.
- Todos los módulos Kyocera tienen garantía de 20 años de entregar al menos 80% de la potencia especificada.

Los módulos fotovoltaicos policristalinos de KYOCERA sobrepasan las especificaciones internacionales respecto a los siguientes ensayos:

- De ciclado térmico.
- De choque térmico.
- De ciclado a alta temperatura y congelamiento a elevada humedad
- De aislamiento eléctrico.

Certificados:

- U.L. 1703, 3
- ISO 9000
- CEC SPEC 503
- Clase 1, División 2, Grupos A, B, C y D
- De impacto de granizo.
- De cargas mecánicas y de torsión.
- De niebla salina.
- De exposición a la luz y al agua.
- De exposición a campo.



Figura 13: Paneles solares Kyocera LA361J51

#### 3.4.2.4.c. Controlador de carga y descarga SunSaver modelo SS-10L-24V

Controlador de carga y descarga especialmente diseñado para sistemas fotovoltaicos en condiciones climáticas duras.

El controlador de carga regula el estado de carga y descarga entre límites preestablecidos. El voltaje de la batería se mide y se toma como factor principal para estimar el estado de carga, además desconecta la carga cuando la batería esta por descargarse (desconexión por bajo voltaje LVD).

Proporciona un control de carga y descarga seguro a la batería solar. El uso de una avanzada tecnología y producción automatizada provee nuevas características que proporcionan un costo competitivo.

El regulador es UL enumerado y diseñado para sistemas solares caseros y aplicaciones profesionales.

- Posee un chasis resistente para ser empleado en el campo industrial.
- Rango de operatividad de 6, 10 o 20 Amperes, 12 o 24VDC, cumpliendo los requerimientos del diseño del sistema.
- Encapsulado para protección en condiciones de humedad y marítimas.
- Indicador de carga con LED verde y bajo voltaje con LED rojo.
- Compensación de Temperatura.
- Aprobado para usos en lugares peligrosos. Clase 1 División 2, Grupos A, B, C y D.
- No necesita compensaciones adicionales.



Figura 14: Controlador de carga y descarga

#### **3.4.2.4.d. Batería de plomo-ácido HOPPECKE de 105Ah. Modelo Solar.Bloc12V150**

Batería estacionaria de plomo-ácido y recipiente transparente para una verificación visual rápida de las condiciones del elemento. Se presenta en vasos de 2V con capacidades comprendidas entre 221Ah-4464Ah (C100). Idóneas para aplicaciones con necesidades de descargas profundas y largos periodos con poca carga.

HOPPECKE ha desarrollado una batería especial para energía solar, denominada "SOLAR.BLOC". Esta batería ha sido pensada para resistir y ofrecer la máxima eficacia en un continuo ciclo de carga (durante la insolación) y descarga (durante la utilización de la energía).

Una batería así trabaja en condiciones mucho más duras que la de arranque de un coche.

Las principales ventajas frente a una batería de arranque o batería normal son:

- Gran resistencia cíclica, alargando la vida.
- Mejora del rendimiento eléctrico.
- Baja auto descarga.
- Mínimo mantenimiento. Alta resistencia a la descarga profunda.
- Sencillez de carga.

La calidad con que son fabricadas las baterías solares HOPPECKE significa un largo período de vida para la batería y, por consiguiente, un ahorro económico muy importante.

Aplicaciones fotovoltaicas:

- Electrificación de viviendas.
- Bombeo y riego.
- Pastores eléctricos.
- Balizas luminosas

Propiedades

- Baterías estacionarias especialmente diseñadas para sistema e instalaciones fotovoltaicas.

- Placas de rejilla especialmente reforzadas y con aislamiento especial para empleo cíclico medio.
- Larga vida en ciclos de carga y descarga.
- Reducido consumo de agua.
- Reducida auto descarga.
- Recarga mejorada tras largo tiempo en reposo.
- Mayor tensión de descarga mediante conexiones interiores más cortas.
- Menor resistencia interna.
- Material plástico con alta resistencia a impactos.
- Duración útil sin esfuerzo cíclico de unos 15 años.



Figura 15: Batería de plomo-ácido de electrodo líquido

### **3.4.3. Funcionamiento del programa de control**

El programa desarrollado para el control de temperatura se basa en la obtención del promedio de las temperaturas muestreadas por los diferentes sensores con los diferentes conversores análogo digital. Ésto es de suma importancia, pues dependiendo del resultado de esta operación matemática se llega a comparar el valor obtenido con los valores establecidos inicialmente como temperatura óptima, temperatura máxima y temperatura mínima respectivamente; luego dependiendo del valor en que se encuentre la variable promedio el controlador realiza una acción

adecuada para que la temperatura dentro del invernadero se mantenga en la mejor posible para las plantas; es decir dentro del rango permitido para el tipo de cultivo.

El programa es muy importante, debido a que la eficiencia del sistema de control a diseñar depende del programa desarrollado para el control de temperatura. La parte lógica es la más importante, el sistema depende de ésta para un buen desempeño del sistema de control; es decir, la fluidez de las rutinas a realizar por el programa influyen en el cuán rápido puede ser la respuesta del sistema.

Los datos obtenidos a la salida del amplificador deben de ser tratados para que puedan ser interpretados por el controlador.

Los datos son recibidos en los conversores análogo/digital por criterio de diseño tomo el valor crítico máximo (el mínimo es cero); el valor de temperatura máximo leído por el sensor debido al diseño de la parte de adaptación es de 63°C, es decir #63d en decimal, el cual en binario es #00111111b. Entonces como el conversor análogo digital tiene ocho dígitos los cuales al momento de realizar la lectura el conversor A/D coloca el valor leído en el registro del ADC de la siguiente forma #11111100b o #252d y como el valor máximo en la entrada del controlador deberá de ser #00111111b o #63d por diseño de la parte de adaptación de la señal, bastará con desplazar hacia la derecha dos veces el registro del ADC leído para obtener una lectura correcta del valor muestreado por el sensor.

Luego de tratar la señal recibida por los cuatro conversores análogo/digital del controlador, se realiza el promedio de los cuatro valores obtenidos en la lectura de los sensores.

$$sensor0 + sensor1 + sensor2 + sensor3 = suma \dots\dots\dots(4)$$

Donde *sensorx*: valor en el conversorx donde  $x = 0,1,2,3$ .

$$\frac{suma}{4} = promedio \dots\dots\dots(5)$$

Este valor promedio de temperatura es almacenado en un registro para luego ser comparado con los diferentes valores de temperatura, los cuales rigen el comportamiento del sistema de control de temperatura.

De acuerdo a la comparación realizada entre el valor promedio obtenido en la lectura de los sensores con la temperatura máxima biológica, temperatura mínima biológica y

temperatura óptima el programa activa o desactiva los pines de control de los diferentes actuadores.

Los pines empleados como entrada (convertor análogo/digital) y salida del controlador se detallan a continuación:

- Pin 23 del controlador es el Puerto C0 o convertor análogo/digital 0 (ADC0) configurado como entrada análogo/digital 1 del sistema de control de temperatura.
- Pin 24 del controlador es el Puerto C1 o convertor análogo/digital 1 (ADC1) configurado como entrada análogo/digital 2 del sistema de control de temperatura.
- Pin 25 del controlador es el Puerto C2 o convertor análogo/digital 2 (ADC2) configurado como entrada análogo/digital 3 del sistema de control de temperatura.
- Pin 26 del controlador es el Puerto C3 o convertor análogo/digital 3 (ADC3) configurado como entrada análogo/digital 4 del sistema de control de temperatura.
- Pin 14 del controlador es el Puerto B0 configurado como salida 1 del sistema de control de temperatura.
- Pin 15 del controlador es el Puerto B1 configurado como salida 2 del sistema de control de temperatura.
- Pin 16 del controlador es el Puerto B2 configurado como salida 3 del sistema de control de temperatura.
- Pin 17 del controlador es el Puerto B3 configurado como salida 4 del sistema de control de temperatura.

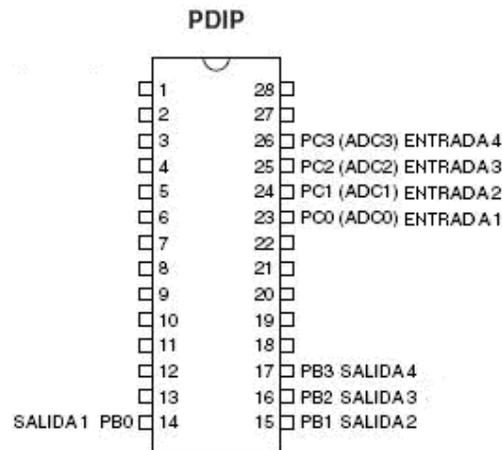


Figura 16: Distribución de pines empleados en el sistema de control de temperatura.

La secuencia de la lógica del programa se detalla en el diagrama de flujo del programa (Ver Figura 24: Diagrama de flujo del programa).

Los valores preestablecidos de control se pueden modificar dependiendo de la especie a cultivar.

Cabe señalar que los valores con que el sistema cuenta son valores que abarcan un gran número de especies. A continuación se muestran los valores preestablecidos:

- Temperatura máxima: 27°C
- Temperatura óptima: 16°C
- Temperatura mínima: 12°C

Si se desea un control más riguroso para una especie determinada basta con modificar los valores de las siguientes variables en el programa: “toptima” para la temperatura óptima, “tmaxima” para la temperatura máxima biológica, “tminima” para la temperatura mínima biológica.

El programa del sistema de control está abierto a mejoras o modificaciones que le otorguen al sistema de control un mejor desempeño en la tarea de control de

temperatura, para ello se cuenta con la documentación del mismo. La modificación podría contener un mayor rango de operación del sistema de control.

### **3.4.3.1. Explicación básica del funcionamiento del programa de control**

Los valores de las temperaturas con las cuales el sistema realiza el control de temperatura son preestablecidos al inicio del programa del controlador.

El programa realiza un llamado de la subrutina de lectura de los cuatro conversores análogo/digital. Estos valores son adaptados en cada convertor para una buena lectura de la data.

Se realiza un promedio de los cuatro valores de temperatura obtenidos. Luego el programa efectúa una comparación entre el promedio resultante con los valores preestablecidos de temperatura máxima, mínima y óptima.

Dependiendo del resultado de la comparación el programa habilita (ON) o deshabilita (OFF) los pines de control de los diferentes actuadores del sistema de control.

Después que los actuadores se activan o desactivan de acuerdo a la comparación realizada, el programa realiza un salto para luego nuevamente efectuar la lectura, la adaptación, el promedio, la comparación, el encendido o apagado de los actuadores y así sucesivamente; es decir, el programa del sistema de control de temperatura se encontrará operando todo el periodo de tiempo que se encuentre energizado el sistema.

## **3.5. Diagramas de bloques y de esquemáticos de los circuitos del sistema de control de temperatura**

### **3.5.1. Diagramas de bloques**

El sistema de control de temperatura se representa en la Figura 17. El sensor toma medida de la temperatura y la envía al controlador, que se encarga de realizar la comparación de la muestra tomada por el sensor con los valores de temperaturas

aconsejados para un correcto desarrollo de las plantas. El controlador de acuerdo a la comparación realizada envía una señal de encendido o apagado (ON/OFF) a los actuadores, los cuales modifican el valor de temperatura interna del invernadero. Luego el sensor toma medida del valor de la temperatura y envía la señal al controlador. El ciclo se repite sucesivamente, pues el controlador esta muestreando el valor del sensor cada cierto periodo de tiempo (2 segundos aproximado).

Luego el controlador realizará una comparación con los valores máximos y mínimos biológicos y letales, dependiendo del resultado de la comparación el controlador elegirá la mejor opción para que la temperatura se encuentre cercana a la temperatura óptima del cultivo. Es decir coloca '0's o '1's lógicos a la salida del controlador para manejar los actuadores respectivos.

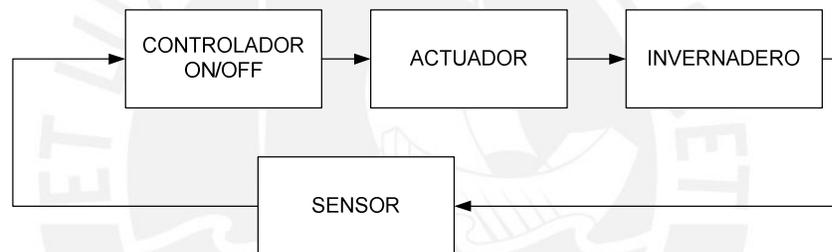


Figura 17: Diagrama de bloques del sistema de control de temperatura.

### 3.5.2. Diagramas esquemáticos de los circuitos

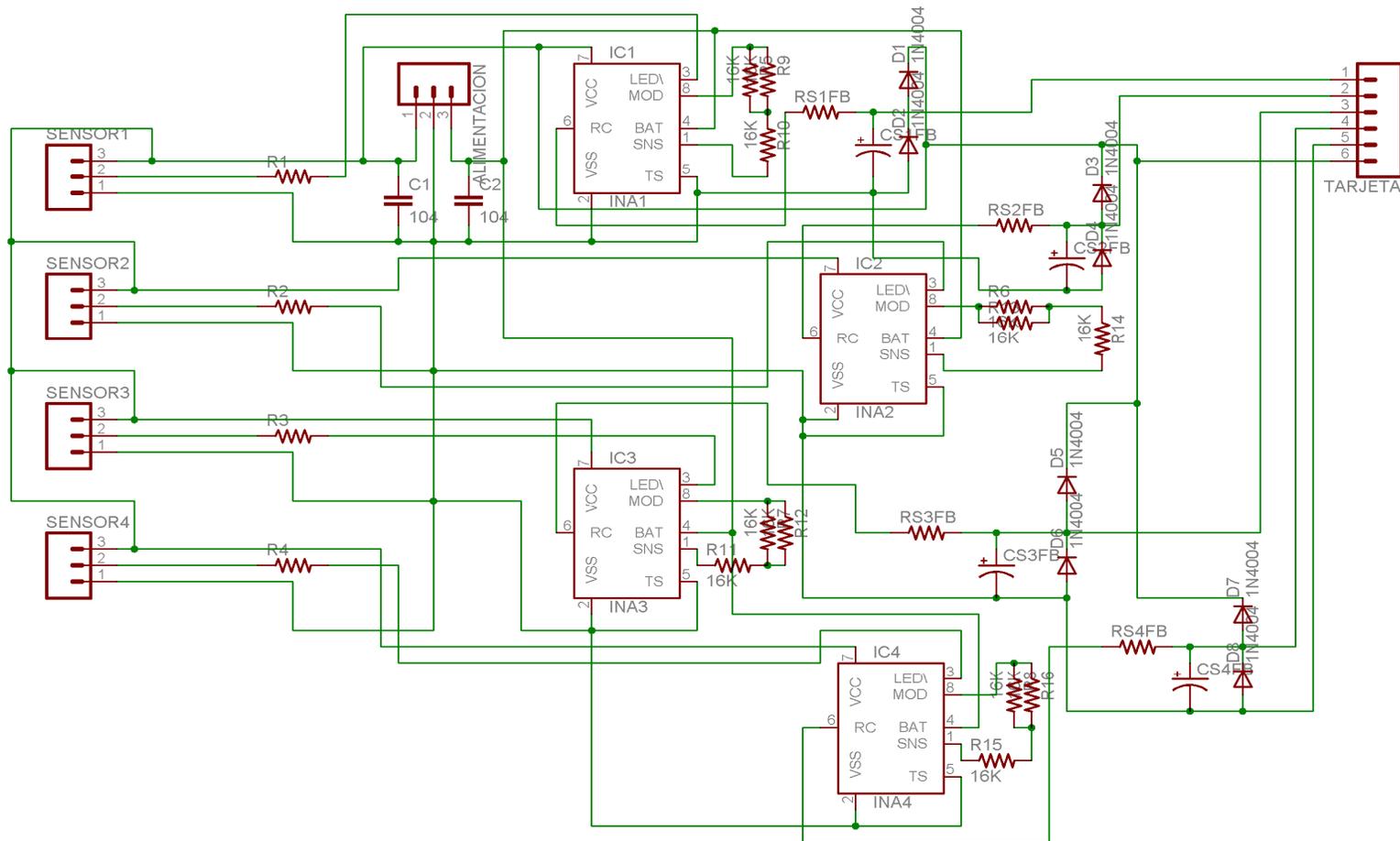


Figura 18: Diagrama del circuito esquemático de la adaptación de señal.

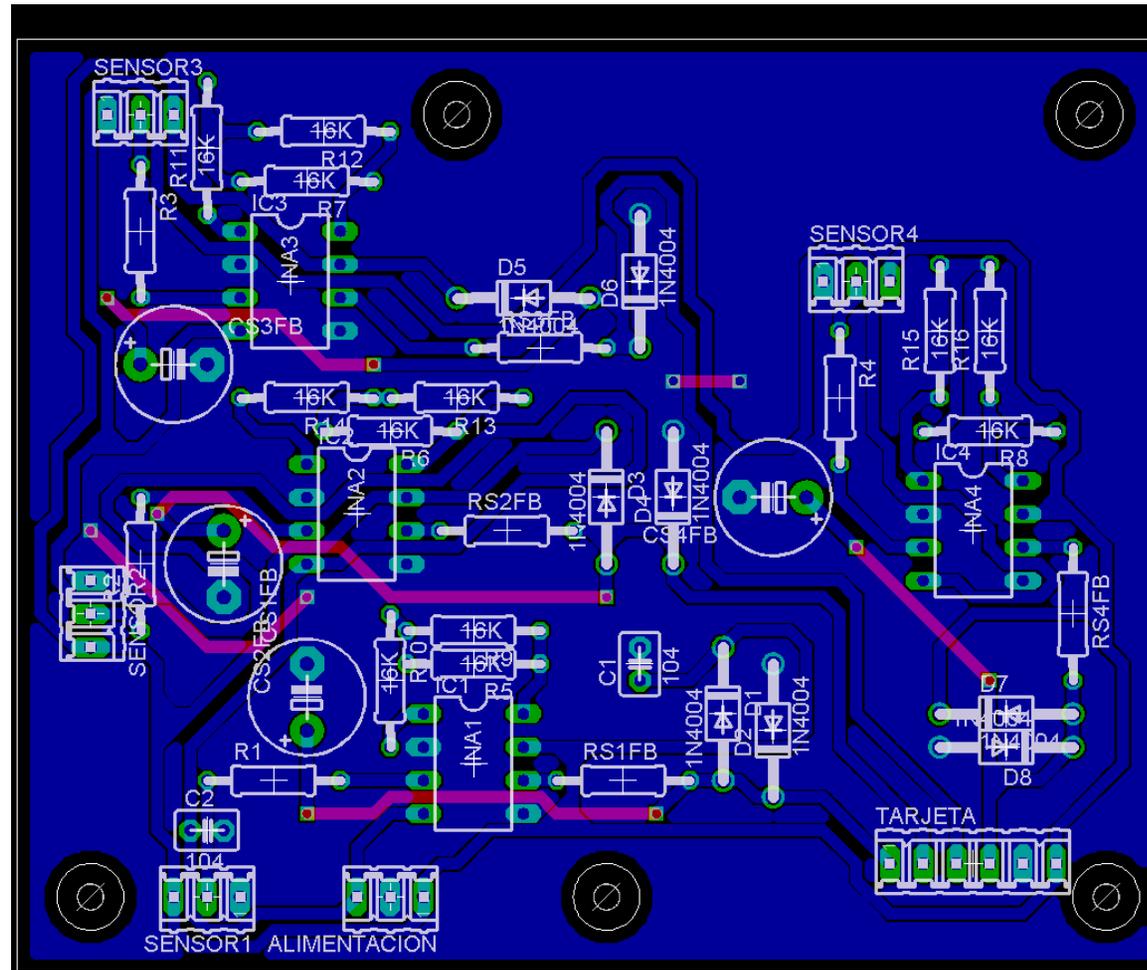


Figura 19: Diagrama del circuito impreso de la adaptación de señal.

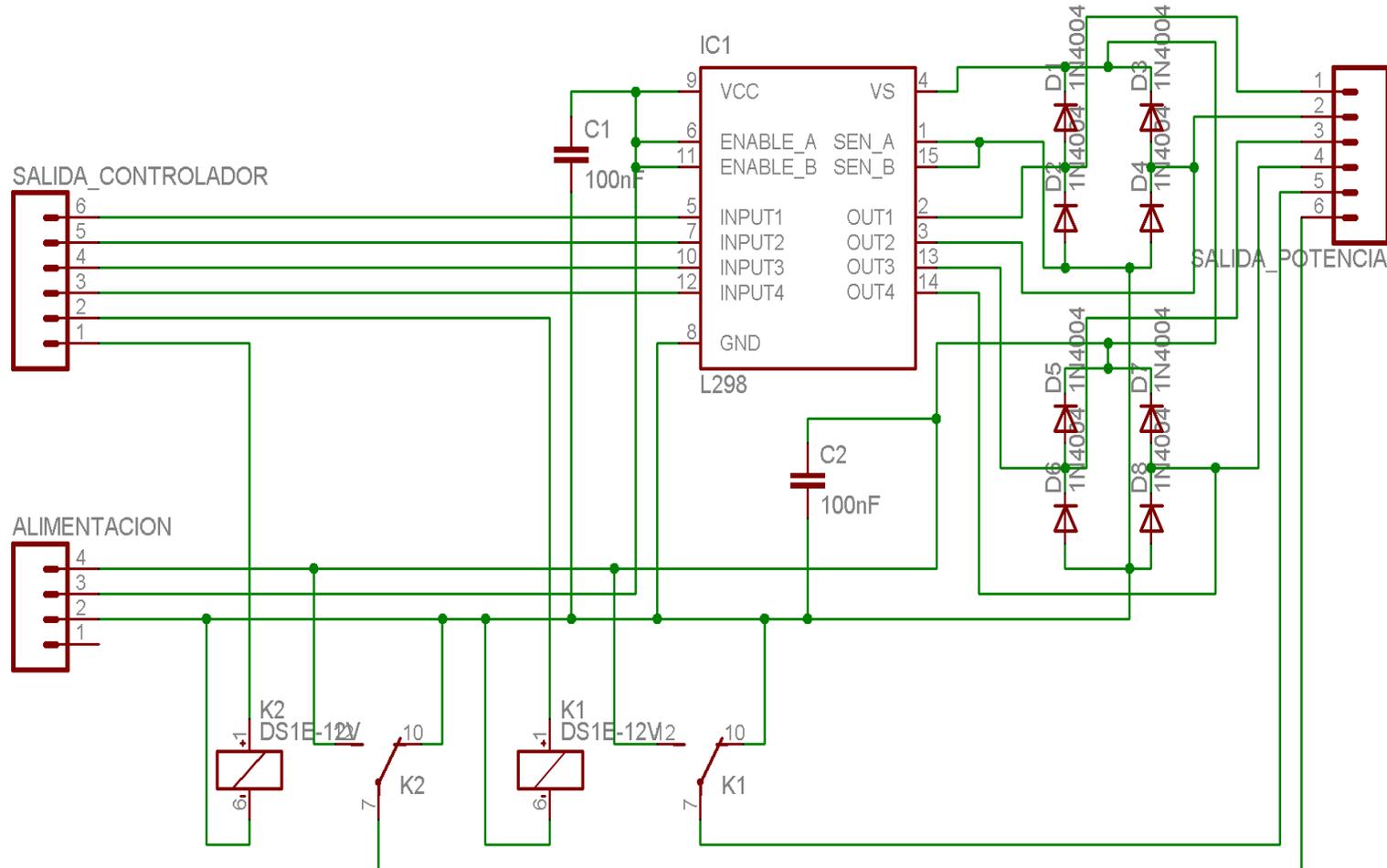


Figura 20: Diagrama del circuito esquemático del circuito de electrónica de potencia del sistema.

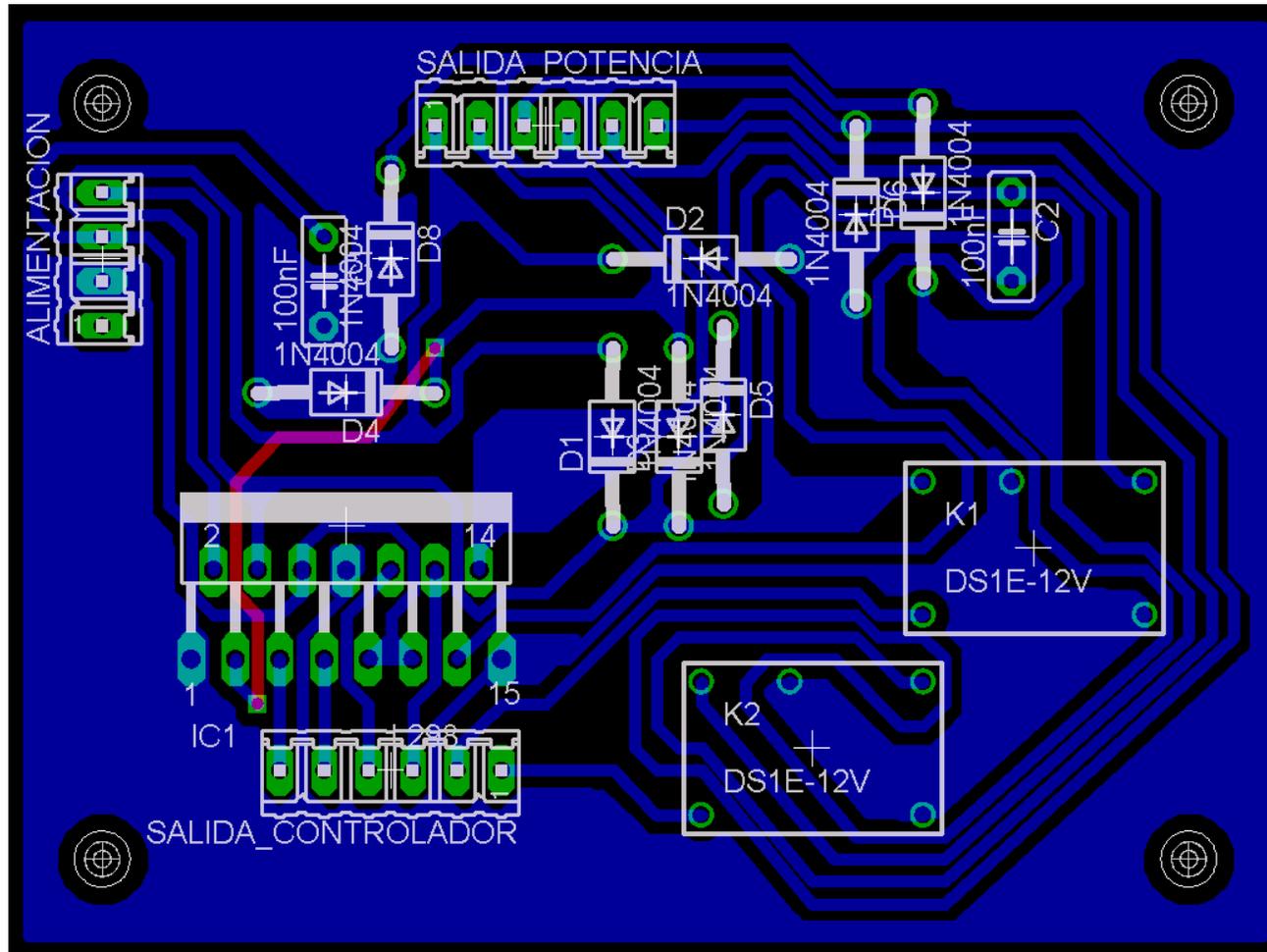


Figura 21: Diagrama de circuito impreso de la parte del circuito de potencia del sistema de control.

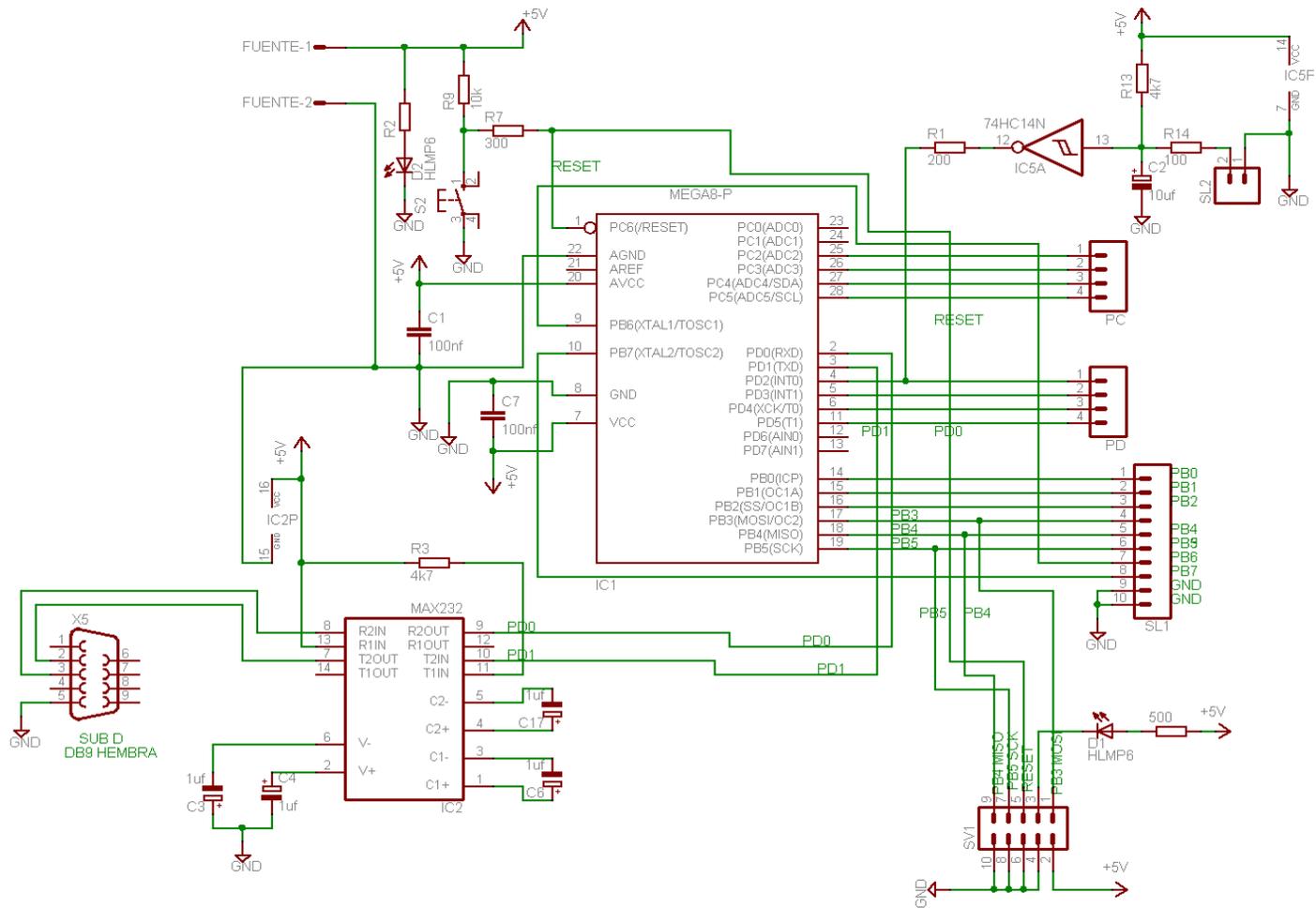


Figura 22: Circuito esquemático completo de la tarjeta del controlador.

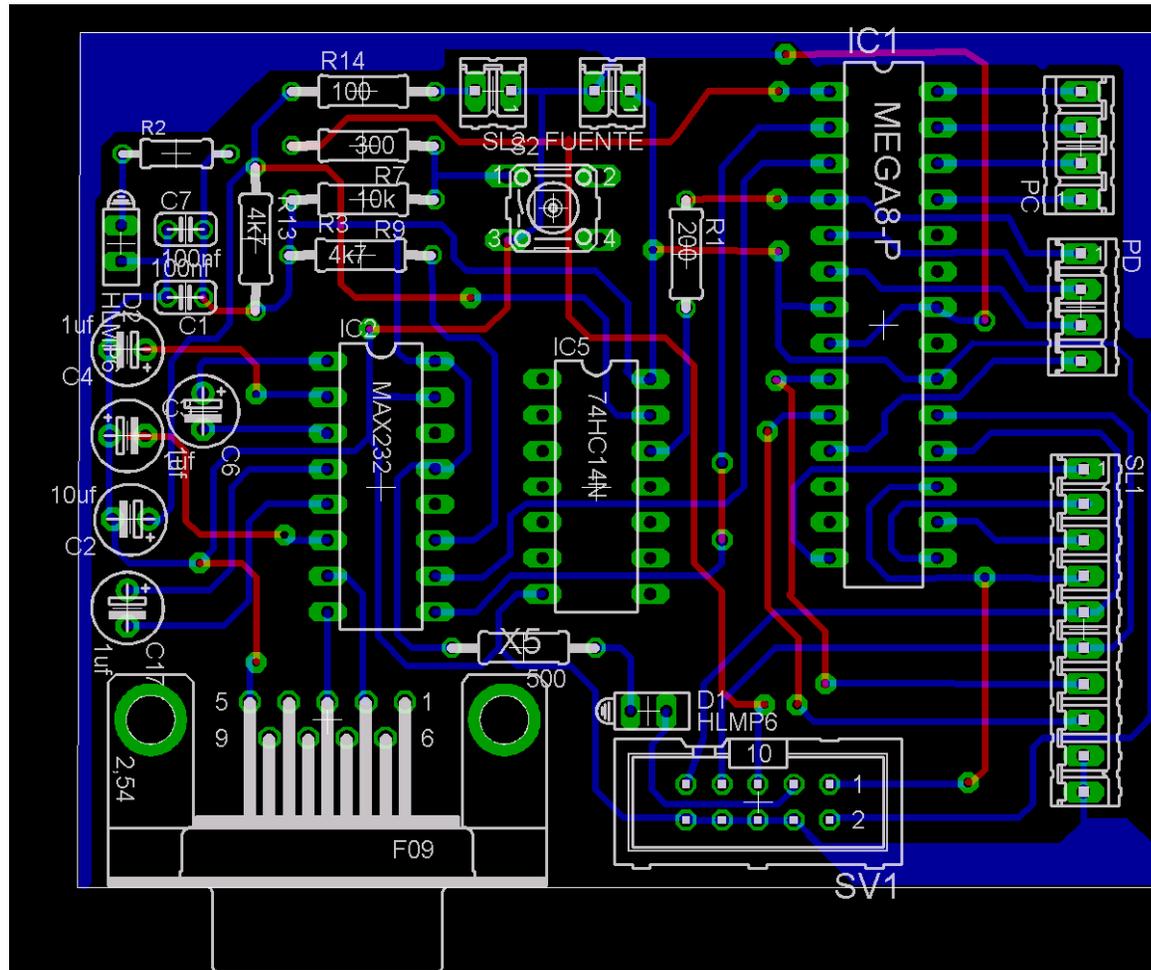


Figura 23: Circuito impreso de la tarjeta del controlador.

### 3.6. Diagrama de flujo y esquema del sistema de control de temperatura

#### 3.6.1. Diagrama de flujo del programa

El controlador por medio del software se encargara de leer los puertos A/D del controlador para luego comparar los valores muestreados con los valores de temperatura óptima, temperatura mínima biológica y temperatura máxima biológica de las plantas y de acuerdo a la comparación realizará una acción particular para la obtención de una temperatura óptima interna del invernadero. Este proceso se realiza constantemente cada 2 segundos aproximado.



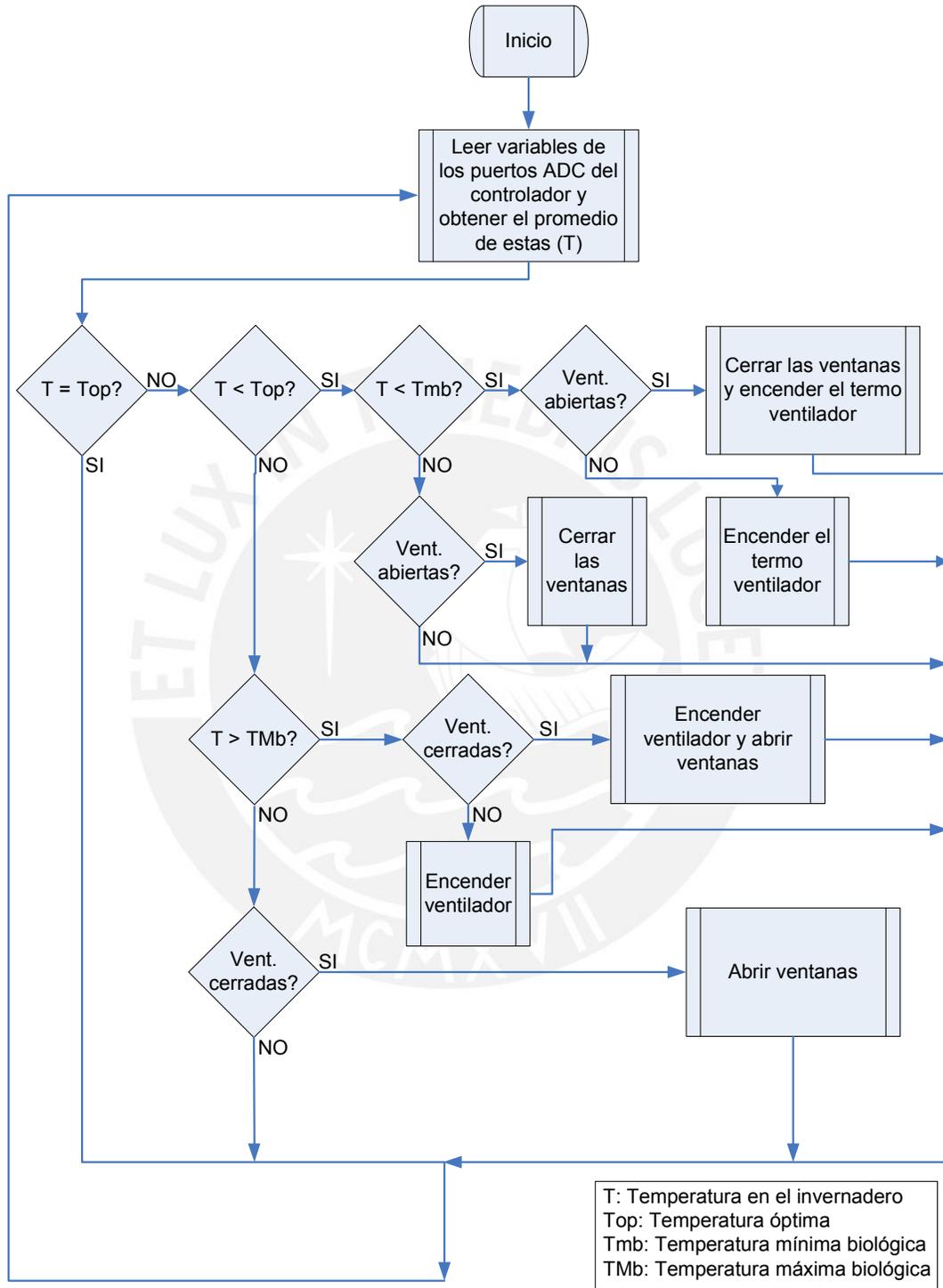


Figura 24: Diagrama de flujo del programa

### 3.6.2. Esquema del sistema de control de temperatura

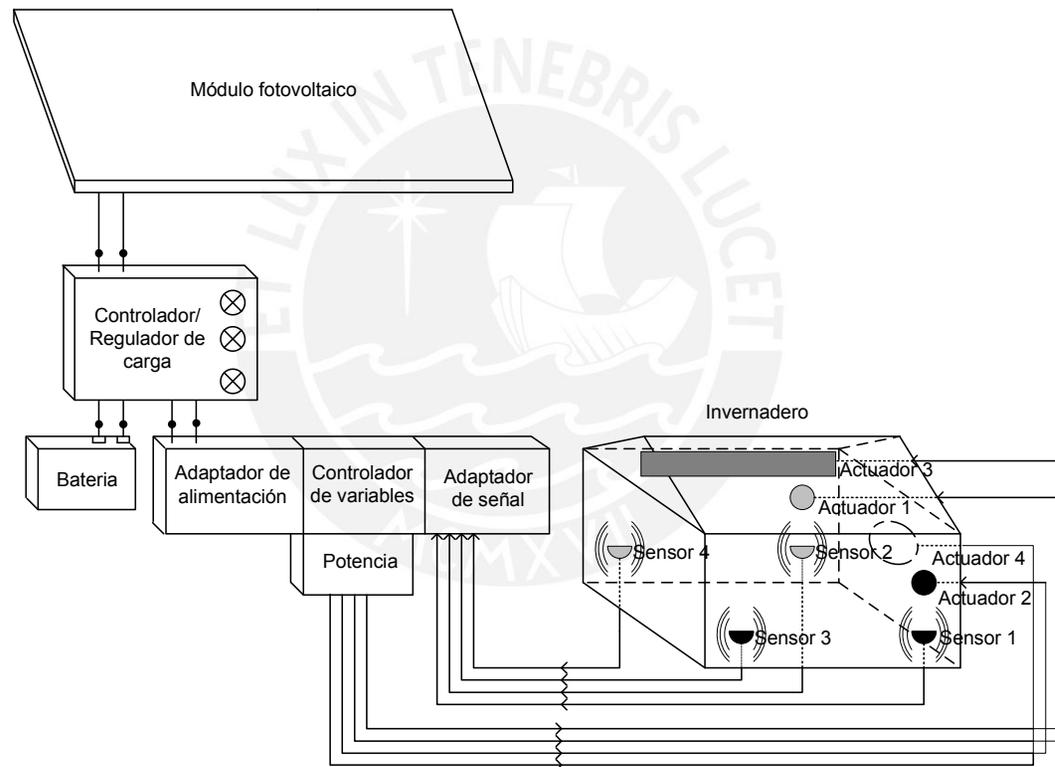


Figura 25: Sistema de control ON/OFF de temperatura bajo invernadero empleando energía solar y gases naturales.

## **CAPÍTULO 4**

### **PRUEBAS, SIMULACIÓN, RESULTADOS Y ANÁLISIS DE COSTOS**

#### **4.1. Pruebas**

Las pruebas de los circuitos han sido realizadas en laboratorio obteniendo los resultados esperados cumpliendo con el objetivo de diseño de cada uno.

##### **4.1.1. Prueba del circuito de adaptación de señal**

La prueba realizada en laboratorio mostrada a continuación es la correspondiente a la señal de salida del sensor de temperatura comparada con la señal de entrada al controlador, el circuito de adaptación de señal tiene una ganancia de 8.

El programa está realizado para que se pueda trabajar en un rango de 0°C a 63°C. Debido a esto, en la entrada del controlador se tendrá como mínimo y máximo de señal de 0 VDC y 5.04VDC respectivamente; pero como el circuito de adaptación de señal posee un circuito de protección para el controlador entonces se tiene una señal de 0VDC y 5VDC como mínimo y máximo, además los sensores de temperatura están dispuestos de manera que operan desde 2°C hasta 150°C por lo que el rango operativo del sistema de control se ve reducido de 2°C a 62°C. Si la temperatura estuviese fuera del rango de operación, el sistema operará como si la temperatura ambiente en el invernadero fuese uno de los dos extremos del rango en el cual opera; tomará las medidas necesarias para que la temperatura interna del invernadero se aproxime a la temperatura óptima de cultivo.

La respuesta del circuito de adaptación de señal como se puede apreciar en la Figura 28 es casi lineal. Por ejemplo se tenía una temperatura muestreada por el sensor de 225.3mV y a la salida del sistema se tenía 1.8064V el cual debería de ser 1.8024V por lo que el error máximo del sistema de adaptación es de 0.332% teniendo como referencia las pruebas realizadas en laboratorio.

Voltaje de entrada al controlador (V) Vs. Voltaje de salida del sensor de temperatura (mV)

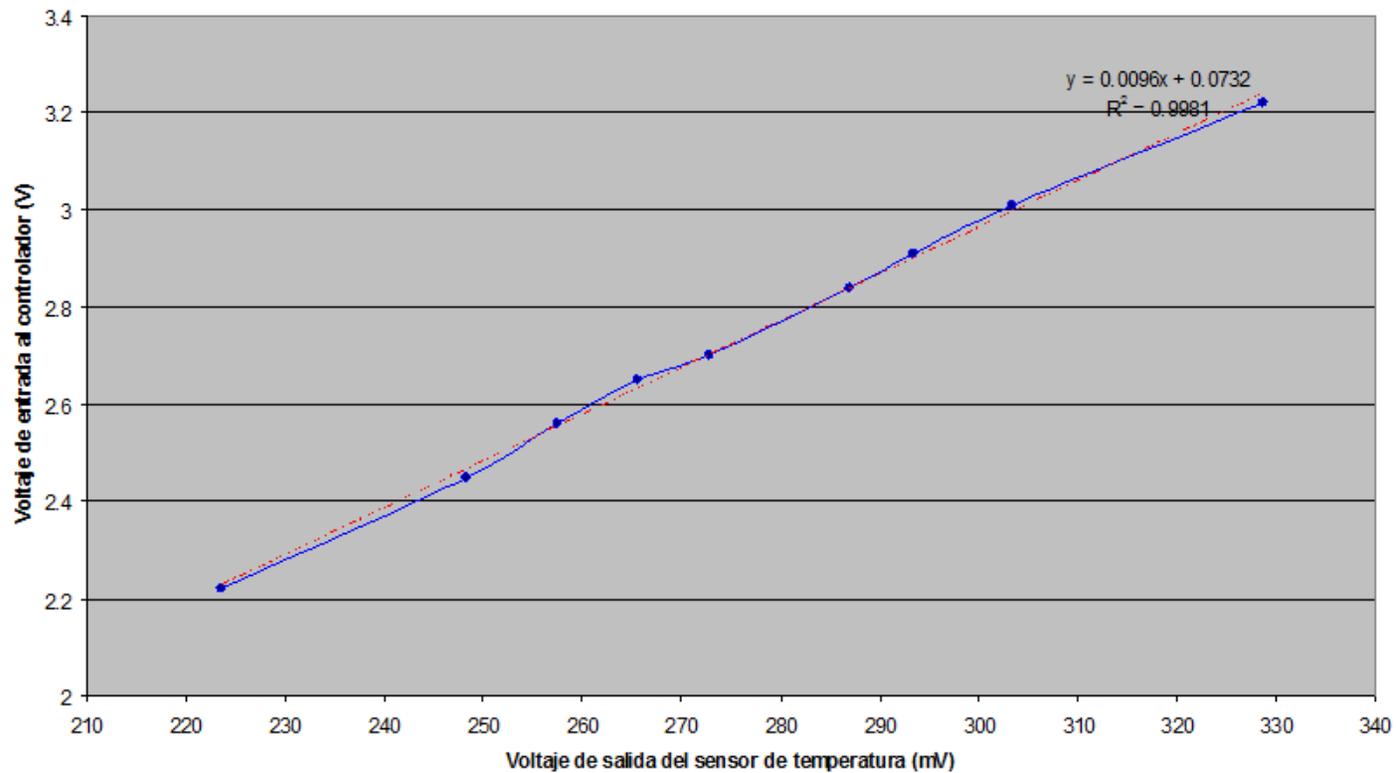


Figura 28: Pruebas de la adaptación de señal

#### **4.1.2. Prueba del circuito de potencia**

La prueba del circuito de potencia cumplió con su objetivo, que es el de aislar la parte de potencia con la parte de control del sistema de control y la de transmitir los comandos deseados; es decir habilitar y deshabilitar los diferentes actuadores que se requieren para el control de la temperatura interna del invernadero. La tarjeta de potencia fue implementada para realizar la prueba en mención.

#### **4.1.3. Prueba del circuito de control**

Se programó la tarjeta de control, la cual fue implementada, con el programa de control de temperatura. En las pruebas de control, el circuito cumplió la tarea de controlar la temperatura interna del invernadero del sistema de control.

La respuesta del circuito de control es el requerido. Cumple con las funciones de recepción de los datos enviados por los sensores y de transmisión de los comandos por parte del controlador. Todo esto sin pérdida de señal alguna.

### **4.2. Simulaciones**

Se pretende realizar la simulación en tiempo real del comportamiento del programa del sistema.

#### **4.2.1. Simulación del programa**

El programa se simuló exitosamente en AVRstudio y en VMLAB obteniéndose la respuesta deseada para los diferentes valores a la entrada de los diferentes pines empleados del ADC del controlador en ambos simuladores.

El sistema siempre opta por que la temperatura interna del invernadero se encuentre lo más próxima a la temperatura óptima preestablecida.

El sistema una vez encendido se hace autónomo. Siempre y cuando se encuentre debidamente energizado.

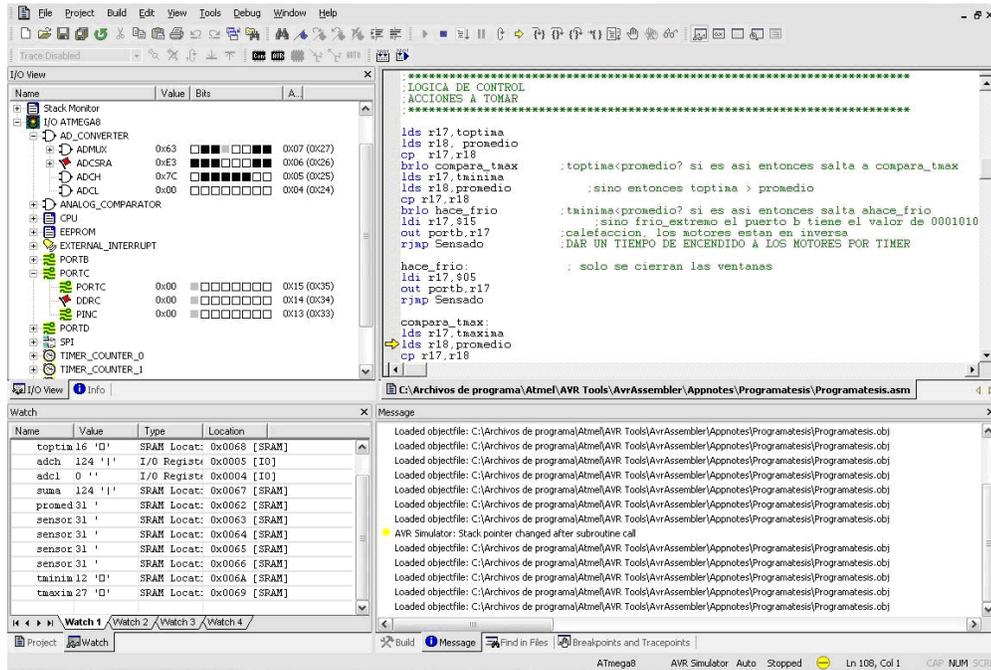


Figura 29: Simulación del programa en AVRstudio

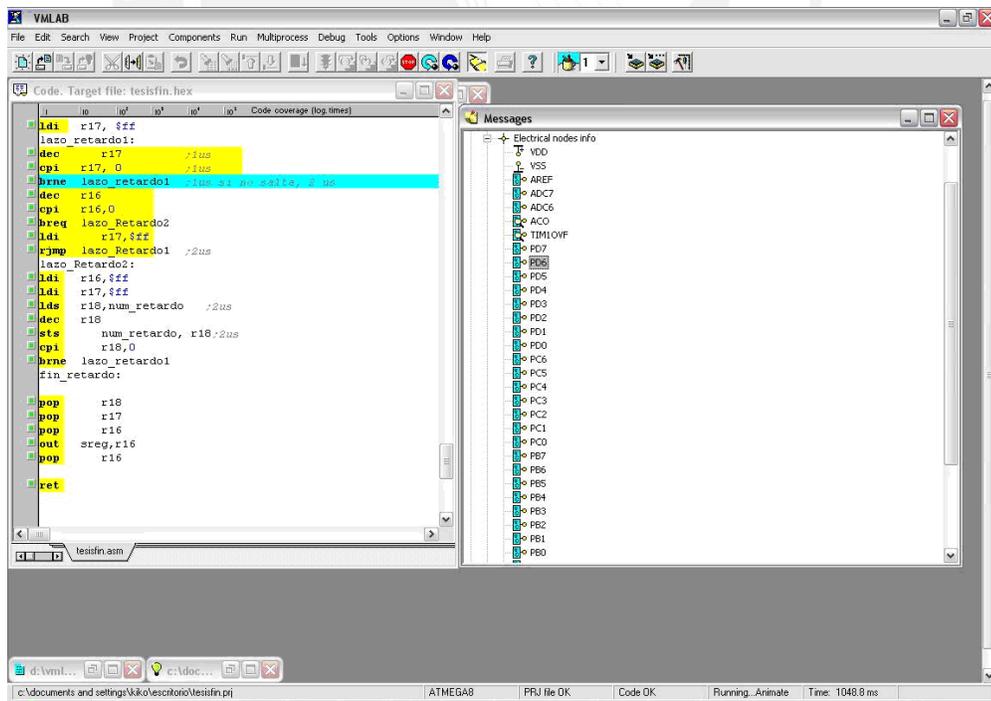


Figura 30: Simulación del programa en VMLAB

El programa se simuló para todos los casos posibles de los valores en las entradas de los conversores análogo/digital obteniéndose una respuesta adecuada de control del sistema. El programa dentro del controlador se comporta idénticamente como en la simulación realizada. Siempre se opta por la mejor alternativa de temperatura para el ambiente interno del invernadero de acuerdo a los valores de temperatura preestablecidos. El encendido y apagado de los actuadores del sistema de control de temperatura es secuencial.

#### 4.3. RESULTADOS

El sistema de control de temperatura cumple con la función de controlar la temperatura dentro del rango en el cual se ha diseñado el sistema y dentro de los límites de temperatura que se le otorgan al sistema mediante el programa (valores preestablecidos); para mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas en el invernadero. Se realizó una maqueta del sistema con la tarjeta de control y la de potencia para realizar pruebas y obtener resultados.

Con el control de la temperatura interna del invernadero se logra crear un microclima interno de acuerdo a la especie a cultivar, este microclima es el adecuado para un buen desarrollo y crecimiento de las plantas cultivadas.

Los resultados obtenidos son los deseados, pues ante una variación de temperatura el sistema de control acciona a los actuadores regulando la temperatura interna del invernadero y tratando de que ésta se mantenga cercana a la temperatura óptima o dentro de un rango en el cual el cultivo no se vea afectado drásticamente.

#### 4.4. ANÁLISIS DE COSTOS

Se analizó el presupuesto económico del costo de diseño del sistema de control de temperatura en invernadero. Los componentes utilizados para el diseño se eligieron debido a que poseen las características adecuadas (por ejemplo: elementos de conmutación rápida) sin dejar de lado los precios de los equipos.

El equipo que posee mayor precio es el panel solar del fabricante KYOCERA; este equipo en ciertas circunstancias es otorgado libremente (donado) por los fabricantes.

El precio del equipo calefactor puede variar, debido a que el fabricante puede realizar las modificaciones requeridas por parte del usuario para que las características del calefactor sean los que el usuario requiere (voltaje, corriente, etc.).

Tabla 4: Lista de componentes del sistema de control de temperatura

Componente	Cantidad	Precio por unidad S/.	Precio Total S/.
ATMEGA8L	1	20.00	20.00
INA126P	4	20.00	80.00
MCT6	4	5.00	20.00
L298N	2	15.00	30.00
LM35DZ	4	5.00	20.00
2N3904	4	0.50	2.00
KYOCERA LA361J51	6	3,375.78	20,254.68
Resistencias de precisión	4	2.50	10.00
Motores con caja reductora	4	220.00	880.00
1N4148	4	2.50	10.00
Capacitores	10	5.00	50.00
Circuitos impresos	3	30.00	90.00
Tarjetas	4	20.00	80.00
Batería	1	548.58	548.58
Controlador de carga	1	404.14	404.14
Unidad de calefacción a gas	1	2,503.00	2,503.00
Tanque de gas de 36 litros	1	250.00	250.00
36 litros de gas	1	120.00	120.00
Conectores, cables, etc.	1	250.00	250.00
Mano de Obra	1	2,000.00	2,000.00
Costo del diseño	1	2,500.00	2,500.00
<b>TOTAL</b>			<b>30,122.40</b>

El monto total del diseño del sistema de control de temperatura bajo invernadero empleando energía solar y gas natural es de S/. 30,122.40 nuevos soles. El precio del sistema se ve afectado debido a que los paneles solares son de muy alto costo, al igual que la unidad calefactora.

## CONCLUSIONES

1. El uso del sensor de temperatura LM35 en configuración básica, con rango de 2°C a 150°C en el sistema de control de temperatura, sumado al acondicionamiento de la señal mediante el amplificador operacional INA126P con ganancia de 8 y al algoritmo del control ON/OFF, proveen al sistema de control de temperatura diseñado de un rango de operación de 2°C a 63°C y una resolución del sistema +/-1°C. Por lo tanto es posible diseñar y construir un sistema de control de temperatura bajo invernadero empleando el transductor de temperatura LM35 como dispositivo para el sensado de la temperatura.
2. La implementación del amplificador de instrumentación INA126P como dispositivo en el acondicionamiento de la señal del sistema de control de temperatura es adecuada, debido a las características que ofrece el circuito integrado. Por tanto es factible diseñar y construir un sistema de control de temperatura empleando este amplificador como elemento en el acondicionamiento de la señal del sistema.
3. Resulta de suma importancia en el sistema de control de temperatura la estrategia a seguir para con los diferentes valores de temperatura obtenidos por los sensores. La temperatura no es homogénea en todo el espacio del invernadero. La estrategia empleada, promedio de los valores de temperatura, proporciona un valor próximo a la temperatura interna del invernadero, debido al algoritmo utilizado.
4. El sistema de control diseñado otorgaría cierta autonomía al invernadero sin depender constantemente de la mano del hombre.
5. Se puede concluir, debido a la mejora de las condiciones de temperatura del cultivo ofrecidas por el sistema de control de temperatura, que las especies cultivadas presentarían un aumento en cuanto a la calidad y que se reduciría el periodo de cosecha de las especies cultivadas en el invernadero.

6. El diseño del sistema de control reúne las condiciones necesarias para la implementación del sistema de control de temperatura empleando energía solar y gases naturales; haciendo al sistema independiente de la red de energía doméstica y aplicativa en zonas de difícil acceso.

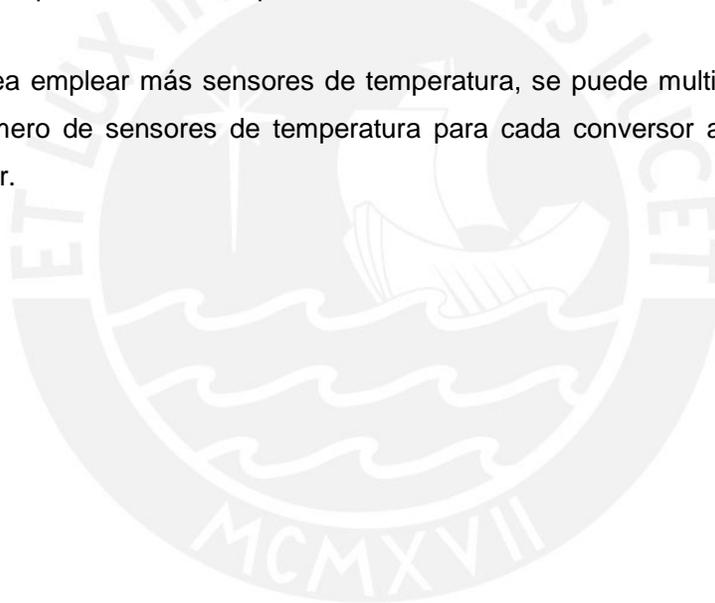


## RECOMEDACIONES

Se recomienda el uso de resistencias de precisión para la parte de amplificación, pues es de vital importancia en el sistema obtener una señal que sea equivalente con la temperatura muestreada por los diferentes sensores de acuerdo al diseño previo; es decir, la amplificación debe de ser lineal en todo el rango del sistema.

Si se desea abarcar un volumen de grandes dimensiones para el control de la temperatura, entonces se debe de emplear un nuevo algoritmo para el cálculo de la temperatura en el volumen del invernadero. Este debe de otorgarle un resultado lo más cercano posible con la temperatura real del invernadero.

Si se desea emplear más sensores de temperatura, se puede multiplexar las salidas de un número de sensores de temperatura para cada conversor análogo/digital del controlador.



## ANEXOS

1. Especificaciones técnicas y procedimientos de evaluación del sistema fotovoltaico y sus componentes para electrificación rural del Perú.
2. Guía de usuario del controlador ATMEGA8-8L.
3. Hoja de datos del circuito integrado LM35.
4. Hoja de datos del circuito integrado L298N.
5. Catálogo calentador a gas línea fuego directo (CGFD).
6. Especificaciones técnicas del controlador de carga SunSaver.
7. Hoja de datos del opto acoplador dual MCT6.
8. Módulo fotovoltaico policristalino de alto rendimiento Kyocera LA361K51.
9. Hoja de datos del circuito integrado 2N3904.
10. Hoja de datos del circuito integrado INA126.
11. Hoja de datos del circuito integrado IN4148.
12. Programa de control de temperatura.
13. Hoja de datos de la batería 150Ah. HOPPECKE.
14. Hoja de datos del motor DC con caja reductora Modelo 07350-250.
15. Gráficos de la maqueta con referencia del invernadero.
16. Catálogo Kyocera.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Boletín Informativo Número 12 Universidad Nacional Agraria La Molina  
Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral, Lima - Perú, 2001.  
<http://www.lamolina.edu.pe/hidroponia/boletin12.htm> [15/02/07].
- [2] J. Houghton. *The Physics of Atmospheres. The Enhanced greenhouse effect*,  
Cambridge University Press, Cambridge - United States, pág. 255, 2002.
- [3] Revista de ciencia y tecnología CRISOL, Estación Experimental Fabio Baudrit:  
Puertas abiertas a la innovación, Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 2003.  
[http://www.odi.ucr.ac.cr/docs/crisol/revista\\_crisol\\_10.pdf](http://www.odi.ucr.ac.cr/docs/crisol/revista_crisol_10.pdf) [21/09/07].
- [4] Líder en la exportación de invernaderos al mundo, Asturias - España, 2005.  
<http://canales.elcomerciodigital.com/empresa/empresas/050220.htm> [21/09/06].
- [5] Información agrícola, Lima - Perú,  
<http://www.portalagrario.gob.pe/agricola/index.shtml> [21/09/06].
- [6] C. Romero, Diseño y construcción de invernaderos y utilización de acolchados.  
Presentación, Tacna - Perú, 2007.  
[http://www.agritacna.gob.pe/eventos.shtml?AA\\_SL\\_Session=2ae0a892463fee841ea7fcd329060597&x=116](http://www.agritacna.gob.pe/eventos.shtml?AA_SL_Session=2ae0a892463fee841ea7fcd329060597&x=116) [21/09/07].
- [7] Instituto Nacional de Investigación Agraria, Información institucional, Lima -  
Perú. [http://www.minag.gob.pe/inia\\_info.shtml](http://www.minag.gob.pe/inia_info.shtml) [15/02/07].
- [8] Instituto Nacional de Investigación Agraria, Investigación Agraria, Lima - Perú.  
[http://www.portalagrario.gob.pe/inia\\_inve.shtml](http://www.portalagrario.gob.pe/inia_inve.shtml) [21/09/06].
- [9] Proyecto invernaderos centenario La Molina, Invernadero antiguo, Lima - Perú,  
2004.  
[http://www.lamolina.edu.pe/proyectos/invernaderos/html/invernadero\\_antiguo.htm](http://www.lamolina.edu.pe/proyectos/invernaderos/html/invernadero_antiguo.htm)  
m [21/09/06].

- [10] Nota de prensa 019-2006-INIEA-OII-PW, Inauguran invernadero y sala de trabajo de la SUDIRGEB en la EEA Donoso en Huaral, La Molina, Lima - Perú, 2006. <http://www.inia.gob.pe/notas/nota086/> [20/04/07].
- [11] O. Barrios Capdeville, Fucoa (Fundación de Comunicaciones, Capacitación y Cultura del Agro), Manual de construcción de un invernadero, Gobierno de Chile, Ministerio de Agricultura, 2004.
- [12] Van De Braak. BOT, G.P.A., *Physics of greenhouse climate*, Greenhouse climate control, 1995, pág. 125-160.
- [13] J.J. Hanan, W.D. Holley, K.L. Goldsberry, *Greenhouse Management*. Edita Springer, New York - United States, 1978, pág.530.
- [14] J.C. López, P. Lorenzo, N. Castilla, J. Pérez-Parra, J.I. Montero, E. Baeza, A. Antón, M.D. Fernández, A. Baille, M. González-Real. Incorporación de tecnología al invernadero mediterráneo, España.
- [15] Invernaderos. Clima en invernaderos. <http://www.infojardin.com/huerto/invernaderos-clima-cultivo.htm> [07/10/06].
- [16] Instituto Liturgia, Arte y trabajo en cultivos vegetales, El cultivo en orquídeas, Argentina. [http://www.institutofiturgia.com.ar/nicc\\_3023.html](http://www.institutofiturgia.com.ar/nicc_3023.html) [11/09/06].
- [17] Guadalpalma S.L., Control climático en invernadero, Córdoba - España, <http://perso.wanadoo.es/guadalpalma/contrclimvernadero.htm>, [07/10/06].
- [18] P. Feuilloley, Ch. Mekikdjian y J. Lagier, *Aeration naturelle des serres-tunnels plastique en zone méditerranéenne*, Plasticulture, pág. 104, línea 33-46, 1994.
- [19] Ph. Verheye y H. Verlodt, *Comparison of different systems for static ventilation of hemispheric plastic greenhouses*, Acta Horticulturae, pág. 281, línea 183-197, 1990.

- [20] S. Sase y M. Nara, A control algorithm for natural ventilation based on wind tunnel testing, *Acta Horticulturae*, pág. 174, línea 75-79, 1985.
- [21] D.L. Valera Martínez, F. Molina Aiz, J. A. Gil Ribes, Análisis de la situación actual de los invernaderos de la provincia de Almería, mejora de las condiciones ambientales como vía para la disminución del uso de pesticidas, *Encuentro medioambiental almeriense: En busca de soluciones*, España.1998.
- [22] Estación experimental, Dosis de riego para los cultivos hortícolas bajo invernadero en Almería, Teoría, Almería - España.  
<http://www.laspalmerillas.cajamar.es/PrRiegos/PrRiego.htm> [21/09/06].
- [23] 1ª y 2ª Parte, Control Climático en invernaderos, Madrid - España.  
[http://www.infoagro.com/industria\\_auxiliar/control\\_climatico.asp](http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/control_climatico.asp) [21/09/06].
- [24] D.L. Valera, F.D. Molina, A. Peña y J. Gil., Controles electrónicos en invernaderos, Universidad de Almería, España,  
<http://www.eumedia.es/articulos/vr/otros/167invernaderos.html> [21/09/06].
- [25] Teoría General de los Sistemas, México.  
<http://www.tuobra.unam.mx/publicadas/010820192601.html> [21/09/06].
- [26] Controles electrónicos en invernaderos,  
<http://www.eumedia.es/articulos/vr/otros/167invernaderos.html> [07/10/06].
- [27] Instalaciones fotovoltaicas aisladas de la red, Energía solar, La batería.  
[http://energiasolarfotovoltaica.blogspot.com/2006/01/la-bateria\\_29.html](http://energiasolarfotovoltaica.blogspot.com/2006/01/la-bateria_29.html) [14/09/07].
- [28] W. Day, B.J. Bailey, *Physical principles of microclimate modification*, *Ecosystems of the World*, pág. 71-101, 1998.
- [29] P. Lorenzo, C. Maroto y N. Castilla, *CO<sub>2</sub> in plastic greenhouse in Almería*, *Acta Horticulturae*, España, pág. 268, línea 165-169, 1990.