

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA DE UN INVERNADERO

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

Renzo Gustavo López de Paz

ASESOR: Julio César Tafur Sotelo

Lima, Abril del 2016

Resumen

En la actualidad, la actividad agrícola en la sierranía peruana atraviesa un periodo de baja productividad debido a la falta de asistencia técnica que logre acelerar su desarrollo. Por ello, es de vital importancia la aplicación de nuevas tecnologías en favor del desarrollo tanto social como económico de las regiones del interior del país.

Muchas provincias de la sierra peruana solo se dedican a la producción interna mas no buscan ingresar a otras provincias o exportar al extranjero. Esto requeriría que los productos sean de mayor calidad y así entrar en competencia con otros mercados.

El objetivo de la tesis se centra en el diseño de un sistema de control de temperatura para un invernadero localizado en el departamento de Ancash, Provincia de Bolognesi, distrito de Abelardo Pardo Lezameta.

Los cultivos a tratarse son el palto, la chirimoya, la lúcuma y el pino que serán distribuidos en el invernadero ya mencionado.

Con el control de la temperatura de los cultivos se busca óptimo crecimiento (calidad del producto) ya que se construye un microclima adecuado (condiciones de temperatura y humedad). Para ello es necesario el uso de tecnologías aplicadas a la agricultura.

Por otro lado, el empleo de energías renovables en regiones como Ancash es conveniente debido a su alta radiación solar. Son múltiples los beneficios que traen el uso de estos sistemas de generación de energía y en el desarrollo de la tesis se explicará con más detalle el diseño propuesto.

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis a todos los integrantes de mi familia y a Dios. Cada uno fue una pieza indispensable para la culminación de una fase importante en mi carrera profesional.

A mi madre quien es un ejemplo de perseverancia me brindó todo su aliento y apoyo incondicional.

A mi padre por ser un modelo a seguir tanto como ser humano y como profesional. Sus consejos me permitieron llegar donde actualmente estoy.

A mi hermano Gary quien fue mi inspiración para elegir mi carrera y ser como él, el mejor ingeniero electrónico.

A mi abuelita Alejandrina por brindarme su apoyo absoluto.

A Dios que siempre ha estado presente durante toda mi vida, en quien siempre podré confiar y estaré eternamente agradecido por todo lo que le brinda a mi familia

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
1 CAPITULO 1. Análisis del proceso de producción de cultivos en invernadero	2
1.1 Antecedentes	2
1.2 Área de Invernadero	2
1.3 Economía de la producción en Invernaderos	3
1.4 Estructura de Invernaderos	3
2 CAPITULO 2. Sistemas de Control de Temperatura en Invernaderos.....	7
2.1 Presentación del Asunto en Estudio	7
2.2 Algoritmos de Control Aplicados a Invernaderos	7
2.3 Control de la Temperatura utilizando Ventilación Natural	11
2.3.1 Control con Ajuste por Tabla	11
2.3.2 Control PI por Adelanto	11
2.4 Control de la Temperatura Utilizando Calefacción	15
2.4.1 Problema de Control de la Temperatura Utilizando Calefacción.....	15
2.4.2 Esquema de Control de la Temperatura Utilizando Calefacción	16
3 CAPITULO 3. Diseño del Sistema de Control de Temperatura.....	17
3.1 Objetivos.....	17
3.1.1 Objetivo General.....	17
3.1.2 Objetivos Específicos	17
3.2 Funcionamiento del Invernadero	17
3.3 Requerimientos Climáticos del Invernadero	18
3.4 Diagrama de Bloques	19
3.5 Sensor de Temperatura	20
3.5.1 Selección del Sensor de Temperatura.....	20
3.5.1.1 Sensor LM35.....	20
3.5.1.2 RTD	21
3.5.1.3 Termistores	22
3.5.1.4 Sensor de Temperatura Digital DS18B20 (Resistente al agua)	23
3.5.1.5 Justificación de la Elección del Sensor de Temperatura	23
3.6 Actuadores	24
3.6.1 Selección de los Actuadores	24
3.6.1.1 Cables Calefactores Paralelos.....	24

3.6.1.2	<i>Ventilador Calefactor</i>	26
3.6.1.3	<i>Calentador de Cerámica industrial PTC</i>	27
3.6.1.4	<i>Termoventilador</i>	28
3.6.1.5	<i>Extractor de Aire Karson</i>	28
3.6.1.6	<i>Justificación de la Elección del Actuador</i>	29
3.6.1.6.1	<i>Cálculo de la Potencia del Actuador Elegido</i>	30
3.6.1.7	<i>Implicancia del Factor Altura</i>	33
3.7	<i>Diseño de las Etapas de Sensado y Actuación</i>	34
3.7.1	<i>Detección de Cruce por Cero</i>	34
3.7.2	<i>Etapa de Control</i>	36
3.7.3	<i>Etapa de Potencia</i>	37
3.7.3.1	<i>Circuito Regulador de Potencia</i>	37
3.7.3.2	<i>Algoritmo de Control</i>	42
3.7.4	<i>Esquema General Control-Potencia</i>	43
3.7.5	<i>Prototipo de Disposición de Sensores y actuadores</i>	44
3.8	<i>Diseño del Sistema de Alimentación de Energía por Paneles Fotovoltaicos</i>	45
3.8.1	<i>Energías Renovables</i>	45
3.8.2	<i>Dimensionamiento de los Elementos del Sistema Fotovoltaico</i>	45
3.8.2.1	<i>Dimensionamiento de los Paneles Solares</i>	46
3.8.2.2	<i>Cálculo del Número y Capacidad de las Baterías</i>	49
3.8.2.3	<i>Cálculo de la Capacidad del Controlador</i>	50
3.8.2.4	<i>Cálculo de la Capacidad del Inversor</i>	50
3.9	<i>Interfaz de Usuario</i>	51
3.9.1	<i>Arduino con LabView</i>	51
3.10	<i>Esquema Gráfico General de Control de Temperatura del Sistema</i>	51
4	CAPITULO 4 Pruebas Finales y Comprobación de Resultados	53
4.1	<i>Comprobación del diseño aplicado</i>	53
4.1.1	<i>Etapa de Control</i>	53
4.1.1.1	<i>Entradas</i>	53
4.1.1.1.1	<i>Microcontrolador</i>	53
4.1.1.1.2	<i>Circuito detector de cruce por cero</i>	54
4.1.1.1.3	<i>Sensor de Temperatura</i>	55
4.1.1.2	<i>Salidas</i>	55

4.1.1.2.1 Pulsos de Salida (Activación de Triac)	55
4.1.2 Etapa de Potencia	56
4.1.3 Prototipo Implementado	59
4.2 Verificación de la Interfaz Gráfica	61
4.3 Presupuesto de Implementación	63
BIBLIOGRAFÍA.....	66
ANEXOS.....	69



INTRODUCCIÓN

El presente documento describe el diseño de un sistema de control de temperatura en un invernadero localizado en el departamento de Ancash, con la finalidad de mejorar la producción de cultivos. Se detallará todos los elementos físicos de control involucrados, así como la técnica de control empleada y el software que permitirá visualizar y registrar la información de acuerdo a la variación de la temperatura al interior de invernadero.

El presente documento está dividido de la siguiente manera:

El capítulo 1 analiza la situación agrícola en relación a la producción de cultivos en invernadero; es decir, se detallará los aspectos y factores que intervienen y afectan el proceso de crecimiento de cultivos. Finalmente se presenta el marco problemático que involucra el control de temperatura de la localidad en estudio.

El capítulo 2 presenta una introducción al estudio de las diversas técnicas de control empleadas en invernaderos.

El capítulo 3 contiene los objetivos de la tesis, el diseño del sistema de control de temperatura y el software que se empleará para la interfaz de usuario.

El capítulo 4 muestra y analiza los resultados empleados para el control de temperatura de acuerdo a las pruebas realizadas en un circuito que permite aplicar la lógica de control de esta variable y simular el comportamiento que tendría en el invernadero. Adicionalmente se podrá visualizar en tiempo real los cambios de temperatura en la interfaz gráfica de LabView.

1 CAPITULO 1. Análisis del proceso de producción de cultivos en invernadero

1.1 Antecedentes

La producción de alimentos en invernaderos no fue establecido totalmente hasta la introducción del polietileno. En los EEUU el primer uso de polietileno como cubierta de invernadero fue en 1948, cuando el Profesor Emery Myers Emmert de la Universidad de Kentucky, utilizó un material menos costoso que el vidrio. El profesor Emmert es considerado como el padre de los plásticos en los EEUU, debido al empleo de tecnología plástica con propósitos agrícolas a través de sus invernaderos de investigación, Mulch (de tipo acolchado) y cubiertas de plástico [1].

Los invernaderos agrícolas fueron inventados en el año 1998 mediante la investigación sobre la ingeniería de los invernaderos, sus diseños, construcción y equipamientos necesarios para el desarrollo de cultivos. La producción de cultivos en los invernaderos agrícolas es la técnica más usada actualmente por los productores agrícolas. Este sistema cuenta con la ventaja de establecer una valla de separación entre el cultivo y el ambiente externo. Esto permite proteger al cultivo de posibles lluvias, fuertes vientos, animales, plagas y enfermedades. También facilita un control más eficiente sobre la temperatura de las plantas y la cantidad de luz que requieren en su proceso de crecimiento [2].

1.2 Área de Invernadero

El área total mundial de invernaderos de vidrio está estimada en 40,700 Ha (Wittwer & Castilla, 1995), con el mayor número de estos encontrados en el noroeste de Europa.

En contraste con los invernaderos de vidrio, los invernaderos de plástico han sido fácilmente adaptados en los 5 continentes, especialmente en la región Mediterránea, China y Japón [3]. El mayor número de invernaderos de plástico opera en base a la estación, como es el caso de la mayoría de los invernaderos de vidrio. El área estimada de invernaderos de plástico se muestra en Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Estimado Mundial del Uso de Invernaderos de plástico (Wittwer y Castilla, 1995) [3]

Región	Área (Ha)
Europa Norte	16,700
Mediterráneo	95,300
América	15,600
Asia	138,200
Total Mundial	265,800

1.3 Economía de la producción en Invernaderos

Balanceado contra el alto capital y los costos operacionales de los invernaderos, es la productividad significativamente más alta de tales sistemas en comparación con la agricultura a campo abierto (OFA). En la Tabla 1.2 se compara rendimientos típicos para cultivos crecidos hidropónicamente en invernaderos del desierto en el suroeste americano con típicos buenos rendimientos para cultivos a campo abierto [4].

Tabla 1.2 Rendimientos de hortalizas crecidas hidropónicamente en Invernaderos del desierto (CEA) y en campos abiertos (OFA) (Knott, 1996)

Cultivo	CEA Hidropónico			OFA*
	TM/Ha	No cultivos	TM/Ha/año	TM/Ha/año
Pepinillo	300	2	600	30
berenjena	28	2	56	20
Pimiento verde	57	2	114	16
Pimiento rojo	45	2	90	10
lechuga	31	10	313	52
tomate	550	1**	550	100

1.4 Estructura de Invernaderos

Las estructuras europeas de vidrio, las cuales hoy en día están siendo comúnmente construidas para la producción de hortalizas en el suroeste de los Estados Unidos, son muy diferentes de los invernaderos de polietileno/fibra de vidrio usados en la producción hidropónica entre 1965 y 1990. La altura de los invernaderos europeos es mucho mayor.

Para adquirir un mayor crecimiento ambiental uniforme sin fluctuaciones rápidas de temperatura, se está destinando mayor volumen total del espacio dentro de un área dada de un invernadero, donde ahora es común para las estructuras de invernaderos que los goteros alcancen una altura de 5 m sobre el nivel del suelo.



Figura 1.1 Invernadero de Vidrio [1]

Para los invernaderos de polietileno, los tipos de láminas de polietileno son muy similares excepto de aquellas introducidas hace 15 años, las cuales retardan la pérdida del calor infrarrojo. Se ha reportado que estas láminas reducen el 20% del calor perdido desde el invernadero y han llegado a ser comunes en la industria actual, especialmente en Europa. Otros materiales de vidrio tales como la fibra de vidrio, el polivinil clorado, Mylar y Tedlar han probado ser tanto inapropiados, inconvenientes o en la mayoría de casos, mucho más caros que el polietileno, aunque el último tendría que ser reemplazado frecuentemente [4]. Materiales más recientes, tales como los policarbonatos y los acrílicos han llegado a ser mucho más comunes, pero su popularidad ha sido puesta fuera de lugar por los altos costos, un ejemplo de su estructura se aprecia en el siguiente gráfico (Figura 1.2).



Figura 1.2 Invernadero con recubrimiento de Policarbonato [1]

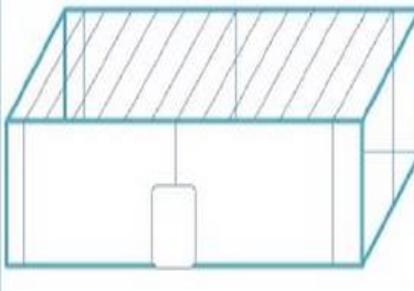
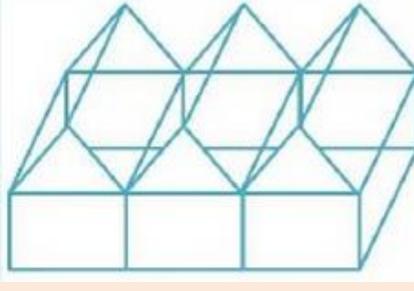
Recientemente ha sido diseñada una lámina de polietileno (como el mostrado en la figura 1.3) desarrollado en Israel para permitir que niveles muy bajos de luz UV sean transmitidos. Hay una buena evidencia de que bloqueando la luz UV, las láminas tienen un efecto adverso sobre insectos voladores tales como Bemisia tabacci, áfidos y trips.

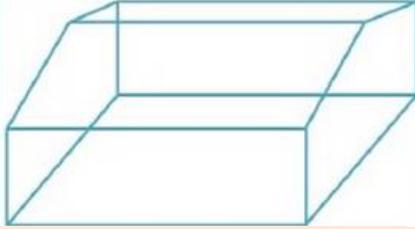
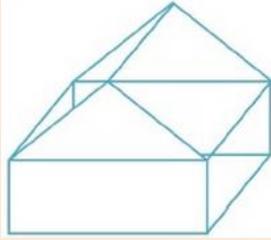
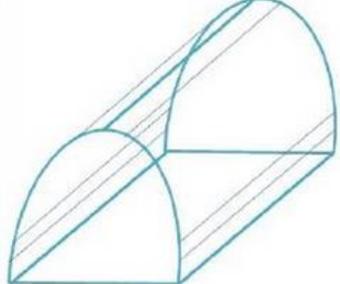


Figura 1.3 Invernadero con recubrimiento de Polietileno [1]

Se muestra a continuación las ventajas y desventajas de las estructuras de Invernaderos de acuerdo a su estructura geométrica. (Tabla 1.3)

Tabla 1.3 Estructura de Invernaderos [5]

Tipos	Estructura	Ventajas/Desventajas	Imagen
Plano o tipo parral	La estructura de estos invernaderos se encuentra constituida por dos partes: una vertical y otra horizontal	Ventajas: Adaptación a los terrenos, resistencia al viento, aprovechamiento de agua. Desventajas: Poco volumen de aire, rápido envejecimiento, no aconsejable en lugares lluviosos, dificultad en cultivo, fragilidad.	
Raspa y amagado	Similar a la de tipo parral pero diferente forma de cubierta. Se aumenta la altura máxima del invernadero en la cumbre formando lo que se conoce como raspa.	Ventajas: Económico, buen volumen, inercia térmica, poca humedad, ventilación. Desventajas: Diferencias de luminosidad, no aprovecha las aguas pluviales, se dificulta cambio de plástico.	

<p>Asimétric o</p>	<p>Aumento de la superficie en la cara expuesta al sur, con objeto de aumentar su capacidad de captación de la radiación solar.</p>	<p>Ventajas: Aprovechamiento de la luz, económico, buena ventilación, inercia térmica. Desventajas: no aprovecha el agua, pérdidas de calor, se dificulta el cambio de plástico.</p>	
<p>Capilla</p>	<p>Tiene la techumbre formando por planos inclinados, según sea a un agua o a dos aguas</p>	<p>Ventajas: Fácil construcción, facilidades para la evacuación del agua Desventajas: A veces se dificulta la ventilación</p>	
<p>Túnel o Semi-cilindrico</p>	<p>Se caracteriza por la forma de su cubierta y por su estructura totalmente metálica</p>	<p>Ventajas: Buena ventilación, buen reparto de luminosidad, fácil instalación. Desventajas: Caro, no aprovecha el agua</p>	

2 CAPITULO 2. Sistemas de Control de Temperatura en Invernaderos

2.1 Presentación del Asunto en Estudio

Los sistemas de invernadero a lo largo del tiempo cumplen la función de proteger las plantas y cultivos de los sensibles cambios en las condiciones climáticas. Estos cambios traen como consecuencia disminución en la producción y cambios en el crecimiento óptimo de los cultivos. Es por ello que nos encontramos con distintas formas y técnicas de automatización dentro de un invernadero, las cuales originan cambios altamente beneficiosos en el sector agroindustrial que trabaja sobre diferentes terrenos de cultivo.

Los controladores electrónicos aplicados en este sector, son de uso común en los invernaderos. En un principio solo se limitaban a distribuir nutrientes y agua a las plantas, con el paso del tiempo, se adicionaron nuevas técnicas que permitían ya automatizar las diversas aplicaciones internas al invernadero. Estas técnicas de control se encargan de realizar un algoritmo capaz de mantener, cualquier tipo de variable física, en el nivel deseado. Es por intermedio de los controladores (digital o analógico) que son generadas las señales eléctricas o también llamadas señales de control, las cuales son direccionadas a los dispositivos de actuación (válvulas, bombas, iluminadores, etc.).

2.2 Algoritmos de Control Aplicados a Invernaderos

Las técnicas de control, expuestas anteriormente, nos permiten manipular cualquier variable física interna al invernadero. El desarrollo de este capítulo se centrará en las técnicas existentes, en relación al control de temperatura.

En la actualidad se tienen diversas estrategias de control que van desde las más convencionales como lo es el elaborar un control PID, hasta las técnicas de control avanzado, aplicado al sector industrial, como es el caso de la aplicación de redes neuronales en la lógica de control. Tal como se resume en el siguiente cuadro (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Clasificación de Estrategias de Control Planteada por Seborg [6]

<i>Categoría I. Estrategias convencionales de control</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Control manual • Control PID • Control por ratio • Control en cascada • Control en adelanto
<i>Categoría II. Control avanzado: técnicas clásicas</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Control con ajuste por tabla • Compensación del retardo • Control por desacoplo • Controladores selectivos
<i>Categoría III. Control avanzado: técnicas ampliamente utilizadas</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Control predictivo basado en modelo • Control de calidad estadístico • Control por modelo interno • Control adaptativo
<i>Categoría IV. Control avanzado: nuevas técnicas con algunas aplicaciones industriales</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Control óptimo LQG • Control no lineal • Control robusto • Control neuronal • Control borroso • Control basado en sistemas expertos
<i>Categoría V. Control avanzado: estrategias propuestas con pocas o ninguna aplicación industrial</i>

Adicionalmente, los sistemas de control del clima en invernadero han evolucionado desde los más simples termostatos y controladores analógicos hasta controladores basados en computador, capaces de aplicar complejos algoritmos de control que relacionen todas las variables [5]. Intentando seguir el orden propuesto en la clasificación descrita en la tabla anterior, se van a exponer las distintas estrategias de control que se han utilizado para controlar las variables climáticas en el interior de un invernadero. Las siguientes tablas muestran una descripción detallada de controladores empleados (Ver Tablas 2.1).

Tabla 2.1.a Descripción de técnicas de control del clima de un invernadero utilizadas por distintos autores [6]

Autores	VARIABLES controladas	VARIABLES de control	Perturbaciones consideradas	Técnicas de control utilizadas	Experiencias	Resultados	Ref.
Udink ten Cate	Temperatura	Ventilación natural Calefacción agua caliente	Temperatura exterior Humedad exterior Velocidad viento Dirección viento Radiación exterior	Diurno: Control P	Invernadero Venlo 224 m ² Naaldwijk (HOL) Tomate	No se indican resultados Cambios de carga: Comportamiento aceptable en permanente. Sobresoscilación elevada No mejora control PI. Mala política energética	[Udi83]
				Nocturno: Control PI + anti-windup (Varias estructuras) Control PID			
				Control adaptativo con modelo de referencia			
Davis Hooper	Temperatura	Calefacción	Radiación exterior	Control PI + bucle de realimentación de la temperatura de tuberías	Invernadero Venlo 42.8 m ² Bedford (UK) Tomate	Resultados obtenidos mejores que PI. Error cuadrático medio menor de 0.39 K. Máximo error de 1 K.	[Dav91]
Young Lees Chotai Tych	Temperatura	Calefacción	Temperatura exterior Radiación solar	Control PIP	Invernadero Venlo Bedford (UK) Tomate	Resultados de simulación Buenos resultados a: Cambios de consigna Seguimiento trayectorias	[You93a] [You93b] [You01]
Albraight Gates Arvanitis Drysdale	Temperatura Humedad	Ventilación Calefacción Humidificador Malla de sombreo	Temperatura exterior Radiación solar	Control PDF	1000 m ²	Resultados de simulación Buenos resultados a: Cambios de consigna Seguimiento trayectorias	[Alb01]
Tantau	Temperatura	Calefacción	Temperatura exterior Radiación exterior	Control por adelanto		Temperatura estable y cercana a la consigna	[Tan85a] [Tan85b] [Tan93b]
Kamp Timmerman	Temperatura Humedad Radiación PAR Concentración CO ₂	Ventilación natural Calefacción agua y arotermos Mallas de sombreo Enriquecedor CO ₂	Temperatura exterior Humedad exterior Velocidad viento Dirección viento Radiación exterior Lluvia	Temperatura y humedad: Control por ajuste con tabla Radiación y CO ₂ Todo/nada con zona muerta	No se indican experiencias ni resultados		[Kam96]
Sigrimis Paraskevopoulos Arvanitis Rerras	Temperatura	Ventilación	Velocidad viento en el interior	Control adaptativo basado en control multifrecuencia	No se indican Se basa en un modelo existente	Resultados de simulación. Buenos resultados a: Cambios de consigna Seguimiento trayectorias	[Sig99a]
Boaventura Cuoto Ruano	Temperatura	Ventilación forzada Calefacción	Temperatura exterior Radiación exterior Humedad interior	Control PID	Invernadero túnel 210 m ² Vila Real (POR) Tomate	Problemas seguimiento de trayectorias Buenos resultados (error menor de 0.3 °C)	[Boa97]
				Control predictivo GPC			

Tabla 2.1.b Descripción de técnicas de control del clima de un Invernadero utilizadas por distintos autores (continuación) [6]

Autores	VARIABLES controladas	VARIABLES de control	Perturbaciones consideradas	Técnicas de control utilizadas	Experiencias	Resultados	Ref.	
Nielsen Madsen	Temperatura	Calefacción	Temperatura exterior Radiación exterior	Control predictivo GPC	Cubierta cristal 172 m ² (8 x 21.5) Con cultivo Arlsev (DIN)	Mejor comportamiento que un PID.	[Nie96]	
Senent Martínez Blasco Sanchís	Temperatura Humedad	Ventilación natural Humidificador	Temperatura exterior Humedad exterior Velocidad viento Radiación exterior	Control MBPC predictivo multivariable	Invernadero túnel 96 m ² Valencia (ESP) Rosas	Resultados aceptables en seguimiento de trayectorias y cambios de consignas	[Bla99] [Sen98] [Mar97]	
Kyriannakis Arvanitis Sigrimis	Temperatura	Calefacción	Temperatura exterior Radiación exterior	Control Predictivo basado en modelo descentralizado (DMBPC)	Es una propuesta y no se indican experiencias ni resultados		[Kyr02]	
El Ghomari Tantau Megias Serrano	Temperatura	Ventilación natural Calefacción	Temperatura exterior Humedad exterior Velocidad viento Radiación exterior	Control predictivo MELPC	Invernadero Venlo 200 m ² Hannover (ALE) Sin cultivo	Resultados aceptables en seguimiento de trayectorias. Mejor comportamiento que un PI adaptativo.	[ElG02] [ElG01] [Meg99]	
Piñón Camacho Kuchen	Temperatura	Calefacción	Temperatura exterior Radiación exterior Temperatura suelo	Control MBPC	Se utilizan datos climáticos de San Juan (ARG) y un modelo para simular el comportamiento de un invernadero	Mejor comportamiento que un PID. Se requiere una acción de control agresivo que puede violar restricciones. Error cuadrático medio =1.8 °C. Esfuerzo computacional =13 segundos.	[Piñ02a] [Piñ02b] [Piñ01]	
				Control MBPC+FL				Salida y señal de control presentan comportamiento similar a MBPC. Error cuadrático medio menor =1.5 °C. Esfuerzo computacional =0.006 segundos.
				Control MBPC+ FL + LMI				Respuesta muy similar a distintos tipos de incertidumbres.
				Control MBPC				Planta piloto 2.28 m ² Con cultivo

Tabla 2.1.c Descripción de técnicas de control del clima de un invernadero utilizadas por distintos autores (continuación) [6]

<i>Autores</i>	<i>Variables controladas</i>	<i>Variables de control</i>	<i>Perturbaciones consideradas</i>	<i>Técnicas de control utilizadas</i>	<i>Experiencias</i>	<i>Resultados</i>	<i>Ref.</i>
Coelho Moura Boaventura	Temperatura	Ventilación forzada Calefacción	Temperatura exterior Radiación exterior	Control predictivo basado en modelo utilizando el algoritmo de optimización de partículas Swarm y algoritmos genéticos.	Invernadero túnel 210 m ² Vila Real (POR) Tomate	Resultados de simulación. Buenos resultados en seguimiento de consignas. Algoritmo de Swarm mejora en 40% al genético	[Coe02]
Wang Wu	Temperatura	Calefacción Enriquecedores CO ₂	Temperatura exterior Humedad exterior Velocidad viento Dirección viento Radiación exterior	Control predictivo basado en redes neuronales para temperatura combinado con un sistema experto para la concentración de CO ₂	Se especifica una experiencia pero no se describe	Resultados de simulación. Buenos resultados.	[Wan99a]
Incertis	Temperatura Humedad	Ventilación natural Calefacción Humidificadores	Temperatura exterior Humedad exterior Velocidad viento	Control predictivo con capacidad de aprendizaje	Se especifica una experiencia pero no se describe. Tomate.	Resultados experimentales aceptables: Error medio Temperatura 0.9 °C, error medio Humedad 8%	[Inc81] [Inc79]
van Straten Tap Willigenburg van Henten	Temperatura CO ₂	Ventilación natural Calefacción Enriquecedores CO ₂	Temperatura exterior Humedad exterior Velocidad viento Dirección viento Radiación exterior CO ₂ exterior	Control predictivo basado en modelo RHOC. Control óptimo aplicando el Principio de Pontryagin combinando realimentación y control por adelanto	Invernadero Venlo 300 m ² Wageningen (HOL) Tomate, lechuga	Resultados de simulación y experimentales. Resultados aceptables. Resultados de simulación y experimentales. Resultados aceptables.	[Str02] [Tap00] [Str99] [Tap96a] [Tap96b] [Hen94]
Alessandri Bini Parisini Torrini	Temperatura CO ₂	Calefacción Ventilación	Temperatura exterior Radiación exterior CO ₂ exterior	Control óptimo basado en redes neuronales, que combina realimentación y compensación por adelanto	No se indican	Resultados de simulación. Demuestran la viabilidad de la utilización de este tipo de técnicas.	[Ale94]
Linker Gutman Seginer	CO ₂	Ventilación forzada Enriquecedores CO ₂	Radiación Solar Temperatura exterior Velocidad viento Dirección viento CO ₂ exterior Humedad del suelo	Control óptimo basado en una búsqueda (entre 8000 posibles configuraciones) que minimice el consumo de CO ₂	Invernadero gótico 48 m ² Haifa (ISR) Sin cultivo	Resultados de simulación. Ayuda a la toma de decisiones en distintas situaciones.	[Lin98]
Tchamitchian Tantau	Temperatura	Calefacción	Temperatura exterior Radiación exterior Velocidad viento Humedad exterior	Control óptimo basado en el Principio de Pontryagin para ahorrar energía	No se indican. Latitudes de clima frío. Sin cultivo.	Resultados de simulación. Se consigue el objetivo del ahorro en calefacción en distintas situaciones	[Tch96]

Tabla 2.1.d Descripción de técnicas de control del clima de un Invernadero utilizadas por distintos autores (continuación) [6]

<i>Autores</i>	<i>Variables controladas</i>	<i>Variables de control</i>	<i>Perturbaciones consideradas</i>	<i>Técnicas de control utilizadas</i>	<i>Experiencias</i>	<i>Resultados</i>	<i>Ref.</i>
Gutman Seginer Ioslovich	Temperatura	Calefacción Ventilación natural	Temperatura exterior Radiación exterior Velocidad viento	Control óptimo aplicando Programación Lineal y el Principio de Pontryagin, para minimizar consumo de calefacción.	No se indican	Demuestra la viabilidad de resolver el problemas del control del clima en un invernadero utilizando este tipo de técnicas.	[Gut93]
	Temperatura	Ventilación natural Calefacción	Temperatura exterior Radiación exterior Velocidad viento	Control óptimo aplicando el Principio de Pontryagin para minimizar el coste de calefacción y ventilación.	No se indican	Resultados de simulación. Buen comportamiento	[Ios96]
	Temperatura CO ₂	Ventilación natural Enriquecedores CO ₂	Radiación PAR interior Temperatura exterior Radiación exterior CO ₂ exterior	Control óptimo basado en el Principio de Pontryagin proporcional combinando realimentación y compensación por adelanto en serie	No se indican	Se expone sólo la descripción teórica de la solución propuesta.	[Ios95]
Sigrimis Arvanitis Kookos Paraskevopoulos	Temperatura	Calefacción	Ventilación Velocidad viento	PI robusto con técnica H [∞]	No se indican	Resultados de simulación. Presenta buenos resultados para grandes variaciones de los parámetros.	[Sig99b]
Iwao	Temperatura Humedad	Calefacción Humidificadores	No considera	Control borroso	Semillero 16 m ² Lechuga	Resultados de simulación. Se obtienen buenos resultados en seguimiento de consignas	[Iwa94]
Lafont Balmat	Temperatura Humedad	Ventilación natural Calefacción Humidificadores	Temperatura exterior Humedad exterior Velocidad viento Radiación exterior	Control borroso	Invernadero cristal 40 m ² Francia	Resultados de simulación. Se obtienen buenos resultados mejores que los todo/nada comerciales	[Laf02]
Gates Chao Sigrimis	Temperatura	Ventilación forzada Calefacción		Control borroso	Invernadero túnel 1872 m ²	Resultados de simulación. Comparan con control PI. Más ventajas los borrosos.	[Gat01]
Sigrimis Arvanitis Gates	Humedad	Humidificadores	Temperatura Humedad Radiación	Control neuronal	No se indican	Resultados de simulación. Se obtienen buenos resultados en seguimiento de consignas	[Sig00]
López Hernández Feijoo Balsa	Temperatura Humedad	Calefacción Humidificadores	No considera	Control basado en sistemas expertos	No se indican experiencias ni resultados		[Lop89a] [Lop89b]

2.3 Control de la Temperatura utilizando Ventilación Natural

2.3.1 Control con Ajuste por Tabla

Lo más conveniente para un sistema de actuación, que utilice la apertura de ventanas (entre 0% y 100% de apertura), sería la utilización de un controlador proporcional integral con realimentación de la temperatura interna al invernadero. La realimentación reduce notablemente la sensibilidad del sistema con respecto a las perturbaciones y a eventuales variaciones del sistema. Sin embargo, estas pueden llegar a ser tan diferentes que un controlador con coeficientes constantes no sería capaz de controlar la variable en cuestión. Una alternativa que surge es el empleo de un controlador adaptativo que modifique su comportamiento cuando el sistema esté sometido a perturbaciones [7].

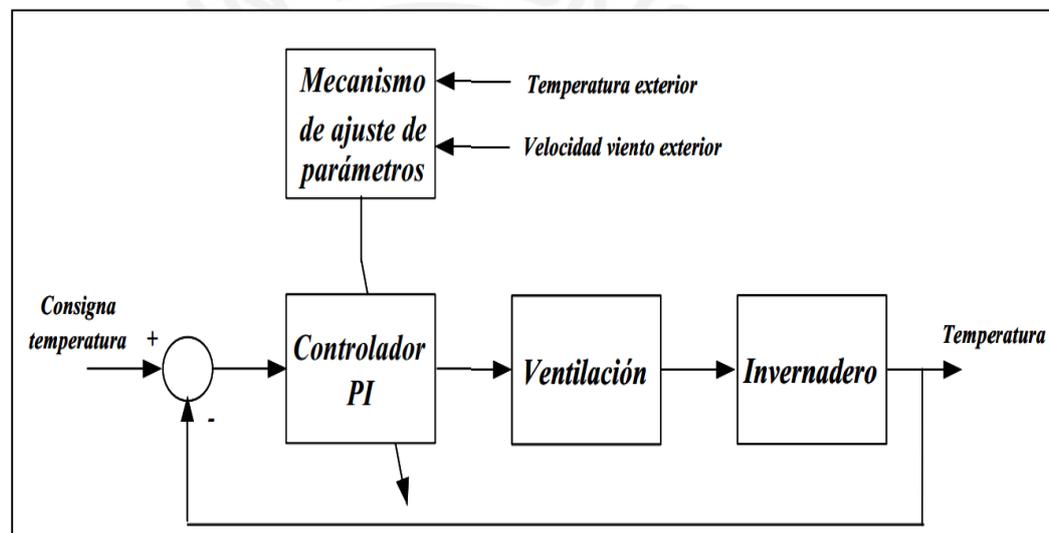


Figura 2.1 Esquema de Control con Ajuste por Tabla

2.3.2 Control PI por Adelanto

Otro método de control para reducir o eliminar el efecto de las perturbaciones que se originan, es el control por adelanto o pre-alimentación, cuyo esquema general se expone en la figura 2.2. La perturbación se mide y se introduce una señal de control que trata de eliminar su efecto sobre la variable controlada. Si las funciones de transferencia que relacionan la salida con la perturbación y la variable de control son H_{yp} y H_{yu} respectivamente, la función de transferencia ideal del controlador por adelanto debe ser:

$$H_{ff} = -H_{yu}^{-1} * H_{yp} \tag{2.1}$$

En el caso de que ésta fuera inestable o irrealizable, se selecciona una aproximación. Otras veces, se suele diseñar el controlador por adelanto como un modelo estático, por ejemplo si el sistema no es lineal, en cuyo caso consiste únicamente en una ganancia.

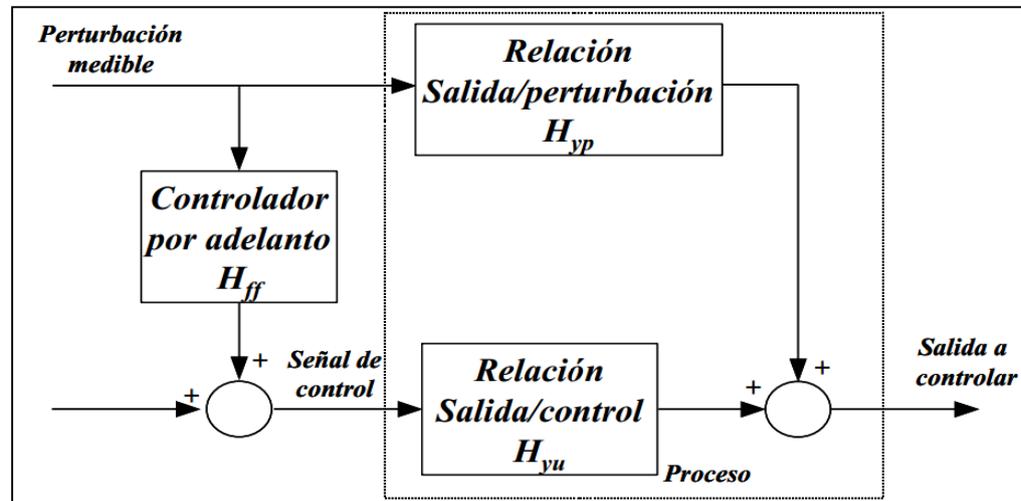


Figura 2.2 Control por Adelanto para Compensar Perturbaciones

En el caso del control de temperatura del aire en un invernadero utilizando ventilación natural, las relaciones entre la salida del sistema con señal de control y la misma salida con las perturbaciones son fuertemente no lineales.

Es por ello que se desarrollan controladores por adelanto, aplicando el balance energético (descrito en la siguiente ecuación 2.2), que resume un modelamiento de la temperatura en base a principios físicos.

$$c_{cesp,a} c_{den,a} \frac{c_{vol,a}}{c_{area,ss}} \frac{dX_{t,a}}{d\tau} = Q_{sol,a} + Q_{cnv,a-ss} + Q_{cnv,a-cal} - Q_{cnv_cnd,a-e} - Q_{ven,a-e} - Q_{perd,a-e} - Q_{tra,cu} \quad (2.2)$$

Donde:

- $Q_{sol,a}$ = Radiación Solar (W/m²).
- $Q_{cnv_cnd,a-e}$ = Transferencia de Calor por Conducción y Convección(W/m²).
- $Q_{cnv,a-ss}$ = Transferencia de Calor por Convección con la Superficie del Suelo (W/m²).
- $Q_{cnv,a-cal}$ = Transferencia de Calor por Convección con las Tuberías del Sistema de Calefacción (W/m²).
- $Q_{ven,a-e}$ = Intercambio de Calor con el Aire Exterior debido a la Ventilación natural (W/m²).
- $Q_{perd,a-e}$ = Intercambio de Calor con el Aire Exterior por Infiltración(W/m²).

$Q_{tra, cu}$ = Calor Latente Producido por la Transpiración del Cultivo [W/m^2]

Utilizando los modelos que relacionan la variable a controlar y las entradas al sistema, se puede calcular la variable de control de forma que se cancele parte del efecto de las perturbaciones en la salida del sistema. La desviación de la salida respecto a la consigna resultante de los errores de modelado se puede eliminar añadiendo un controlador por realimentación, obteniéndose un controlador que combine la realimentación y la compensación por adelanto. Sin la acción por adelanto, el controlador por realimentación se utiliza para seguir todas los cambios de carga que se produzcan en el proceso, sin embargo, con la compensación por adelanto, la realimentación sólo modifica su salida en un cantidad igual al error que se comete con el controlador por adelanto debido a los errores de modelado.

Existen dos formas básicas de implementar la compensación por adelanto: en paralelo y en serie [8]. En ambos casos, las perturbaciones medibles se utilizan para mantener a la temperatura del aire interior del invernadero en el nivel deseado.

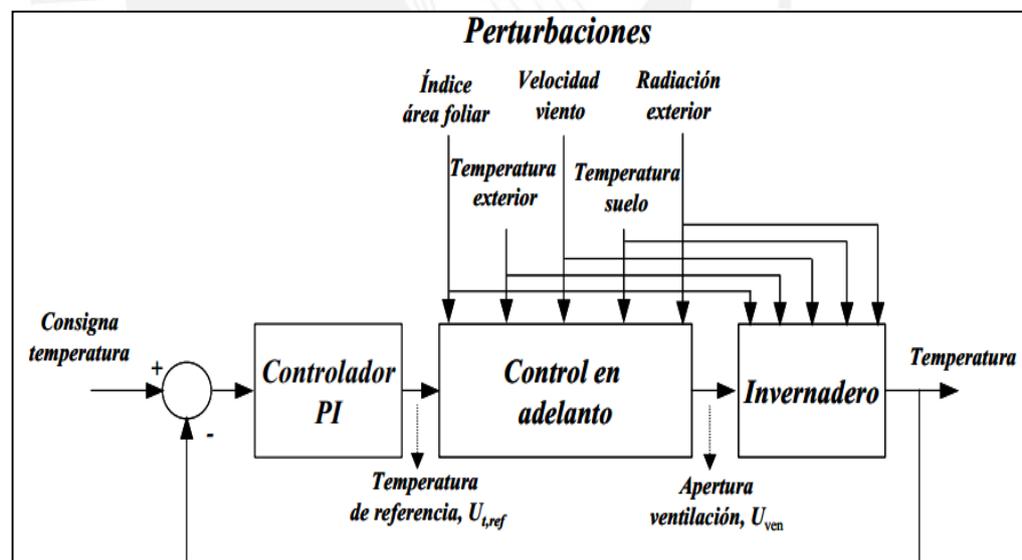


Figura 2.3 Controlador por adelanto en Serie de la Temperatura del invernadero (utilizando ventilación) [8].

Como se ha comentado anteriormente, es necesario utilizar una acción integral en el controlador por realimentación para regular la temperatura, sobre todo con perturbaciones constantes. Por otra parte, el sistema sufre frecuentes saturaciones en la señal de entrada (ventilación) debido a las fuertes perturbaciones, cambios en el punto de operación y deficiencias en el

diseño estructural del sistema de actuación, lo que limita en gran medida el margen de regulación de control. Si la señal de error es tan grande que la acción integral satura al actuador, se abre el lazo de realimentación, ya que el actuador puede permanecer saturado incluso cuando cambia la señal a controlar, pudiendo alcanzar el integrador valores muy elevados. Cuando el error es finalmente reducido, el valor de la integral puede haber sido tan elevado que hasta que alcance un nivel aceptable puede pasar un intervalo de tiempo considerable.

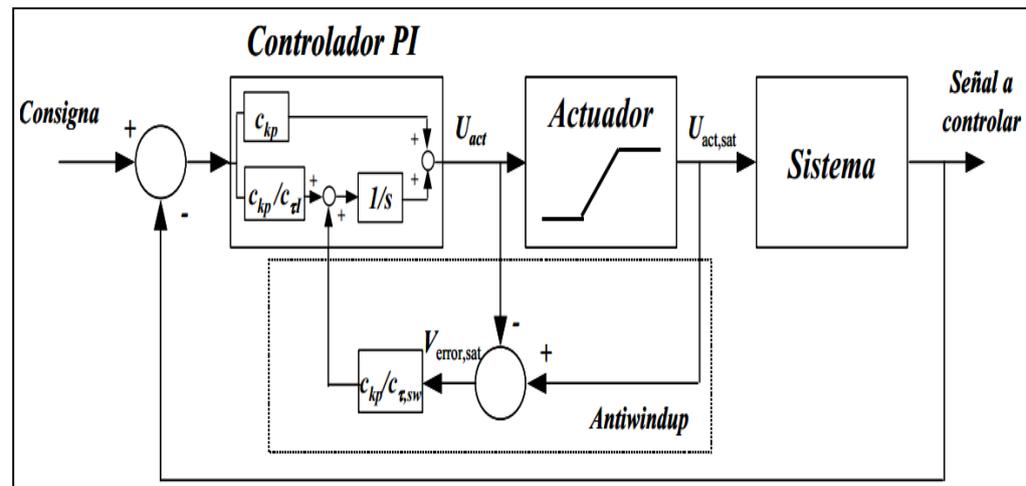


Figura 2.4 Sistema de Control con Antiwindup [8].

En el problema que se está tratando del control de la temperatura mediante ventilación natural utilizando una compensación por adelanto en serie con un controlador PI, para introducir la acción antiwindup (que evita la saturación del actuador). Adicionalmente existe el inconveniente de que el controlador PI no proporciona el estado en el que debe encontrarse el controlador sino la temperatura de referencia del controlador por adelanto, que es el que realmente calcula la apertura de las ventilaciones en función de las variables climáticas ambientales. Por tanto, la primera entrada del bloque antiwindup debe ser la salida del controlador PI cuya señal corresponde a una temperatura. Afortunadamente, cuando el actuador se satura, la correspondiente temperatura de referencia puede calcularse en cada instante de control a través del modelo simplificado que se ha utilizado para el diseño del controlador por adelanto (se trata de invertir este modelo1) con los valores de las perturbaciones que haya en ese momento. De esta forma, se reproduce el esquema antiwindup clásico pero comparando temperaturas, como se muestra en la figura 2.5.

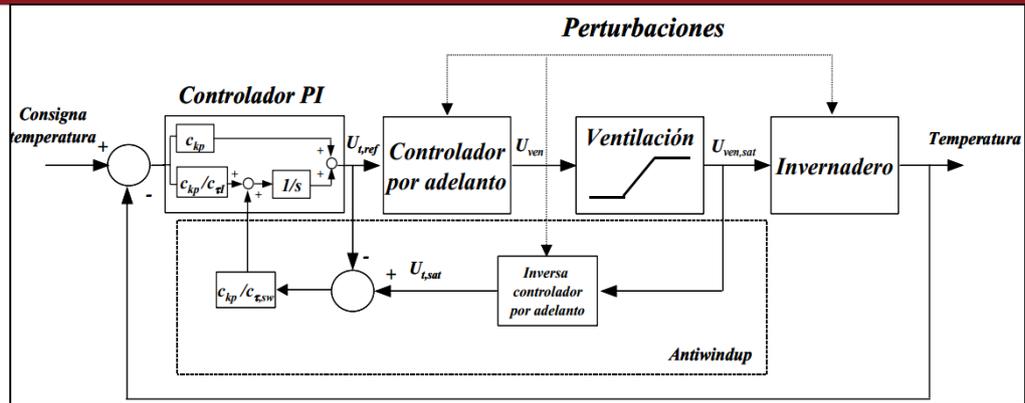


Figura 2.5 Controlador por Adelanto en Serie y Antiwindup de la Temperatura del Invernadero con Ventilación [8].

2.4 Control de la Temperatura Utilizando Calefacción

2.4.1 Problema de Control de la Temperatura Utilizando Calefacción

El sistema de calefacción está compuesto por un conjunto de tuberías de acero repartidas por toda la superficie del invernadero que son calentadas debido a la circulación de agua por su interior y éstas a su vez por convección transmiten calor al aire y por radiación transmiten calor al resto de sólidos (cultivo, cubierta y superficie del suelo) calentándolos, por lo que éstos, a su vez, transmiten calor al aire por convección al encontrarse en contacto con él. Estos fenómenos físicos hacen que se eleve la temperatura del aire interior del invernadero. El problema de control de la temperatura nocturna del aire utilizando calefacción radica en calcular la temperatura a la que debe encontrarse el agua que circula por las tuberías para mantener la temperatura del aire en el valor deseado. Para ello se dispone de una válvula de tres vías que mezcle el agua calentada por la caldera, que es de temperatura constante, con el agua a menor temperatura que proviene del retorno del circuito de tuberías, obteniéndose la temperatura de agua deseada. En estos sistemas industriales, la temperatura del agua se mide aproximadamente a un metro de la válvula principal de mezclas.

De este razonamiento se deduce que se trata de un sistema de control en cascada [9], cuyo esquema se muestra en la figura 2.6. Además, el sistema de control debe gobernar otros dispositivos que no aparecen en la figura como el quemador de la caldera y las bombas que producen la recirculación del agua por las tuberías, pero como son señales discretas del tipo encendido/apagado no se considerarán en este apartado, aunque son de interés para calcular el consumo de este tipo de instalaciones.

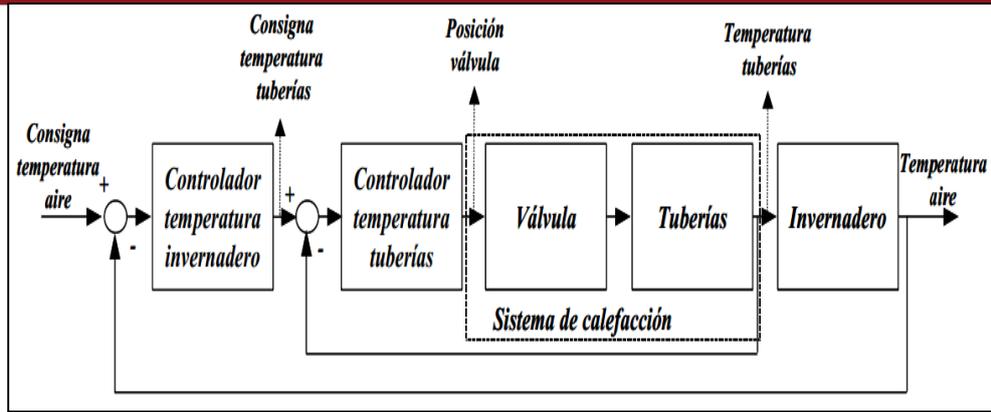


Figura 2.6 Esquema de Control en Cascada de la Temperatura del aire utilizando Calefacción [8].

2.4.2 Esquema de Control de la Temperatura Utilizando Calefacción

Basándose en las consideraciones realizadas acerca de las características principales del control de la temperatura utilizando calefacción se ha optado por el esquema de control que se muestra en la figura 2.7.

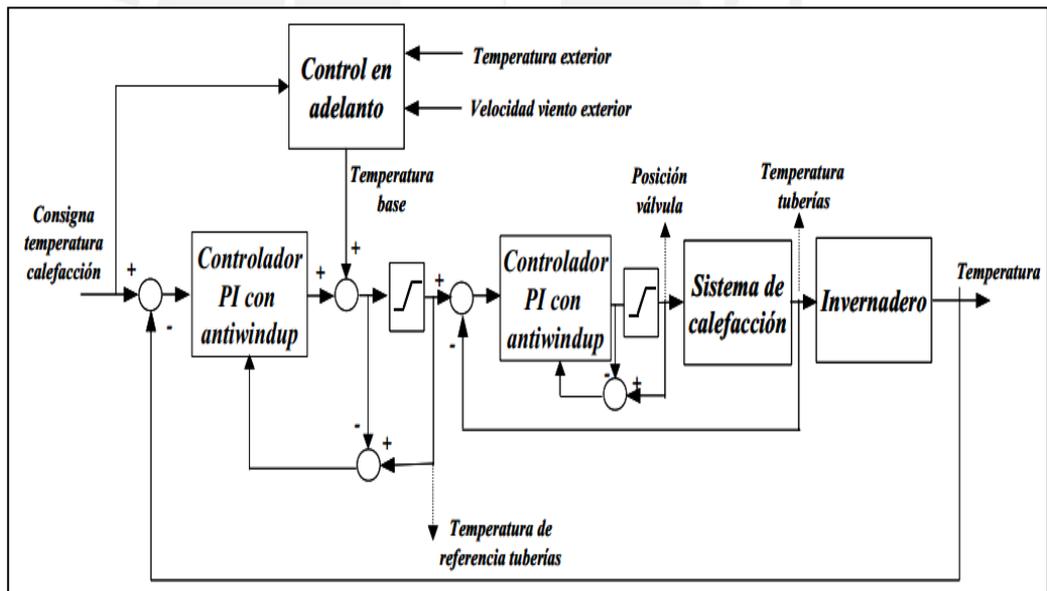


Figura 2.7 Esquema de control de la temperatura utilizando calefacción [8].

Cuando la temperatura del aire del invernadero sea menor que la consigna nocturna, denominada temperatura de calefacción, debe empezar a funcionar el sistema de calefacción calculando el algoritmo de control maestro la temperatura que debe tener el agua que circula por las tuberías para compensar la pérdida de calor. A continuación el segundo controlador (esclavo) debe ajustar la válvula de mezclas para controlar la temperatura del agua.

3 CAPITULO 3. Diseño del Sistema de Control de Temperatura

3.1 Objetivos

3.1.1 Objetivo General

El objetivo de la presente tesis es diseñar un sistema de control de temperatura para un invernadero ubicado en el distrito de Abelardo Pardo Lezameta, provincia de Bolognesi, departamento de Ancash, localizado aproximadamente a 2000 msnm, este debe ser capaz de controlar la temperatura en un rango adecuado para el crecimiento de los cultivos: palto, chirimoya, lúcuma y pino.

3.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Selección de sensores y actuadores.
- ✓ Selección del algoritmo de control adecuado.
- ✓ Implementar el algoritmo de control en un microcontrolador.
- ✓ Diseño de las etapas de sensado y actuación.
- ✓ Diseño del sistema de alimentación de energía por paneles fotovoltaicos.
- ✓ Desarrollo de la interfaz de usuario.

3.2 Funcionamiento del Invernadero

El invernadero o invernáculo es una construcción de vidrio o plástico (en nuestro caso, plástico) en la cual los cultivos se conservan a una temperatura superior al exterior la cual es vital para determinados frutos. Para ello, es necesario alcanzar el efecto invernadero en el interior del lugar donde estarán los cultivos.

Cuando incidan los rayos solares (longitud de onda corta) y traspasen el plástico se calentarán todos los materiales y objetos al interior del invernadero y estos emitirán al exterior rayos de longitud de onda larga, los cuales, no podrán traspasar el material y quedarán atrapados. Con ello se logrará elevar la temperatura y así generar un clima de óptimo crecimiento de los cultivos.

Tanto la temperatura y la radiación solar tienen un comportamiento variable durante el día. Lo que se busca es mantener la temperatura en un nivel adecuado, de acuerdo a los requerimientos climáticos para el crecimiento de los cultivos. El mantener la temperatura en este rango supone el diseñar e implementar una estructura que sea capaz de brindar estas condiciones climáticas (estructura compuesta por sensores y actuadores).

3.3 Requerimientos Climáticos del Invernadero

El óptimo crecimiento de cualquier cultivo prioriza que se encuentre en rangos determinados por ciertas características meteorológicas. Para nuestro sistema los requerimientos se detallan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Requerimientos técnicos de crecimientos de cultivos [10]

Característica Fruto	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	PH Suelo	Altura de Siembra de Cultivo (m.s.n.m.)
Palto	[18-26]	80	[5.5 - 8]	[700 - 1800]
Chirimoya	[14-24]	80	[6 - 7.5]	[1500 - 2500]
Lúcuma	[16-27]	80	[5.8 - 7.8]	[1500 - 3000]
Pino	[17-24]	80	[6.5 - 6.8]	[1500 - 3000]

Los cultivos permanecerán en un solo invernadero aprovechando que tienen las mismas condiciones climatológicas ideales (temperatura, humedad) para esta determinada altura.

Tomando en cuenta los requerimientos climáticos para el crecimiento de los cultivos a una altura sobre los 2000 m.s.n.m. (Tabla 3.1), se fijará una temperatura para los cuatro cultivos en 20°C, la misma que debe estar en un rango de humedad ideal (80 % aproximadamente).

3.4 Diagrama de Bloques

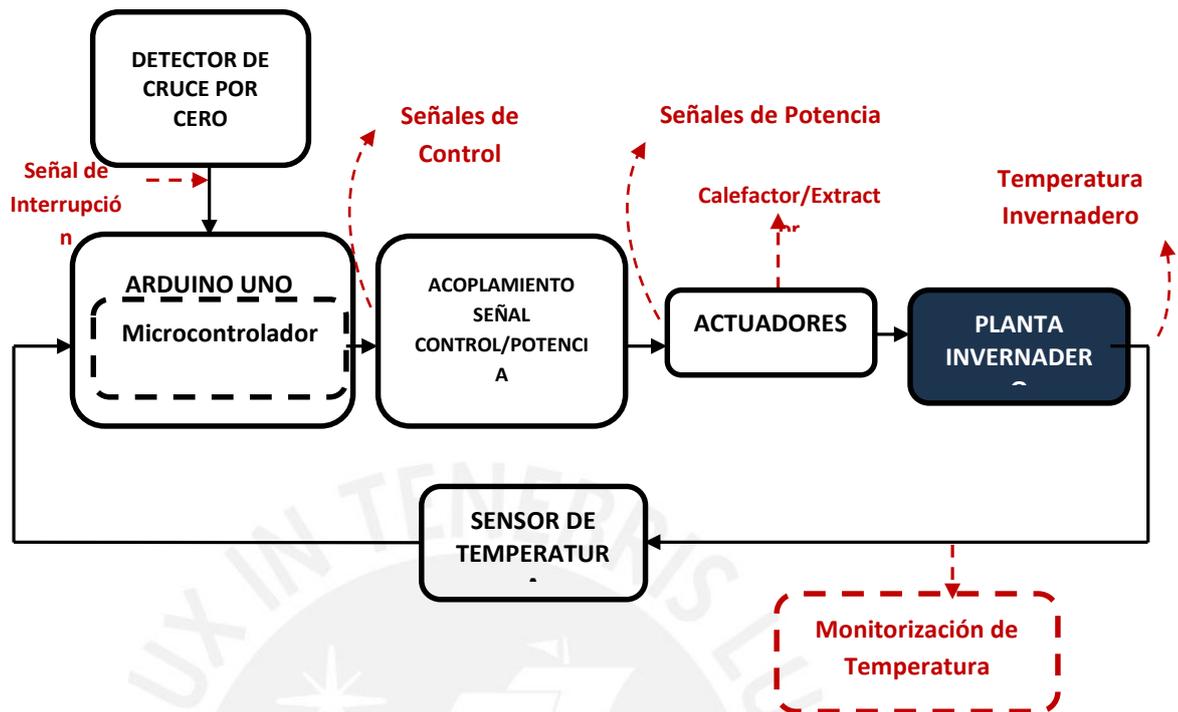


Figura 3.15 Diagrama de Bloques del proceso [Elaboración propia]

El diagrama de bloques (Figura 3.15) está compuesto por 2 partes: la etapa de control y la etapa de potencia.

La etapa de control la compone el Arduino que recibe la lectura de la temperatura del ambiente (por intermedio del sensor digital) y ejecuta el código del programa de control. Adicionalmente esta etapa de control la compone el bloque de detección de cruce por cero (que genera la interrupción al microcontrolador para el inicio del programa).

La etapa de potencia está compuesta por los actuadores encargados de mantener la temperatura en el nivel adecuado (20°C). Existe una etapa intermedia que relaciona la etapa de control y potencia (Bloque Acoplamiento de Señal Control/Potencia) que permite por intermedio tanto del optoacoplador como el Triac poder controlar el ángulo de disparo entregado a las cargas (actuadores) y a su vez mantener el nivel adecuado de temperatura de la planta (invernadero).

Posteriormente los sensores del sistema se encargan nuevamente de la lectura de la temperatura del invernadero y por consiguiente el proceso de control.

Finalmente existirá una monitorización de la temperatura que servirá para establecer una interface de visualización de la temperatura al usuario (por intermedio de un software de monitoreo) y a su vez éste pueda analizar y ejecutar reportes de la variación que se obtuvo en el día.

3.5 Sensor de Temperatura

La selección se realizará de acuerdo a las características técnicas de los sensores y actuadores y a los requerimientos climáticos de los cultivos.

3.5.1 Selección del Sensor de Temperatura

El sensor de temperatura es el dispositivo que está en contacto directo con el interior del invernadero. Por ello, se tuvo en cuenta para la elección: la resistencia a la corrosión y ambientes hostiles, comportamiento lineal, sensibilidad, estabilidad y precio.

A continuación se presentan algunos tipos de sensores empleados en invernaderos.

3.5.1.1 Sensor LM35

El sensor de temperatura LM35 nos brinda un valor de voltaje proporcional a la magnitud de temperatura del ambiente. Cuenta con una precisión calibrada de 1°C (no requiere ser calibrado) y abarca un intervalo que va desde -55°C a +150°C [11]. El sensor se presenta en diferentes encapsulados, pero el más común es el TO-92 (figura 3.1) que se presenta como un típico transistor de 3 terminales, dos de ellos se usan para alimentación y el tercero entrega un valor de tensión que representa el valor de la temperatura. El sensor se encuentra basado en la escala Celsius (centígrado).

Según el fabricante, el sensor LM35 proporciona una salida en forma lineal y equivale a 10mV/°C, por lo tanto:

- +1500mV = 150°C
- +250mV = 25°C
- -550mV = -55°C

Disponible en distintos encapsulados (TO-92, TO-46, SO-8, TO-220)

- Para medir la variación en la resistencia, en el detector se usan circuitos basados en el puente de Wheatstone.

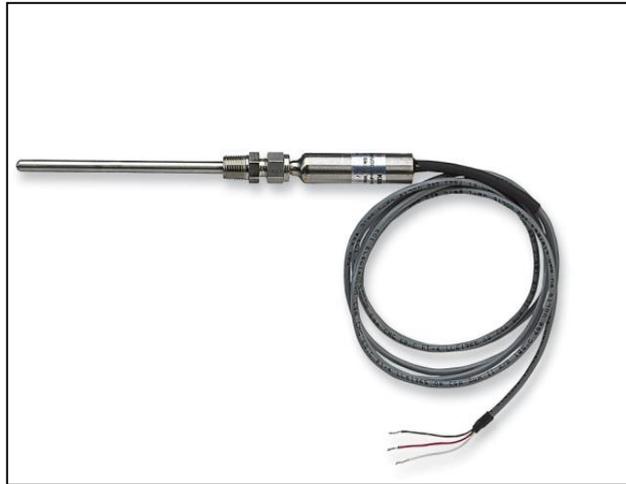


Figura 3.2 Sensor de Temperatura RTD [12]

3.5.1.3 Termistores

Son resistores variables con la temperatura pero no están basados en conductores como los RTD, sino en semiconductores. Se fabrican con óxidos de diferentes metales como: níquel, cobalto, cobre, titanio, manganeso, etc. Por otro lado se utilizan en la regulación del voltaje, control de potencia, control de temperatura, detección en analizadores, etc.

Tipos de termistores:

PTC: coeficiente de temperatura positivo

NTC: coeficiente de temperatura negativo

Ventajas y Desventajas

Ventajas

- alta sensibilidad (100 ohmios/grado)
- alta precisión (+/-0.02°C)
- pequeño tamaño y baratos
- bajo tiempo de respuesta (baja inercia térmica)
- estabilidad y repetitividad a largo plazo

Desventajas

- No lineales. Se requiere linealizar en torno al punto de trabajo.
- Limitado rango de utilización: -40°C a 150°C. Útil para temperatura ambiente.

3.5.1.4 Sensor de Temperatura Digital DS18B20 (Resistente al agua)

El sensor de temperatura DS18B20 es un dispositivo que se comunica de forma digital. Cuenta con tres terminales (dos de alimentación y uno de datos). Utiliza una comunicación “On Wire”, este protocolo permite transmitir y recibir información por una misma vía (cable). La lectura de registro de temperatura es rápida y sencilla de entender.

El código de programación para la lectura de este sensor requiere de la instalación de dos librerías que deben ser instaladas antes de cargar el programa al código del microcontrolador.

Ventajas

- Precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ desde: -10°C a $+85^{\circ}\text{C}$.
- Utilizable con 3.0V a 5.5V de alimentación / datos.
- Rango de temperatura utilizable: -55°C a 125°C (-67 a $+257^{\circ}\text{F}$).
- Inmunidad frente a interferencias.
- La resolución del sensor de temperatura es de 9, 10, 11, o 12 bits, correspondiente a incrementos de $0,5^{\circ}\text{C}$, $0,25^{\circ}\text{C}$, $0,125^{\circ}\text{C}$ y $0,0625^{\circ}\text{C}$. (configurable).
- Tiempo de consulta es inferior a 750 ms.
- Utiliza la interfaz 1-Wire-sólo requiere un pin digital para la comunicación.
- Sensores múltiples pueden compartir un pin.
- No necesitan calibración.
- Resistente al agua (Waterproof).

Desventajas

- El precio se consideró una desventaja debido a la comparación con otros tipos de sensores.



Figura 3.3 Sensor de Temperatura DS18B20 [Anexos del documento]

3.5.1.5 Justificación de la Elección del Sensor de Temperatura

Para la elección del sensor de temperatura se tomaron en cuenta características generales (técnicas y no técnicas) de cada sensor. Luego se

asignaron pesos y valores de cada producto para realizar un promedio ponderado total. Finalmente se compararon los resultados (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Evaluación de Sensores de Temperatura

	LM35					DS18B20			
	PORCENTAJE	PESOS	VALOR PRODUCTO	PONDERADO		PORCENTAJE	PESOS	VALOR PRODUCTO	PONDERADO
Precisión	10%	0.1	2	0.2	Precisión	10%	0.1	3	0.3
Resolución	20%	0.2	1	0.2	Resolución	20%	0.2	4	0.8
Acondicionamiento	25%	0.25	1	0.25	Acondicionamiento	25%	0.25	4	1
Calibración	25%	0.25	1	0.25	Calibración	25%	0.25	3	0.75
Costo	20%	0.2	4	0.8	Costo	20%	0.2	2	0.4
			TOTAL PONDERADO	1.7				TOTAL PONDERADO	3.25

	RTD					TERMISTOR			
	PORCENTAJE	PESOS	VALOR PRODUCTO	PONDERADO		PORCENTAJE	PESOS	VALOR PRODUCTO	PONDERADO
Precisión	10%	0.1	3	0.3	Precisión	10%	0.1	4	0.4
Resolución	20%	0.2	3	0.6	Resolución	20%	0.2	3	0.6
Acondicionamiento	25%	0.25	3	0.75	Acondicionamiento	25%	0.25	2	0.5
Calibración	25%	0.25	2	0.5	Calibración	25%	0.25	2	0.5
Costo	20%	0.2	3	0.6	Costo	20%	0.2	4	0.8
			TOTAL PONDERADO	2.75				TOTAL PONDERADO	2.8

VALOR PRODUCTO
1 -> Malo
2 -> Promedio
3 -> Bueno
4 -> Muy bueno

[Elaboración propia]

Se puede apreciar en el cuadro que el mayor valor ponderado lo tiene el sensor de temperatura digital DS18B20 (óptimo desempeño en ambientes de humedad, además de su resistencia al agua), condiciones suficientes para justificar su elección.

3.6 Actuadores

El actuador es el elemento final del sistema de control, la elección de los mismos, como en el caso de los sensores, será en base a las especificaciones técnicas que logren cumplir con los requerimientos del proceso. Se detallará a continuación algunos elementos de actuación aplicados en invernaderos.

3.6.1 Selección de los Actuadores

3.6.1.1 Cables Calefactores Paralelos

El sistema de calefacción para invernaderos se basa en la integración de este cable calefactor bajo el subsuelo del invernadero. El cable calefactor paralelo,

modelo CTCS, tiene una potencia por metro lineal constante, incluso puede ser cortado a medida según las necesidades.

Se caracteriza porque el hilo de calentamiento va arrollado en espiral sobre un conductor paralelo aislado de este, excepto en contactos alternativos a una distancia de un metro entre cada uno de los conductores activos. De esta forma el cable calefactor va formando una serie de resistencias en paralelo alimentadas por el mismo cable que le sirve de cuerpo. Sus características técnicas son mostradas en la Tabla 3.3

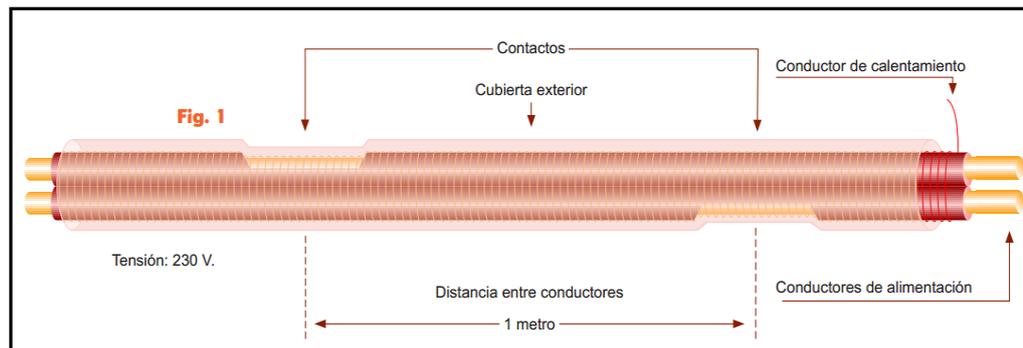


Figura3.4 Cable Calefactor Paralelo CTCS [13]

Tabla 3.3 Datos Técnicos del Cable Calefactor Paralelo [13]

Modelo	CTCS75/25	CTCSM75/25
Potencia de entrega a 230 V (W/m):	25 W	25 W
Cobertura malla metálica trenzada:	Sin malla	90% de cobertura (cobre Sn - 1 mm ²)
Temperatura máxima trabajo:	60°C (conectado)	60°C (conectado)
Temperatura máxima trabajo:	100°C (desconectado)	100°C (desconectado)
Longitud máxima circuito (m):	80 m	80 m
Distancia entre contactos:	1.000 mm	1.000 mm
Conductor calentamiento:	Ni/Cr 80/20	Ni/Cr 80/20
Conductor paralelo:	2 x 0,75 mm ²	2 x 0,75 mm ²
Tipo de aislamiento:	Silicona térmica	Silicona térmica
Tensión del aislamiento:	1.500 V	1.500 V
Tolerancia de la potencia:	+ -5%	+ -5%
Dimensiones aproximadas:	7 x 5 mm	8 x 6 mm
Temp. mínima instalación:	-50°C	-50°C
Suministros en bobinas de:	*100 y 150 mts	*100 y 150 mts
*Nota: las bobinas podrán variar su longitud bajo demanda.		

3.6.1.2 Ventilador Calefactor

El calefactor con ventilador HVL 031 [14] previene la formación de condensación y el ventilador axial integrado de alto rendimiento proporciona la circulación de aire forzado garantizando una temperatura estable.

Estos calentadores se utilizan en los recintos en donde el daño de la condensación debe ser prevenido o donde la temperatura no debería estar debajo de un valor mínimo. El diseño de aluminio del cuerpo del calentador tiene un efecto el cual hace distribuir el calor uniformemente.

Este calentador ventilador está disponible sin o con el ventilador. En la Tabla 3.4 se presentan las especificaciones técnicas de este elemento.



Figura 3.5 Ventilador Calefactor [14]

Tabla 3.4 Datos técnicos de Ventilador-Calefactor [15]

Arte. No. 230VAC, 50/60 Hz	Arte. No. 120VAC, 50/60 Hz	Capacidad de calefacción	min de flujo de aire., el flujo libre	Dimensiones	Peso (aprox.)
03102.0-00	03102.9-00	100W	35m³/h	80 x 112 x 47mm	0.60kg
03103.0-00	03103.9-00	150W	35m³/h	80 x 112 x 47mm	0.60kg
03113.0-00	03113.9-00	200W	108m³/h	119 x 151 x 47mm	0.90kg
03114.0-00	03114.9-00	300W	108m³/h	119 x 151 x 47mm	0.90kg
03115.0-00	03115.9-00	400W	108m³/h	119 x 151 x 47mm	0.90kg

Entre los datos más importantes se tiene el flujo o caudal de aire [Tabla 3.4] y la capacidad de calefacción, que determinarán con cuanta eficacia y tiempo se calentará un invernadero.

3.6.1.3 Calentador de Cerámica industrial PTC

Este es otro elemento de calefacción aplicado usualmente en invernaderos. El método es de calefacción/ventilación. Posee un termostato ajustable, protección contra sobrecalentamiento y adicionalmente es impermeable. Usado para uso en el hogar o como calentador eléctrico dedicado en invernaderos y granjas. Sus características técnicas se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Características Técnicas Calentador de Cerámica [15]

Características Técnicas Calentador de Cerámica industrial PTC		
1	Marca	LCH
2	Elemento de Calefacción	PTC
3	Voltaje(Vac)	220
4	Frecuencia	50/60
5	Potencia(W)	1500 /3000
6	Tamaño(mm)	305x295x175
7	Material	metal + ABS
8	Alcance(m ²)	1-3
9	Color	rojo
10	Cambio de Potencia(W)	1500 /3000
11	Peso(Kg)	3



Figura 3.5 Calefactor Ventilador PTC LCH [15]

3.6.1.4 Termoventilador

El Termoventilador es un dispositivo que tiene un funcionamiento similar al ventilador calefactor, ya que posee un ventilador axial (para la difusión de aire caliente). Adicionalmente tiene un termostato que se activa automáticamente cuando se supera el límite de temperatura Finalmente cuenta con circuitos de protección eléctrica. Son de fácil instalación, peso ligero y costo accesible. Sus características se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Características Termoventilador 2kW [16]

Características Principales	
Marca	Magefesa
SKU (simple)	MA033HL0KO0YMLPE
Modelo / ISBN	1267
Tamaño (Largo x Ancho x Alto cm)	22x13x24
Potencia(Kw)	2
Peso (kg)	1.5
Caudal	50m ³ /h
Garantía	1 Año
Otros	Termostato Ambiente Corte de Seguridad

3.6.1.5 Extractor de Aire Karson

Se seleccionó un extractor de aire que facilita la remoción del aire caliente proporcionado por el calefactor. Una alternativa adicional sería instalar una mayor cantidad de ventanas pero para mejorar la eficiencia del invernadero se empleará un extractor típico usado en baños y en invernaderos artesanales. Este extractor es de la marca Karson y se aplicó la siguiente fórmula 3.3.2.4. para determinar el caudal de extracción. Algunas características principales se muestran en la Tabla 3.7

$$\text{Caudal} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \right) = \text{Volumen}(\text{m}^3) * \text{Renovaciones} \dots \dots \dots 3.3.2.4$$

Tabla 3.7 Características Técnicas Extractor [17].

Volumen Total(m³)	85
Renovaciones	7(*)
Caudal(m³/h)	595
Potencia(W)	10

(*)Este factor de renovación es aplicado para ambientes de oficina. [17].



Figura 3.7 Extractor Karson [17]

Por consiguiente se eligió el extractor cuyo caudal es de 600m³/h.

3.6.1.6 Justificación de la Elección del Actuador

Para la elección del Actuador se tomaron en cuenta sus características generales (técnicas y no técnicas). Al igual que en la evaluación de los sensores, se asignaron pesos y valores a cada producto (cuatro valores de calificación para cada actuador) a fin de realizar un promedio ponderado total. Se evaluaron características como la instalación, precio, potencia, flujo de aire y peso, para finalmente comparar los resultados como se aprecia en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Evaluación de Actuadores

	CABLES CALEFACTORES PARALELOS			
	PORCENTAJE	PESOS	VALOR PRODUCTO	PONDERADO
INSTALACION	15%	0.15	1	0.15
PRECIO	20%	0.2	1	0.2
POTENCIA	25%	0.25	2	0.5
FLUJO DE AIRE	25%	0.25	1	0.25
PESO	15%	0.15	2	0.3
Total Ponderado				1.4

	CALEFACTOR VENTILADOR			
	PORCENTAJE	PESOS	VALOR PRODUCTO	PONDERADO
INSTALACION	15%	0.15	3	0.45
PRECIO	20%	0.2	1	0.2
POTENCIA	25%	0.25	2	0.5
FLUJO DE AIRE	25%	0.25	2	0.5
PESO	15%	0.15	3	0.45
Total Ponderado				2.1

	CALENTADOR DE CERÁMICA PTC			
	PORCENTAJE	PESOS	VALOR PRODUCTO	PONDERADO
INSTALACION	15%	0.15	4	0.6
PRECIO	20%	0.2	1	0.2
POTENCIA	25%	0.25	3	0.75
FLUJO DE AIRE	25%	0.25	3	0.75
PESO	15%	0.15	2	0.3
Total Ponderado				2.6

	TERMOVENTILADOR			
	PORCENTAJE	PESOS	VALOR PRODUCTO	PONDERADO
INSTALACION	15%	0.15	4	0.6
PRECIO	20%	0.2	4	0.8
POTENCIA	25%	0.25	3	0.75
FLUJO DE AIRE	25%	0.25	2	0.5
PESO	15%	0.15	3	0.45
Total Ponderado				3.1

	VALOR PRODUCTO
1	-->Malo
2	-->Promedio
3	-->Bueno
4	-->Muy Bueno

[Elaboración Propia]

Se puede concluir que el de mayor valor ponderado es el Termoventilador (presentó un promedio de 2.6 en la evaluación), condición suficiente para justificar su elección.

3.6.1.6.1 Cálculo de la Potencia del Actuador Elegido.

- Para calcular la potencia necesaria del actuador (calefactor elegido), será necesario conocer el volumen del invernadero, así como el máximo cambio de temperatura (elevación) observado durante el año. Producto de estas variables se obtiene la potencia necesaria que asegura el abastecimiento del aire caliente a toda la superficie del invernadero.
- Se presenta a continuación la estructura desplegada del invernadero para efectos de cálculo (Figura 3.8).

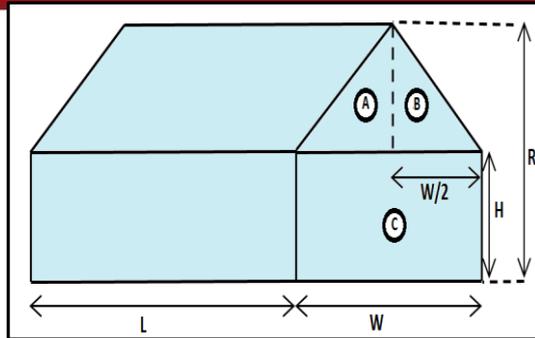


Figura 3.8 Estructura de Invernadero

[Elaboración Propia]

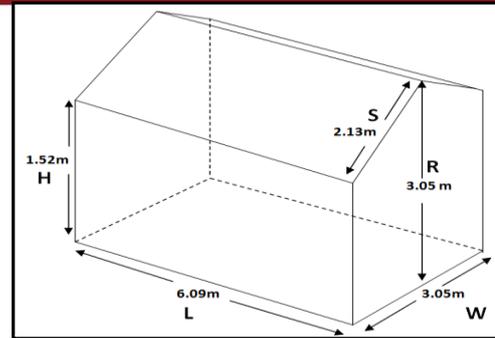


Figura 3.8 Estructura Desplegada de Invernadero

Se detalla los datos de la dimensión del invernadero en la Tabla 3.9

Tabla 3.9 Dimensión del Invernadero

Dimensión del Invernadero			
Símbolo	Característica	Metros	Pies
H	Altura de los aleros	1.52	4.99
R	Altura de la cresta	3.05	10.01
S	Longitud de la pendiente de la cubierta	2.13	6.99
L	Longitud	6.09	19.98
W	Ancho	3.05	10.01

A continuación de detallarán los pasos necesarios para la obtención de la potencia necesaria a suministrar [18].

a) Primer paso: Calcular el volumen de la superficie interna. El cálculo del volumen total del invernadero se calcula en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Cálculo Volumen Invernadero

Cálculo Volumen Invernadero				
Superficie Expuesta (Pies ²)			Longitud (Pies)	Volumen Total Invernadero (Pies ³)
A+B+C (*)			L	L*(A+B+C)
A(Pies ²)	B(Pies ²)	C(Pies ²)	L(Pies)	(Pies ³)
$(W/2)*(R-H)*(1/2)$	$(W/2)*(R-H)*(1/2)$	H*W	L	$L*H*W*2((W/2)*(RH)*(1/2))$
12.56	12.56	49.90	19.98	1498.85

(*) Tomado como referencia la figura 3.8 [Elaboración Propia]

b) Segundo Paso: Determinar la diferencia entre la temperatura más alta que se mantiene en el invernadero (temperatura deseada) y la temperatura mínima observada durante el día .Calculado en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Cálculo Variación de Temperatura [18]

Cálculo Variación Temperatura		
Temperatura Requerida(°C)	Temperatura Mínima(°C)	Variación Temperatura(°C)
20	8	12

[Elaboración Propia]

c) Tercer Paso: Se calcula la potencia necesaria del actuador. Para ello se requiere conocer el material del cual está hecho el invernadero y aplicar un factor de corrección al momento de calcular la potencia. Estos cálculos son mostrados en la Tabla 3.12

Tabla 3.12 Cálculo de la Potencia Suministrada [18]

Cálculo Potencia(W)				
Volumen Total Invernadero (Pies ³)	Variación Temperatura(°C)	Factor(**)	BTU	Potencia(W/hr) (***)
1499.99	12	0.70	125600	3673.47

[Elaboración Propia]

(**) El factor de corrección por material fue tomado de la tabla 3.13

(***) La potencia fue hallada luego de dividir los BTUs entre 3.43 (factor de conversión de BTU a Watts)

Tabla 3.13 Tabla de coeficientes de transferencia de calor de materiales de construcción de invernaderos [18].

Material	Valor U (BTU / (h ° F ft ²))
1. De vidrio, de una sola capa	1.13
2. Vidrio, de doble capa, 1/4 "de espacio	0.65
3. La película del PE, de una sola capa	1.15
4. La película del PE, de doble capa, separados	0.70
5. Fibra de vidrio	1.00
6. Bloque de hormigón, 8 "	0.51
7. Bloque de hormigón, 8 "más 1" de espuma de uretano	0.13
8. Bloque de hormigón, 8 "más 1" de espuma de poliestireno	0.18
9. Hormigón vertido, 6 "	0.75
10. Cartón de amianto cement, 1/4 "	1.10
11. Cartón de amianto cemento, 1/4 "más 1" de espuma de uretano	0.14
12. Cartón de amianto cemento, 1/4 "más 1" estireno poli espuma	0.21

Cuanto menor sea el valor U menor será la pérdida de calor

Finalmente la selección de nuestro calefactor (calentador de cerámica PTC) deberá tener una potencia mayor a 3.67 kW sustentado en los cálculos realizados anteriormente.

3.6.1.7 Implicancia del Factor Altura

La altura modifica las propiedades dieléctricas en función a los rangos eléctricos de funcionamiento de los actuadores debido a la reducción de la densidad del aire. La disminución de esta por el aumento de la altura tiene efectos tanto en la tensión como en la corriente.

La rotura del nivel de aislamiento de voltaje depende de las condiciones atmosféricas, la cual es medida en condiciones de prueba de acuerdo al estándar IEC 60-1. La desclasificación de voltaje en celdas de media tensión por disminución de voltaje de ruptura de aislamiento afecta: el voltaje nominal, el voltaje aislamiento de frecuencia industrial kVrms y a el voltaje de aislamiento de descarga atmosférica BIL kVp.

Los estándares IEC 62271-200 y ANSI C37.20.2-1986 recomiendan en sus cláusulas para condiciones inusuales, el uso de factores de corrección. El cálculo de estos factores es mostrado en la Tabla 3.14.

Se empleará el factor de corrección según el estándar IEC 62271-200 por ser el más considerado en temas de diseño en zonas de altura.

Corrección Voltaje:

$$k = e^{\frac{m \cdot (H - 1000)}{8150}}$$

Ecuación 3.3.2.7a

Corrección Corriente:

$$k = 1 - 0.02 \cdot \frac{H - 1000}{100}$$

Ecuación 3.3.2.7b

Donde

K: Factor de corrección.

ε: Exponencial (base logaritmo natural).

H: Altura en metros.

M Depende de varios parámetros, para el diseño se considera 1.

Tabla 3.14 Factores de Corrección según norma ANSI/NEMA IEC 62271-200 (Anexos del documento)

Altura(msnm)	2000
--------------	------

Factores de corrección por altitud ANSI/NEMA IEC 62271-200

Rango	Operación a 2,000 m.s.n.m.	Factor de Corrección	Nuevo Rango a 2,000 m.s.n.m.	Potencia Nominal (W)	Potencia Requerida (W)
Voltaje de Operación(V)	220	0.91	241.76	3673.47	3996.41
Corriente Continua(A)	16.69	0.99	16.53		

[Elaboración Propia]

Aplicando el factor de corrección para el uso de éste equipo en altura se necesitará una de potencia mayor a 3.9 kW; por consiguiente elegiremos un actuador de 4kW de potencia.

3.7 Diseño de las Etapas de Sensado y Actuación

Se presenta a continuación el diseño de las etapas de control y potencia y la disposición que tendrán estos elementos en el invernadero.

3.7.1 Detección de Cruce por Cero

Para el correcto funcionamiento del circuito de control y potencia es necesario sincronizar ambas etapas en igual frecuencia que será de 120 Hz (permitirá un mayor análisis de los cruces por cero), para ello se requiere diseñar un circuito detector de cruce por cero el cual se muestra en la Figura 3.9. El programa comenzará a partir de la señal de interrupción generada en el PIN 5 del Optotransistor 4N35 y con ello se dará inicio al código del programa (su ejecución controlará el ángulo de disparo y por consiguiente el suministro de energía a los actuadores).

La elección del 4N35 se debió a su alta capacidad de corriente de entrada permitida (60 mA), su baja disipación de calor (100mW) y su alta frecuencia de lectura (50 KHz) usada en circuitos de control realimentados. Todas las características se encuentran detalladas en la hoja de datos del integrado (Anexos del documento).

Para la detección de cruce por cero se empleó como primera etapa un transformador de 220Vac a 12Vac, el cual permitía reducir el voltaje AC de línea con la finalidad de que opere con normalidad el Optotransistor (rango de entrada permisible).

Para el cálculo de las resistencias empleadas en el diseño de esta etapa fue necesario revisar la hoja técnica del fototransistor 4N35.

Tanto R5 como R6 fueron calculados en base a la mitad del máximo valor de corriente (60mA) de entrada permitida por el diodo interno del fototransistor. El cálculo se realizó de la siguiente manera:

- ✓ Voltaje Máximo(DC) a la salida del Rectificador:

$$12 * (\sqrt{2}) = 16.97 \text{ V}$$

- ✓ Corriente Máxima permitida a la entrada del Optoacoplador:

$$60 \text{ mA (Para el diseño se consideró } 30 \text{ mA).}$$

Entonces:

$$R5 = R6 = R$$

$$\frac{16.97 \text{ V}}{2R} \leq 30 \text{ mA}$$

$$R \geq 282.8 \Omega$$

Por lo tanto:

R5 y R6 deben tener un mínimo valor de 282.8 ohmios, por tal motivo se eligieron unas resistencias de 330 ohmios.

La Figura 3.9 muestra el circuito que proporcionará la detección de cruce por cero. Al ser una rectificación de onda completa, ésta se dará cada 8.33 ms aproximadamente (la frecuencia de operación será de 120 Hz).

Adicionalmente se genera la interrupción en el PIN 2 de Arduino cuando se satura el transistor interno del 4N35. Se configuró el Arduino con una resistencia interna de Pull-up con la finalidad de originar una interrupción cuando se detecte una lectura de bajo nivel (0V) en el PIN 2 de Arduino.

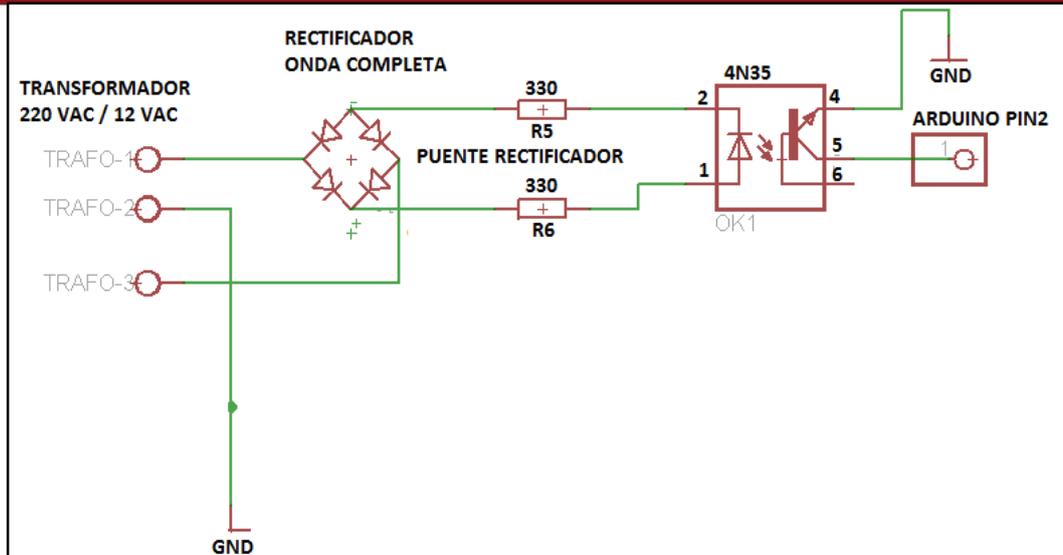


Figura 3.9 Etapa de Detección de Cruce por Cero [Elaboración Propia]

3.7.2 Etapa de Control

Para el diseño de la etapa de control se requiere de una buena elección del Microcontrolador que permita cumplir con los requerimientos que necesita el sistema de control para su correcto funcionamiento. Este se encargará de ejecutar el código de programación y determinará el ángulo de disparo que será proporcionado a los actuadores por intermedio del Triac.

Los microcontroladores o placas más usadas en el mercado son el PIC y el Arduino que consta de un microcontrolador ATMEGA328. Se realizará una comparación entre ambos para finalmente elegir el más conveniente.

Las características fueron tomadas de las hojas de datos de ambos integrados (Anexos del documento) y se detallarán en la Tabla 3.15

Tabla 3.15 Comparativa de Microcontroladores [Elaboración propia]

CARACTERÍSTICAS	PIC 16F877	ARDUINO
Tensión de Alimentación	2V-6V	7V-12V
Entradas Analógicas	8-12	6
Entradas /Salidas Digitales	22	14
Pines de interrupción	14	2
Frecuencia de Operación	4 Mhz	16 Mhz
Máxima Corriente en la Entrada	25 mA	40 mA
Memoria de Programas	8 kB	32 KB
Comunicación	MSSP, USART	UART TTL
Software de Monitoreo	NO	SI

Comunicación Con Ordenador	Serial RS232	Serial RS232/USB/ICSP
----------------------------	-----------------	--------------------------

Se puede apreciar que tienen características similares y el precio en el mercado es similar en ambos casos.

Finalmente se optó por elegir el Arduino UNO por la facilidad en la elaboración del código (consta con variedad librerías y funciones ya elaboradas). Adicionalmente en esta placa se puede visualizar la modificación del valor de las variables ya que posee un monitor serial en el software de programación.

3.7.3 Etapa de Potencia

El circuito diseñado corresponde a un modo de control del Triac por variación del ángulo de disparo que permite establecer un control en la potencia entregada a las cargas de 220 Vac, como se muestra en la Figura 3.10.

Las cargas estarán representadas por los actuadores que estarán ubicados en el interior del invernadero.

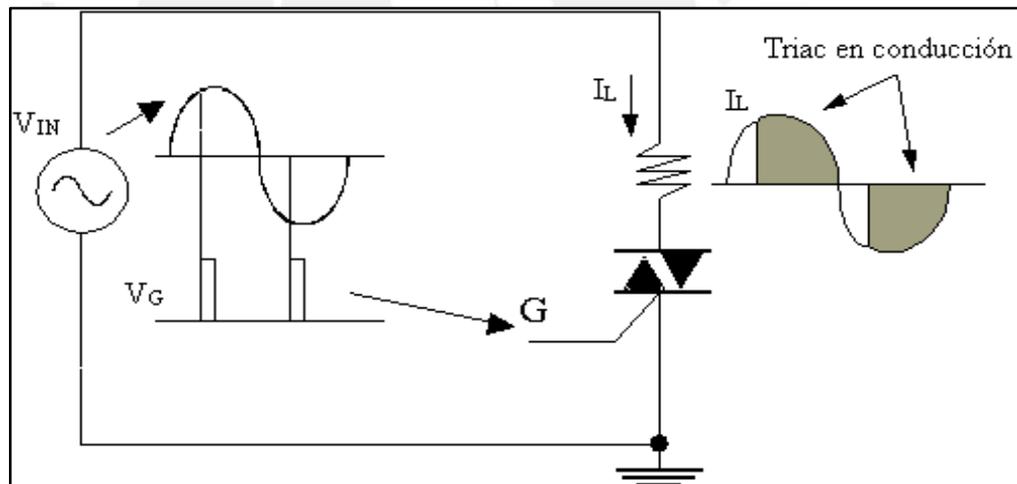


Figura 3.10 Control de Voltaje de una carga de CA [19]

3.7.3.1 Circuito Regulador de Potencia

La etapa de potencia está constituido por un circuito regulador de potencia. Como se muestra en la Figura 3.11, el circuito posee un Optoacoplador MOC3021, un Triac TIC225 y elementos de actuación (cargas).

El diseño del circuito de potencia se basó principalmente en el cálculo de las resistencias.

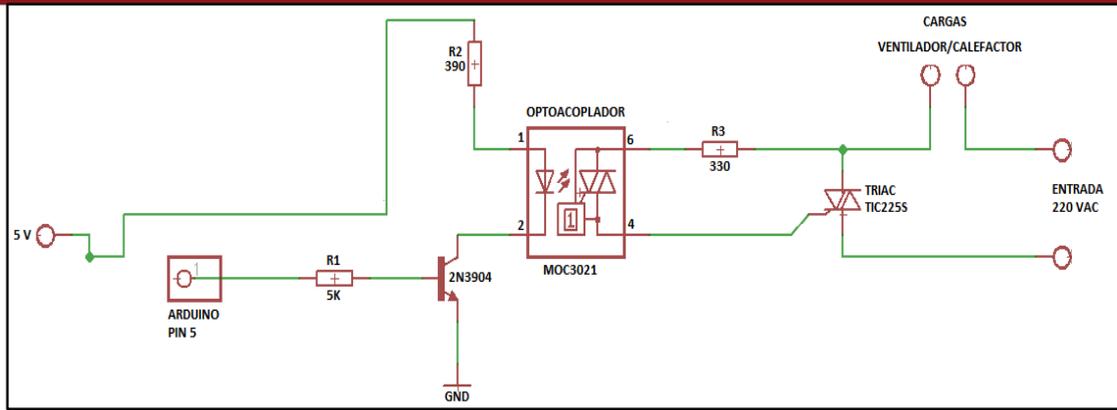


Figura 3.11 Circuito Regulador de Potencia [Elaboración Propia].

Como primer paso se debe calcular la resistencia R2, la cual es necesaria para el LED de disparo del optoacoplador. Aplicando la ley de voltaje de Kirchoff entre V_{CC} (voltaje de entrada 5VDC), I_{FT} (corriente máxima del optoacoplador) y R2 (resistencia de activación del led del Optotriac). Tenemos:

$$R2 = \frac{V_{cc} - V_f - V_{cesat}}{I_F} \quad \text{Ecuación 3.7.3.1}$$

Para el cálculo de la resistencia R2 debemos tener en cuenta el datasheet del optoacoplador MOC 3021 (Anexos del documento), en la Tabla 3.16 se dan a conocer sus principales características.

Tabla 3.16 Características principales del MOC3021 [Anexos del documento].

SIMBOLO	SIGNIFICADO	RANGO	UNIDAD
V_F	Voltaje de conducción	1.2	V
V_{MOC}	Voltaje de salida en conducción	3	V
I_{maxMOC}	Corriente máxima de salida de MOC	1	A
I_F	Corriente de conducción	10	mA
$I_{FT(Max)}$	Corriente máxima de conducción	50	mA

Entonces por la ecuación 3.7.3.1 y la Tabla 3.16 y 3.17 se tiene:

$$\frac{5V - 1.2V - 0.2V}{10 \text{ mA}} \geq R2$$

$$360 \leq R2$$

- ❖ Por lo tanto se elegirá para R2 el valor comercial de 390Ω.

La resistencia encargada de la protección generada por el pulso es calculada a partir del voltaje del microcontrolador V_{mc} (5 VDC para activarlo y 0 VDC para desactivarlo).

$$R1 = \frac{V_{mc} - V_{BE}}{I_B} \quad \text{Ecuación 3.7.3.2}$$

Para el cálculo de la resistencia en la base del transistor 2N3904 se tuvo en cuenta la hoja característica del transistor. Sus principales características se presentan en la Tabla 3.17.

Tabla 3.17 Características principales del transistor 2N3904 [Anexos del documento].

SIMBOLO	SIGNIFICADO	RANGO	UNIDAD
V_{BE}	Voltaje Base-Emisor	0.7	V
V_{CESAT}	Voltaje Colector-Emisor (saturación)	0.2	V

La corriente de base (I_B) se calcula a partir de la corriente circulada en el colector del transistor. Dado que el factor β del transistor tiene el valor de 10 ($I_C/I_B=10$) y que la corriente en el colector es de 10 mA, se deduce que la corriente de base vale 1 mA

Aplicando la ecuación 3.7.3.2:

$$R1 = \frac{5V - 0.7V}{1mA} = 4.3 \text{ k}\Omega$$

❖ Por lo tanto se elegirá para R1 el valor comercial de 5 K Ω

Para halla el valor de R3 es necesario analizar la máxima corriente permitida en el MOC y ésta ocurre cuando los terminales de salida del Optotriac están en conducción.

Por ende, el análisis va a depender de los cálculos (ley de voltajes en la malla del circuito) durante el tiempo de activación del Led del Optotriac y así garantizar la protección de los integrados.

Se aplicará ley de voltajes de Kirchoff y se pondrá una corriente de malla de 1A que es la máxima permitida tanto para el MOC como para el TRIAC, cuya hoja de datos se muestra en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18 Características TRIAC TIC225 [Anexos del documento].

SIMBOLO	SIGNIFICADO	RANGO	UNIDAD
I_{GT}	Corriente de disparo de puerta	[0.8 - 11.7]	mA
V_G	Voltaje disparo de puerta	1.6	V
V_T	Voltaje entre terminales de Triac MT1-MT2(cuando circula corriente en la puerta)	[1.6 – 2.1]	V
I_{GM}	Máxima corriente en la puerta	1	A
I_{TRMS}	Máxima corriente en Terminales de Triac(MT1-MT2)	8	A

De la aplicación de la ley de voltajes se deduce:

$$R3 \leq \frac{V_{LINEA(PICO)} - V_{MOC} - V_G - V_{CALEFACTOR}}{I_{GM}} \quad \text{Ecuación 3.7.3.3}$$

Se requiere colocar el voltaje del calefactor ($V_{calefactor}$) en función de la corriente circulante para reemplazarlo en la ecuación 3.7.3.3.

Para ello, primero se debe conocer la resistencia equivalente del calefactor ($R_{CALEFACTOR}$)

Para hallar dicha resistencia calefactora se sigue la ecuación 3.7.3.4:

$$P_{CALEFACTOR} = \frac{(V_{LINEA})^2}{R_{CALEFACTOR}} \quad \text{Ecuación 3.7.3.4}$$

$$2000 = \frac{(310 V)^2}{R_{CALEFACTOR}}$$

$$R_{CALEFACTOR} = 48.05 \Omega$$

Reemplazando valores de la ecuación 3.7.3.3.

$$R3 \geq \frac{311 V - 3V - 1.6V - (48.05 \Omega) * I_{GM}}{I_{GM}}$$

Con I_{GM} igual a 1 A (máximo valor permitido por el MOC y TRIAC) reemplazamos en la misma ecuación:

$$R3 \geq \frac{311 V - 3V - 1.6V - 48.05 \Omega}{1}$$

$$R3 \geq 258.35 \Omega$$

- ❖ Por lo tanto se elegirá para R3 el valor comercial de 330Ω

La elección del TRIAC fue en base a la máxima corriente soportada entre sus terminales. Esta se calculó en base a la carga soportada después del disparo al Triac

Potencia de calefactor ($P_{\text{CALEFACTOR}}$): 2KW

Voltaje Línea Pico ($V_{\text{LINEA (PICO)}}$): 311 V

Se sabe por la ecuación 3.7.3.4 que la resistencia de calefactor ($R_{\text{calefactor}}$) es igual a 48.05Ω .

Calculando la máxima corriente entre los terminales del Triac (I_{MAX}) se tiene:

$$I_{\text{MAX}} = \frac{(V_{\text{LINEA(PICO)}} - V_T)}{R_{\text{CALEFACTOR}}}$$

$$I_{\text{MAX}} = \frac{311\text{ V} - 2.1\text{ V}}{48.05\ \Omega}$$

$$I_{\text{MAX}} = 6.42\text{ A}$$

Por consiguiente puede esta carga ser soportada por el TRIAC TIC225 ya que este elemento posee una máxima corriente entre sus terminales (I_{TRMS}) de 8 A (Tabla.3.18)

Todas las resistencias serán de medio vatio la explicación de la misma se muestra en los anexos del documento de tesis (Cálculo de Resistencias del Circuito Implementado), en los que se da a conocer que la potencia generada para este tipo de circuito es menor incluso a un cuarto de vatio.

3.7.3.2 Algoritmo de Control

El algoritmo está basado en una lógica de control de tipo Proporcional. Existirá una proporción entre el ángulo de disparo y la potencia entregada hacia los actuadores (calefactor, extractor).

Se recibirá una interrupción externa (proporcionada por el circuito de cruce por cero) en el PIN 2 de Arduino (Pin de interrupción) y se dará inicio al código del programa. Posteriormente el código generará dos pulsos de salida (PIN5, PIN6) que servirán para controlar el disparo hacia los Triacs que regulan la potencia entregada tanto al calefactor como el extractor.

Finalmente con el control de la potencia entregada se logra regular la temperatura interna del invernadero y llevarla al valor deseado, la cual es de 20 °C.

Las ventajas y desventajas de aplicar este algoritmo de control proporcional son las siguientes:

Ventajas

- ✓ Existirá un ahorro de energía útil ya que no se está utilizando toda la potencia efectiva (como en el caso de aplicar una técnica ON/OFF), de esta manera solo se usará la energía necesaria.
- ✓ Un control proporcional lineal realimentado sería suficiente para controlar la temperatura del sistema ya que la variación de temperatura es un proceso lento y no sería necesario hallar otros parámetros de control que implicarían realizar un diseño de control más complejo.
- ✓ Permite una implementación más sencilla, en comparación a lo que significaría realizar un control PID, como se realizó en el presente documento (prototipo diseñado en el Capítulo 4).
- ✓ La implementación de este diseño posee un costo accesible en el mercado.

Desventajas

- ✓ Al ser control realizado en un microcontrolador digital presenta cierto grado de inestabilidad, debido a utilizar únicamente muestras de las señales de control. [18]

El código realizado se detalla en los anexos de este documento.

3.7.4 Esquema General Control-Potencia

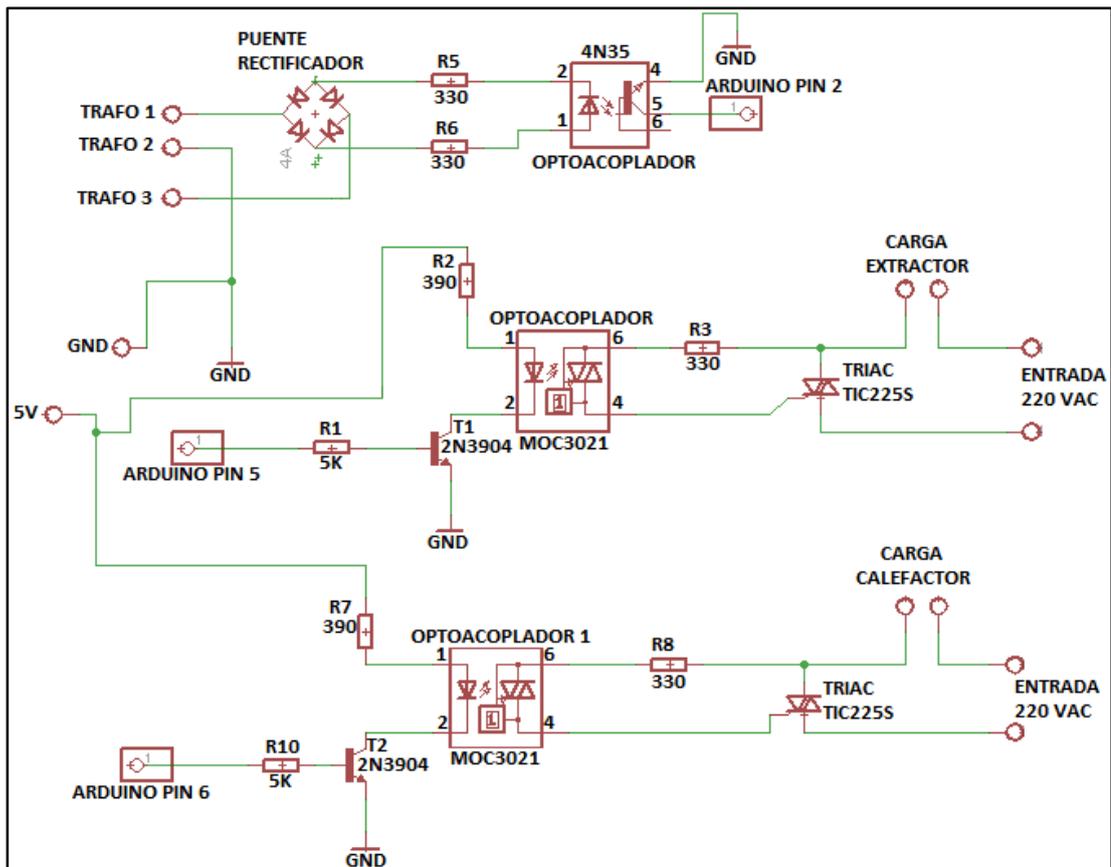


Figura 3.12 Esquema General Control-Potencia

En la Figura 3.12 se muestra una visión más genérica de lo que es el esquema de control y potencia del sistema. Como se mencionó anteriormente la señal de interrupción la recibe el PIN 2 de Arduino, luego se ejecuta el programa en la en el microcontrolador generándose dos señales de control de potencia en los pines 5 y 6 de esta placa. El acoplamiento de la etapa de control con la etapa de potencia se da por intermedio del circuito Optotriac-Triac que controlará la potencia entregada a los actuadores.

3.7.5 Prototipo de Disposición de Sensores y actuadores

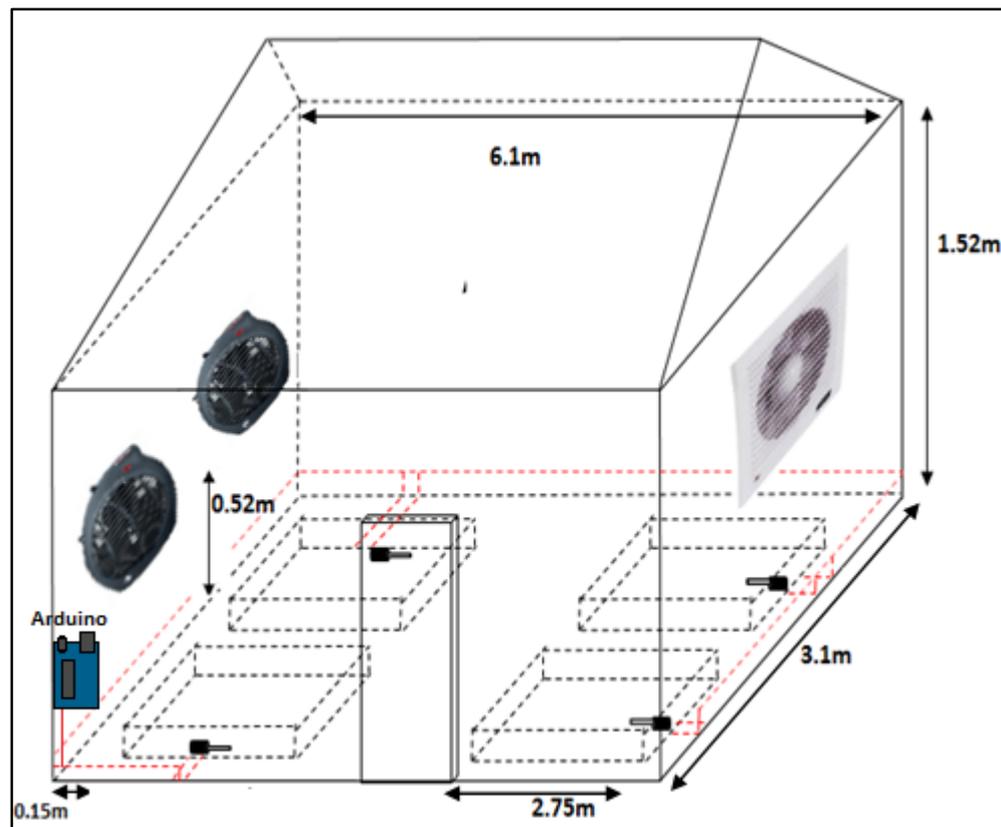


Figura 3.13 Prototipo disposición Sensores y Actuadores

La Figura 3.13 muestra el prototipo de disposición de los sensores y actuadores en el cual los sensores son ubicados de manera equidistante y en las superficies de las parcelas (ya que estos son resistentes a la humedad y al agua). Los calefactores estarán dispuestos a una altura intermedia (0.52m del piso), de esta manera se podrá distribuir de manera uniforme el aire caliente. Luego se libera éste por intermedio del extractor ubicado también a la misma altura de los calefactores. Si se quiere calentar el sistema entrarán en funcionamiento los dos calefactores con una potencia adecuada (alta al inicio) para elevar la temperatura y se mantendrá con una potencia mínima el extractor. En caso se quiera enfriar el sistema se tendrá una lógica inversa a lo explicado anteriormente; es decir, el extractor empleará una mayor potencia de remoción de aire caliente en comparación a la potencia entregada por los calefactores. El flujo de aire será de izquierda a derecha. Adicionalmente se añadirá a los sensores unos conductos por donde irán las conexiones (líneas rojas) hacia el microcontrolador ubicado en la frontal izquierda. Finalmente se dispone de una puerta ubicada en la parte frontal media que permitirá el ingreso de las personas.

3.8 Diseño del Sistema de Alimentación de Energía por Paneles Fotovoltaicos

Debido al evidente déficit del servicio de energía eléctrica en la zona de estudio (Anexos del documento), es necesario el uso de energías renovables en la ciudad de Abelardo Pardo Lezameta. Esto implica la aplicación de una fuente alternativa, se propone por esta razón, el empleo de la energía solar mediante el uso de paneles fotovoltaicos.

3.8.1 Energías Renovables

Actualmente existe la alternativa de aprovechar los rayos solares para la producción de electricidad renovable, esto es posible mediante un sistema integral de paneles solares fotovoltaicos los cuales captan la energía del sol y la convierten en electricidad [20].

3.8.2 Dimensionamiento de los Elementos del Sistema Fotovoltaico

Un sistema completo para el uso de energía solar, está compuesto de los siguientes elementos (mostrados en la Figura 3.14):

- Paneles Solares
- Baterías
- Controlador-Regulador de Carga
- Inversor-Cargador

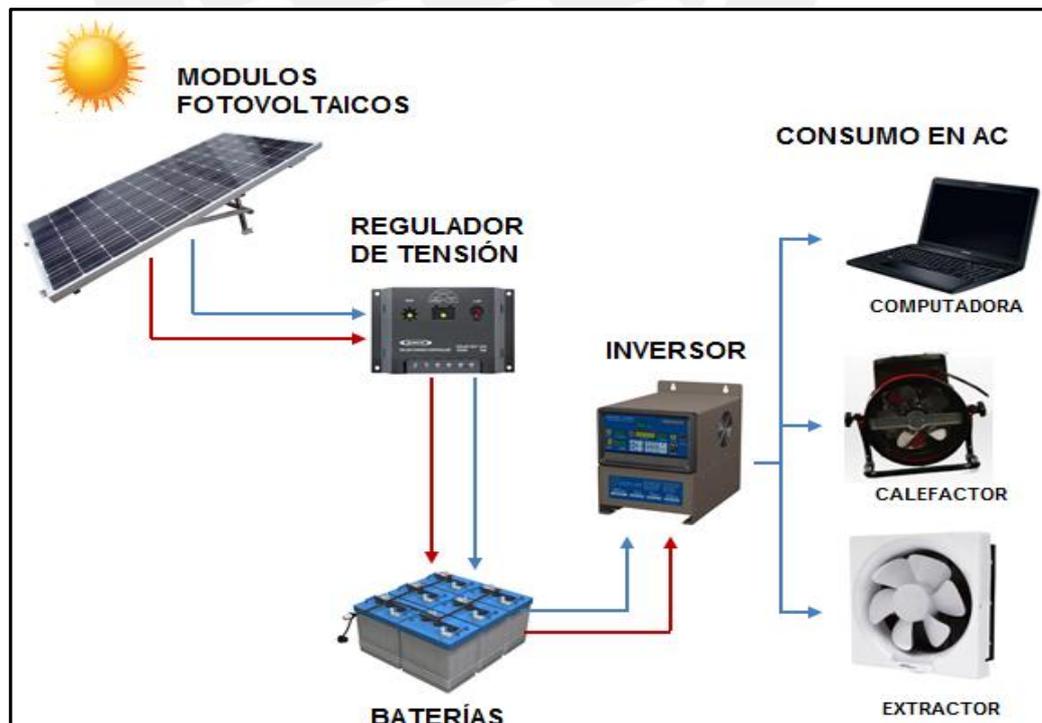


Figura 3.14 Elementos del Sistema Fotovoltaico

3.8.2.1 Dimensionamiento de los Paneles Solares

Se ha optado por un sistema de actuación alimentado desde paneles solares aprovechando la gran incidencia de radiación solar en la localidad (Pardo Lezameta).

Para ello se requirió ubicar geográficamente la zona del invernadero utilizando la herramienta web Earthtools [21]. Ver Figura 3.15.



Figura 3.15 Ubicación Geográfica de Pardo Lezameta [21].

La ubicación geográfica de Abelardo Pardo Lezameta, Bolognesi Ancash es:

Altitud: 2204 msnm
 Latitud: 10.2991° Sur
 Longitud: 77.1508° Oeste

Para la determinación del índice de radiación de la zona donde está ubicado el invernadero se utilizó una herramienta proporcionada por la NASA Atmospheric Data Center [22], que permite calcular la incidencia solar en cualquier parte del planeta con solo colocar las coordenadas de latitud y longitud (halladas anteriormente).

Se aprecia en la Tabla 3.16 que el nivel promedio de radiación solar en todo el año es de 5.75 kW/m²/d. Sin embargo, se seleccionará el mes que tenga el menor valor de irradiación, el cual ocurre en el mes de junio con un valor de 4.09 kWh/m²/d.

Tabla 3.16 Datos Meteorológicos en la zona de Invernadero [22]

Month	Air temperature	Relative humidity	Daily solar radiation - horizontal	Atmospheric pressure
	°C	%	kWh/m ² /d	kPa
January	16.9	75.1%	6.61	80.9
February	17.4	74.2%	6.58	80.9
March	17.9	70.7%	6.73	80.9
April	18.9	59.0%	6.18	80.9
May	18.6	48.0%	5.15	80.9
June	17.5	42.9%	4.09	81.0
July	17.1	37.9%	4.17	81.0
August	18.1	35.4%	4.57	81.0
September	19.2	37.9%	5.36	80.9
October	19.7	42.6%	6.08	80.9
November	19.1	50.4%	6.61	80.8
December	18.1	63.1%	6.84	80.9
Annual	18.2	53.1%	5.75	80.9

Measured at (m)

Una vez obtenido el nivel de radiación solar de la zona, dimensionamos el panel en función de su potencia y determinamos la cantidad necesaria a emplearse.

Para dimensionar el panel solar se requiere de dos elementos: la potencia activa consumida durante el día y el mínimo índice de radiación solar observado durante el año. El cálculo se muestra en la Tabla 3.17

Tabla3.17 Consumo de Potencia Activa en Invernadero [Elaboración Propia]

Equipo	Cantidad	Potencia (w)	Horas de Uso (hr)	Energía (Wh-día)
Calefactor	2	4000	2(*)	8000
Extractor	1	28	2(*)	56
Laptop	1	120	1	120
TOTAL				8176

(*)Las horas de uso de los equipos de actuación fueron obtenidas por medio de un cálculo aproximado del flujo o caudal entregado por metro cúbico en los equipos de actuación (Anexos del documento).

Empleando la fórmula para el dimensionamiento de paneles solares [23],

Tenemos:

$$Ar = 1200 * \frac{Ed}{Id} \tag{3.5.2.1}$$

Dónde:

Ar=Tamaño de Panel Fotovoltaico [Wp]

Ed=Demanda de Electricidad [Kwh/día]

Id= Irradiación Solar [Kwh/m²/día]

Entonces:

Dimensionamiento Panel Solar		
Ed	Id	Ar(Wp)
8.176	4.09	2398.83

Seleccionaremos la cantidad de módulos de paneles solares de acuerdo al catálogo del distribuidor Heliplast (Anexos del documento). Analizando la hoja de datos del fabricante de paneles solares, el menor gasto para cubrir la demanda de Wps necesitado sería efectivo adquiriendo 10 módulos de la marca KOMAES de 250Wp de potencia (Ver Tabla 3.18). Los módulos pueden apreciarse en la Figura 3.16

Tabla 3.18 Módulos de Paneles Solares (Anexos del documento)

Marca	Wp	Precio	Cantidad Necesaria	Precio a pagar (\$)
KOMAES	250	\$ 198.00	10	\$ 1,980.00
KOMAES	100	\$ 89.00	24	\$ 2,134.96
KOMAES	50	\$ 45.00	48	\$ 2,158.94
KOMAES	85	\$ 75.00	28.2	\$ 2,116.61
KOMAES	130	\$ 116.00	18.5	\$ 2,140.49
SOLARWORLD	145	\$ 168.00	16.5	\$ 2,779.33
SOLARWORLD	85	\$ 102.00	28.2	\$ 2,878.59
KOMAES	20	\$ 29.00	119.9	\$ 3,478.30
SOLARWORLD	50	\$ 88.00	48	\$ 4,221.93
KOMAES	10	\$ 18.00	239.9	\$ 4,317.89



Figura 3.16 Panel Solar KOMAES de 85 W [Anexos del documento]

3.8.2.2 Cálculo del Número y Capacidad de las Baterías

Para dimensionar el módulo de almacenamiento se utilizará la siguiente fórmula:

$$\text{Tamaño} = (\text{AUT} \times \text{Ed}) / (\text{REND} \times \text{DESC}) \quad (3.2)$$

El cálculo de la potencia que suministrará el banco de baterías se contará con la siguiente información.

AUT (Autonomía-días sin brillo solar) = 2 (*)

Ed = 2.39 kWh/día

REND (eficiencia de la batería) = 80%

DESC (descarga de la batería) = 50%

(*) Para fines prácticos se asumirá lo mínimo recomendable, sin embargo estará condicionado al conocimiento de los días sin brillo solar de la zona. Por lo tanto:

$$\text{Tamaño de la batería} = (2 \times 2.39) / (0.8 \times 0.5)$$

$$\text{Tamaño de la batería} = 11.950 \text{ kWh} = 11950 \text{ Wh}$$

Para el cálculo del número de baterías se contará con la siguiente información:

$$\text{Número de Baterías} = \text{Tamaño} / (\text{Ah} \times \text{V})$$

Dado que la potencia es menor a 15000 watt se seleccionará el voltaje de la batería a 12 voltios. Así que, seleccionaremos las baterías de 12 V, 100 AH. Las baterías pueden apreciarse en la Figura 3.17

$$\text{Número de Baterías} = 11950 \text{ Wh} / 100 \times 12 = 10$$

$$\text{Número de Baterías} = 10$$



Figura 3.17 Batería 100A-h (Anexos del documento)

3.8.2.3 Cálculo de la Capacidad del Controlador

Para calcular la capacidad del controlador será necesario ver la ficha técnica del módulo de panel solar (Anexos del documento) y buscar el valor de la corriente de corto circuito (I_{cc}). Según ficha técnica indica un valor de 8.5 A. Al disponer nuestro sistema de 10 módulos fotovoltaicos, la corriente de cortocircuito total será de 85 A, se concluye entonces que necesitaremos un controlador-regulador de esa magnitud

El controlador deberá tener una capacidad de 85A (Amperios). Según catálogo de la marca Victron Blue solar MPPT (Anexos del documento) elegiremos 1 regulador de 85A. Ver Figura 3.18.



Figura 3.18 Controlador-Regulador Victron Blue Solar (Anexos del documento)

3.8.2.4 Cálculo de la Capacidad del Inversor

La potencia del inversor de CC/AC la tendremos que elegir en función de la suma de todas las potencias nominales de los equipos consumidores, multiplicando este valor por el coeficiente de simultaneidad de uso de estos (normalmente valores que van de 0,5-0,7). En nuestro caso la potencia total estimada es de 8176 W (según Tabla 3.17). Por lo tanto, se dispondrán de 2 inversores que serán utilizados por cada calefactor La potencia del inversor podrá cubrir la demanda requerida por el extractor y la laptop (ambos de baja potencia)

Potencia convertidor para cada calefactor= $4000 * 0,7 = 2800 \text{ W}$

Potencia convertidor extractor y laptop= $176*0.7=123.2 \text{ W}$

Por lo tanto se elegirán dos convertidores de 3KW, que cubrirán la demanda de potencia.



Figura 3.19 Controlador Regulador de Carga (Anexos del documento)

3.9 Interfaz de Usuario

3.9.1 Arduino con LabView.

Para lograr la monitorización de datos en tiempo real de la temperatura se empleó una tarjeta de Arduino en la cual se instaló un software que permite que ésta trabaje como tarjeta de adquisición. Al emplear este método no se tiene una alta frecuencia de transmisión de datos (200 Hz); sin embargo, la variación de temperatura involucra un proceso lento, por lo tanto, es justificable el empleo de esta tarjeta para el registro de datos y una reducción notoria en relación al precio que tendría el uso de una tarjeta de adquisición de datos comercial (National Instruments). Las características más importantes de esta placa se aprecian en la Figura 3.20



[+] Ampliar Imagen

- Fácil acceso para DIO Arduino, AI, PWM, I2C y SPI desde LabVIEW
- Boceto del motor de E/S para cargar en Arduino
- Ejemplos para tareas básicas y sensores
- Inalámbricos con Bluetooth o XBee
- Velocidades: USB enlazada (200 Hz) e inalámbrico (25 Hz)
- El boceto abierto Arduino y los VIs del juego de herramientas le ayudan a personalizar la funcionalidad

Figura 3.20 Características de la interface LabView- Arduino [Anexos del documento]

3.10 Esquema Gráfico General de Control de Temperatura del Sistema

El gráfico de la Figura 3.21 da una mayor visión de lo que es el sistema de control de temperatura a diseñarse. Consta de todas las etapas de sensado y actuación, el suministro de energía fotovoltaica, la monitorización de la temperatura y el diagrama de conexiones existente entre ellas.

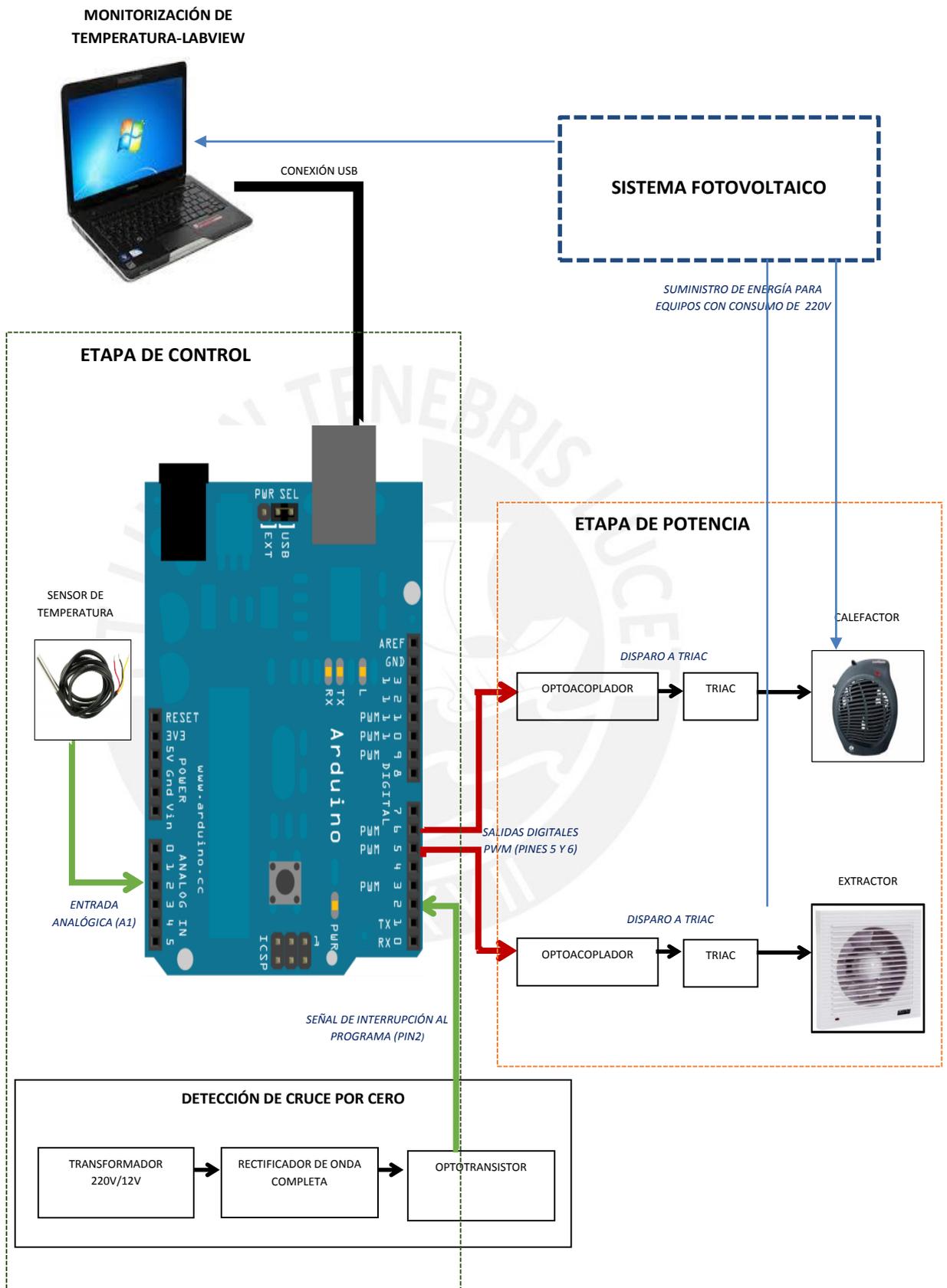


Figura 3.21 Esquema Gráfico General del control de Temperatura del Sistema [Elaboración Propia]

4 CAPITULO 4 Pruebas Finales y Comprobación de Resultados

Las pruebas finales consistieron en comprobar el diseño de la lógica de control aplicada a los actuadores y también verificar el funcionamiento de la interfaz gráfica (LabView).

4.1 Comprobación del diseño aplicado

Para la comprobación del diseño aplicado se implementó un circuito en el cual la potencia de los actuadores es dependiente de la variación de temperatura del sistema.

4.1.1 Etapa de Control

Esta etapa tiene como elemento más importante al microcontrolador (ATMEGA328) que forma parte de la placa de Arduino UNO. Se definirán las entradas y salidas de este integrado que darán control a nuestro proceso.

4.1.1.1 Entradas

4.1.1.1.1 Microcontrolador

Para la verificación del correcto funcionamiento del Microcontrolador se utilizó el monitor serial de Arduino, el cual permitió verificar que se esté entregando el correcto valor del ángulo de disparo a los TRIACS del calefactor y el ventilador. Esto se logró variando el valor otorgado por el potenciómetro conectado en la entrada. Ver Figura 4.1.

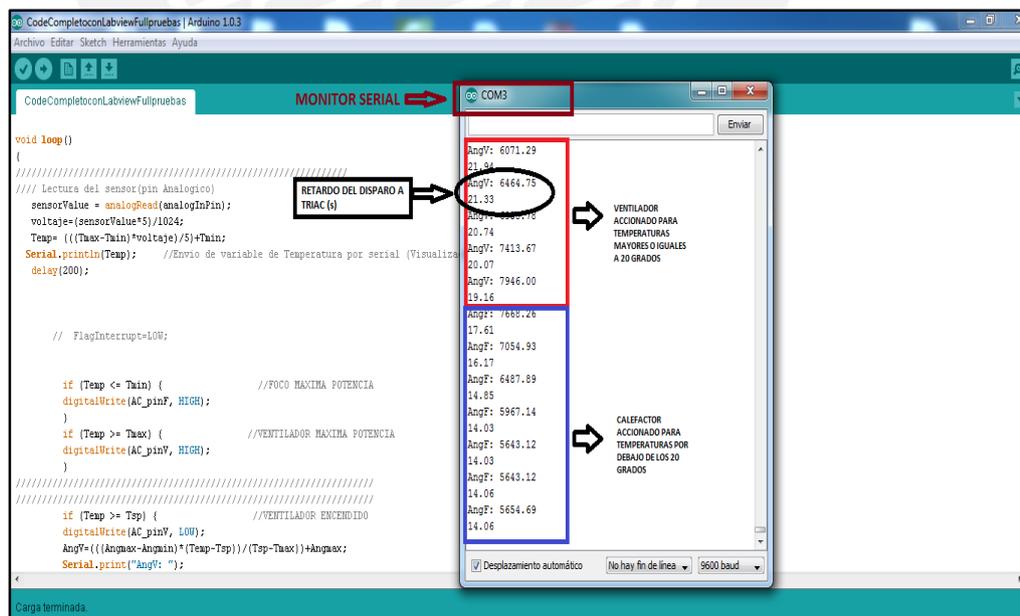


Figura 4.1 Angulo de disparo entregado por Microcontrolador

4.1.1.1.2 Circuito detector de cruce por cero

Se observa en la Figura 4.1 (osciloscopio) que la detección de cruce por cero fue ejecutada correctamente ya que se genera un pulso cada 8.33 milisegundos aproximadamente (frecuencia de 119.7 Hz). La señal de color amarillo indica el voltaje generado en la salida del puente rectificador (19.2 V de amplitud). Los pulsos de color morado representan la señal de entrada del optoacoplador 4N35 (de amplitud 3.4V), esto se da cada vez que su fotodiodo está activado (cuando variación de voltaje en el fotodiodo este en el rango de 0.8V a 1.5V).

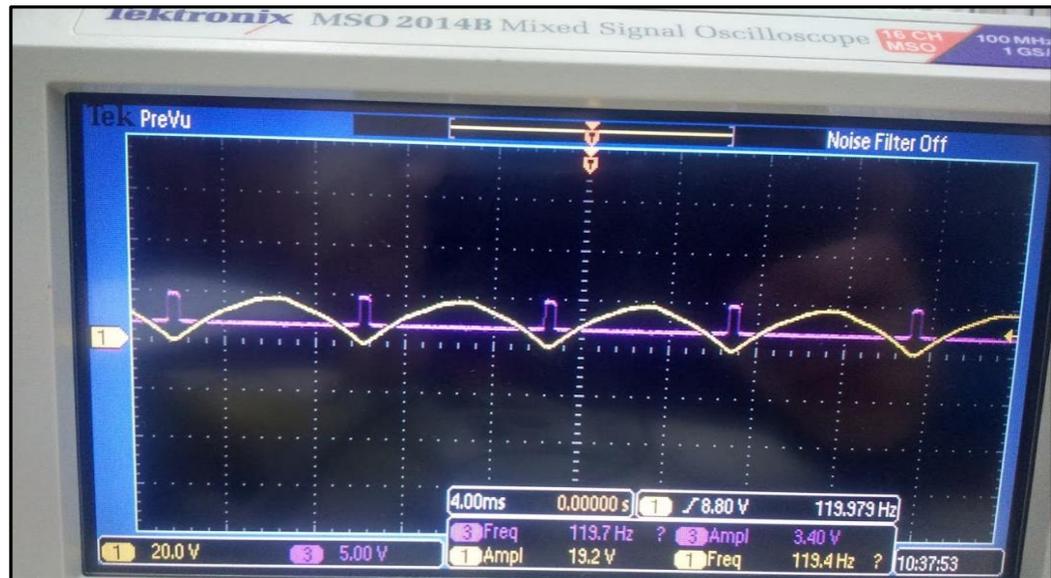


Figura 4.1 Pulsos generados por detección de cruce por cero

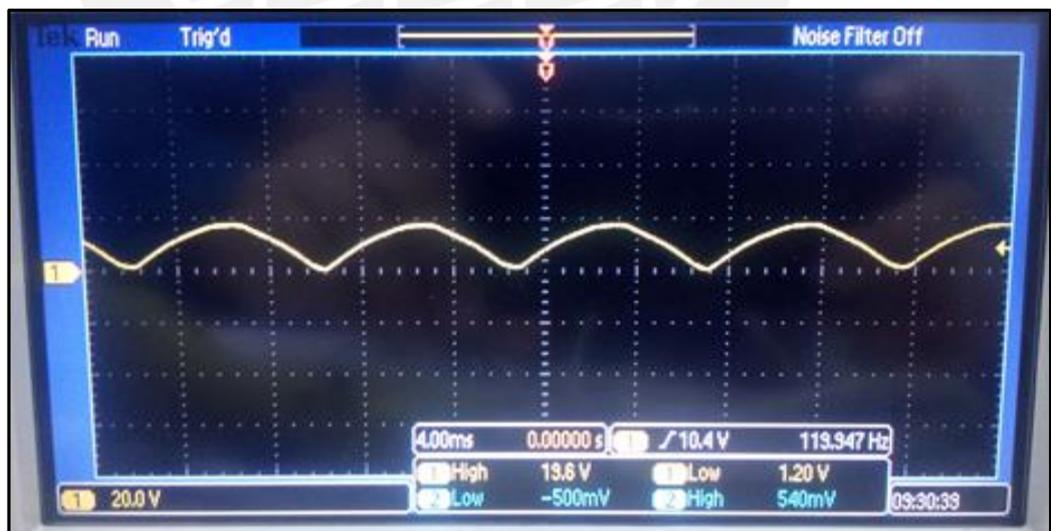


Figura 4.2 Señal generada a la salida del puente rectificador

La señal de salida del puente rectificador de onda completa es tal cual se aprecia en la Figura 4.2 y tiene como se mencionó anteriormente una amplitud de 19.6 Vrms.

4.1.1.1.3 Sensor de Temperatura

Como entrada del sistema se utilizó un potenciómetro del tipo lineal, cuyo valor fue de 10Kohm que reemplaza al sensor de temperatura digital que hemos elegido, esto con la finalidad de tener un mayor análisis de los resultados, ya que se puede apreciar con mayor facilidad los cambios en la potencia entregada a los actuadores. Los niveles de resistencia en el potenciómetro serán directamente proporcionales a las señales de voltaje entregadas en la entrada del sistema.

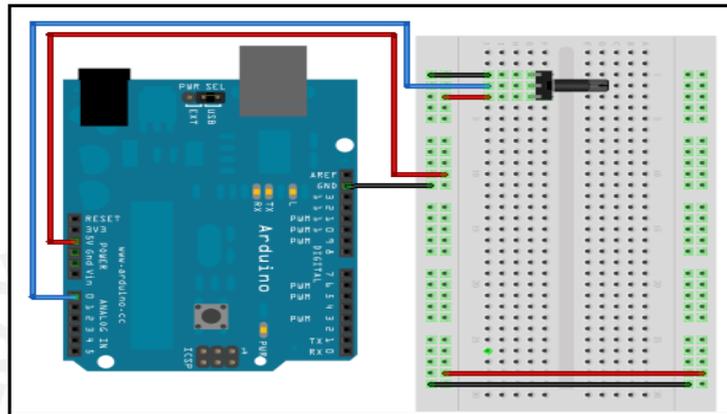


Figura 4.3 Señal de entrada por Potenciómetro de 10kohm

4.1.1.2 Salidas

La placa de Arduino posee 14 salidas digitales de las cuales se usaron solo los pines 5 y 6 que generarán pulsos que activarán a los triacs del equipo de ventilación y calefacción respectivamente.

4.1.1.2.1 Pulsos de Salida (Activación de Triac)



Figura4.4 Pulsos de activación de Triac[Elaboración Propia]

La Figura 4.4 muestra la señal interrupción representada por el pulso de color amarillo y tiene valor de 5.8V (la alimentación del Optotriac MOC3021 fue de 6V). La señal de color morado representa los disparos al TRIAC, el mismo que conducirá ya que posee una amplitud de 4V suficiente para excitar al TRIAC (según hoja técnica [Anexos del documento] éste debe superar los 2.2 V) y poder manipular el voltaje entregado a los equipos de actuación. A manera de ejemplo en la misma figura se muestra que la señal de disparo (señal morada) es generada alrededor de 5 ms después de la generación del pulso de interrupción (señal amarilla), que marca el inicio de ejecución del programa, esto asegura que se entregue a las cargas aproximadamente un 40% del voltaje nominal de línea.

4.1.2 Etapa de Potencia

Para las pruebas de la etapa de potencia se reemplazaron los equipos de actuación. Para la calefacción del sistema se utilizó un foco de 60W y para ventilar el sistema o remover el aire caliente se usó un ventilador de 0.08 A que reemplazará al extractor de aire. Para ambos casos se utilizó un voltaje de línea monofásica de 220Vac.

Conectando un enchufe a la red de alimentación de energía comprobamos como el foco varia su intensidad luminosa dependiendo del valor establecido por el potenciómetro de entrada (Como prueba se muestra el ejemplo de la Figura 4.7)

A continuación se mostrará un ejemplo de comprobación de resultados para verificar el voltaje y la potencia entregada para un ángulo de disparo de 75 grados. (Ver Figuras 4.5 y 4.6)

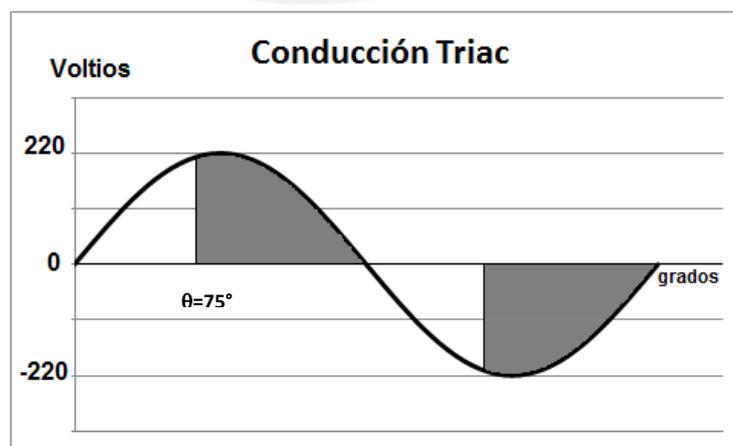


Figura 4.5 Voltaje entregado a la carga con ángulo de 75 grados. [Elaboración Propia]

Cálculo Potencia Consumida

$$P = [Vm^2 \times (\pi - \theta + 0.5\text{sen}2\theta)] / (2\pi R)$$

$$P = \frac{V^2}{R}$$

$$R = \frac{V^2}{P}$$

Donde:

P= Potencia Consumida

R=Resistencia Equivalente en la carga

Tabla 4.1 Cuadro Relación Ángulo-Potencia Consumida [Elaboración Propia]

Angulo de Disparo (ms)	Angulo de Disparo(grados sexagesimales)	Voltaje de Carga(V)	Potencia Consumida(W)
0.00	0	220.00	3000.00
0.23	5	213.89	2999.58
0.46	10	207.78	2996.64
0.69	15	201.67	2988.73
0.93	20	195.56	2973.58
1.16	25	189.44	2949.09
1.39	30	183.33	2913.50
1.62	35	177.22	2865.34
1.85	40	171.11	2803.54
2.08	45	165.00	2727.46
2.31	50	158.89	2636.88
2.55	55	152.78	2532.00
2.78	60	146.67	2413.50
3.01	65	140.56	2282.43
3.24	70	137.44	2140.24
3.52	75	132.33	1990.73
3.70	80	122.22	1829.97
3.93	85	116.11	1666.24
4.17	90	110.00	1500.00
4.40	95	103.89	1333.76
4.63	100	97.78	1170.03
4.86	105	91.67	1011.27
5.09	110	85.56	859.76
5.32	115	79.44	717.57
5.55	120	73.33	586.50
5.78	125	67.22	468.00
6.02	130	61.11	363.12

6.25	135	55.00	272.54
6.48	140	48.89	196.46
6.71	145	42.78	134.66
6.94	150	36.67	86.50
7.17	155	30.56	50.91
7.40	160	24.44	26.42
7.64	165	18.33	11.27
7.87	170	12.22	3.36
8.10	175	6.11	0.42
8.33	180	220.00	3000.00

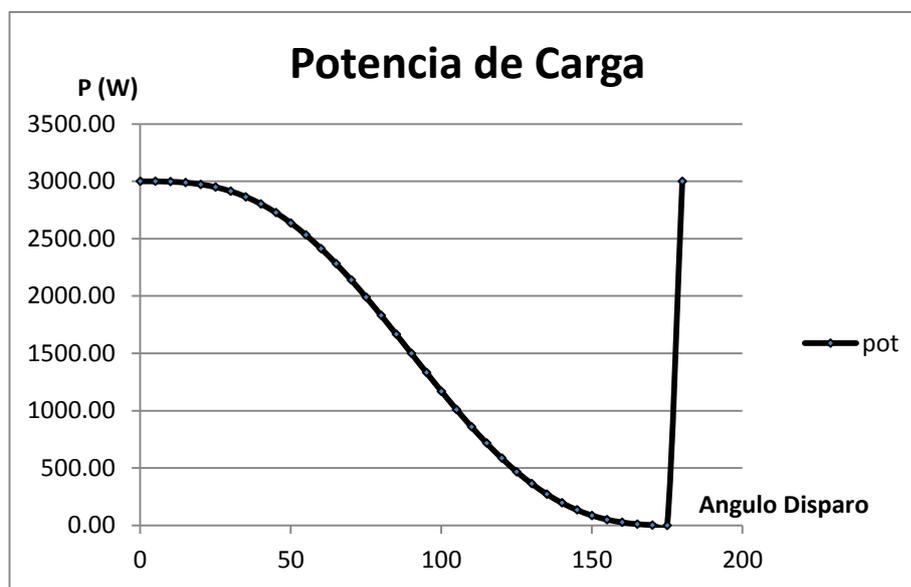


Figura 4.6 Potencia de Carga entregada [Elaboración Propia]

Teóricamente, luego de la aplicación de las fórmulas vistas en el cuadro (Tabla 4.1), para un ángulo de disparo de 75 grados corresponde retraso en el disparo de 3.47 ms aproximadamente (Ver Figura 4.7). Luego se verificó que para ese determinado ángulo, se entregó a la carga 142.5V (Ver Figura 4.8) aproximadamente 10 V más que el valor esperado teóricamente (132.3 V) (esto es posiblemente debido al error generado en el potenciómetro lineal).



Figura 4.7 Voltaje de Carga Entregado para Ángulo de 3.57ms. [Elaboración Propia]

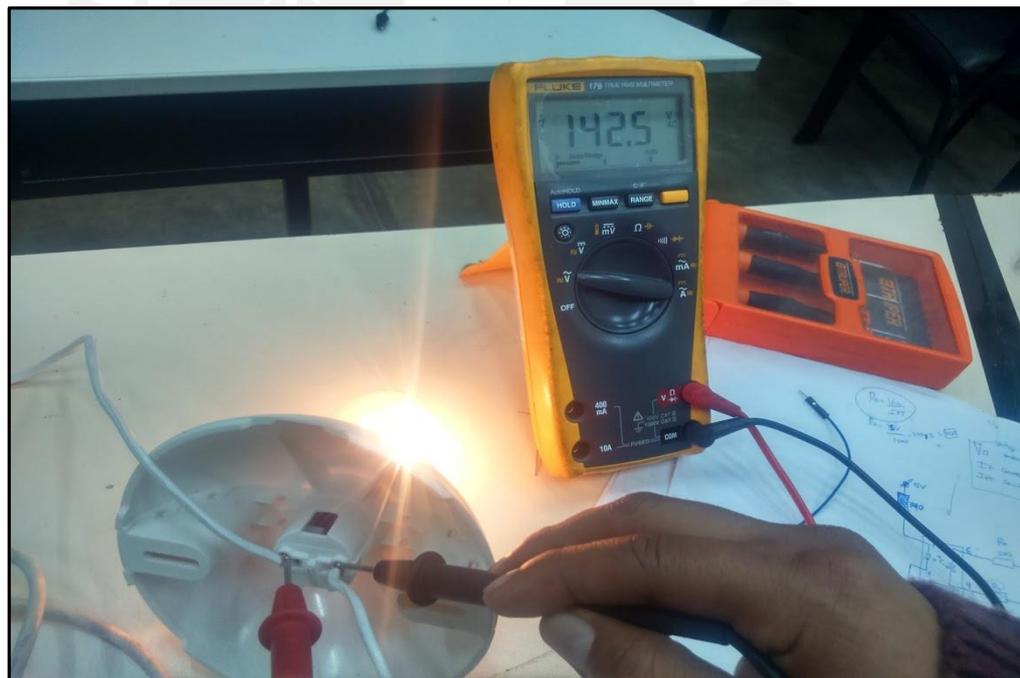


Figura 4.8 Verificación del voltaje (con multímetro) entregado a la carga. [Elaboración Propia]

4.1.3 Prototipo Implementado

Se diseñó e implementó una tarjeta de control para regular la potencia de los actuadores, el cual es mostrado en las Figuras 4.9.a y 4.9.b. Las pruebas mencionadas en el apéndice anterior fueron ejecutadas por esta placa, la misma que muestra su esquemático en la Figura 3.13. El diagrama de pistas

del circuito se realizó con el software Eagle y se muestra en los anexos del documento.



Figura 4.8.a Tarjeta para el control de potencia de los actuadores [Elaboración Propia]



Figura 4.8.b Tarjeta para el control de potencia de los actuadores [Elaboración Propia]

4.2 Verificación de la Interfaz Gráfica

Las pruebas se realizaron variando la señal de entrada por intermedio de un potenciómetro (simulando la señal entregada por el sensor de temperatura).

El panel frontal de la interfaz gráfica de LabView (Figura 4.9) muestra una descripción en tiempo real de la variación de la temperatura. Las entradas de la interfaz son la velocidad de transmisión de 9600 baudios (igual velocidad de transmisión de datos que el Arduino), el puerto serial y la temperatura de Set Point (temperatura ideal). Las señales de salida son la visualización gráfica del registro de temperatura y Set Point, el valor de la temperatura actual y la fecha y hora de registro de medición.

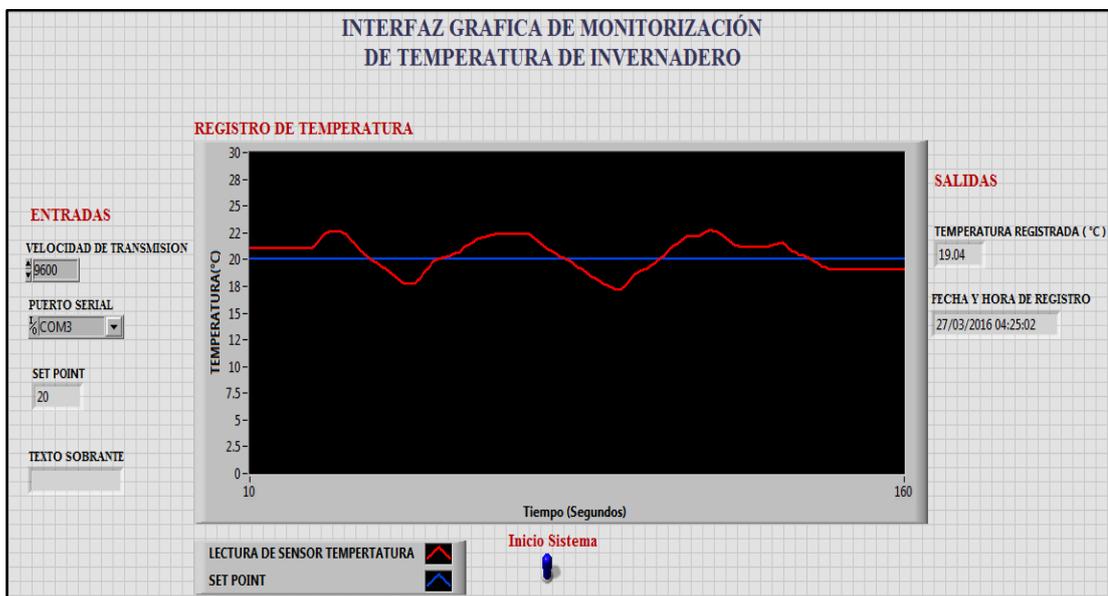


Figura 4.9 Interfaz Gráfica de Monitorización de Temperatura [Elaboración Propia]

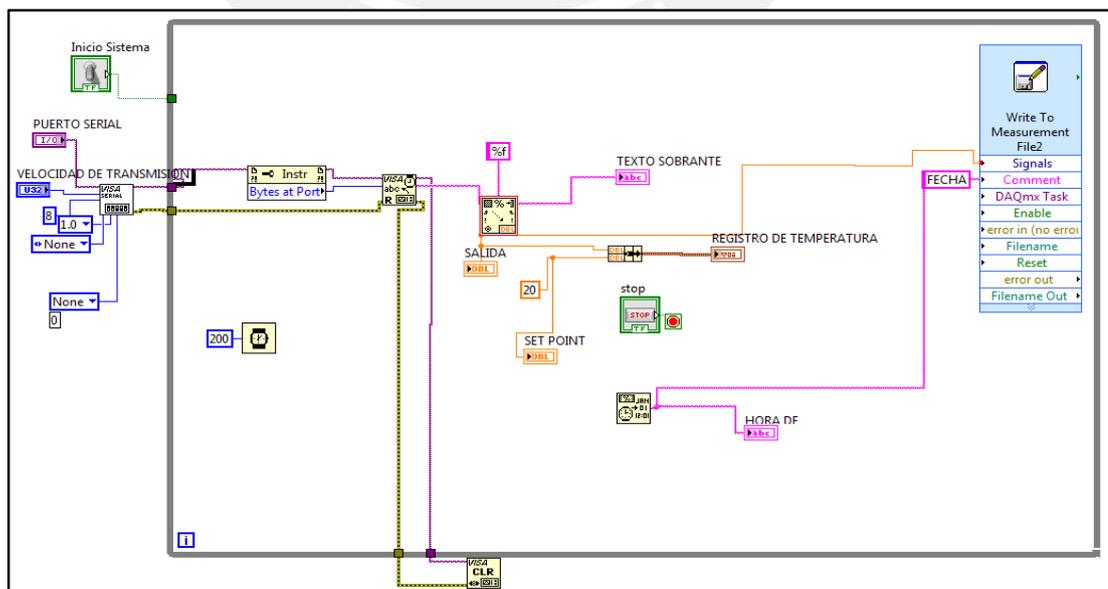


Figura 4.10 Diagrama de Bloques en LabView del proceso [Elaboración Propia]

4.3 Presupuesto de Implementación

Tabla 4.3 Presupuesto de Implementación de Invernadero [Elaboración Propia]

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN	MODELO/ MARCA	PRECIO UNITARIO(S/.)	CANTIDAD	TOTAL(S/.)
Elementos de Control					S/. 152.15
ARDUINO	ARDUINO UNO	ARDUINO	S/. 90.00	1	S/. 90.00
OPTOACOPLADOR	AISLADOR OPTICO	4N35	S/. 1.20	2	S/. 2.40
PUENTE RECTIFICADOR	PUENTE RECTIFICADOR 4 Amp	GBU4	S/. 1.50	1	S/. 1.50
TRANSFORMADOR	220VAC/12VAC	-	S/. 20.00	1	S/. 20.00
RESISTENCIA VARIOS	1/2W	-	S/. 0.05	25	S/. 1.25
JUMPER	PINES- ARDUINO	-	S/. 5.00	5	S/. 25.00
BORNERAS	2PINES - 3.5mm	-	S/. 2.00	6	S/. 12.00
Elementos de Potencia					S/. 252.30
EXTRACTOR	28W	ACQUA	S/. 65.90	1	S/. 65.90
CALEFACTOR	Termoventilado r	Fissh MGF 1267	S/. 89.00	2	S/. 178.00
TRIAC	8A RMS, 70A PICO	TIC225	S/. 2.70	2	S/. 5.40
OPTOAISLADOR FOTOTRIAC	400V PICO	MOC3021	S/. 1.50	2	S/. 3.00
					S/ 14,608.00
Sistema Fotovoltaico					
PANEL SOLAR	250Wp	KOMAES	S/. 648.00	10	S/. 6,480.00
BATERIAS	100 Axh	MEGATRON	S/. 321.20	10	S/. 3,212.00
REGULADOR	12/24/36/48V 85 A	VICTRON	S/. 2,202.00	1	S/. 2,202.00
INVERSOR	3KW-50/60Hz	SCHNEIDER	S/. 2,714.00	1	S/. 2,714.00
Costos de Ingeniería					S/. 5,000.00
INFRAESTRUCTUR A	Material de Construcción	-	S/. 1,000.00	1	S/. 1,000.00
INSTALACIÓN DE EQUIPOS	Paneles solares, sensores y actuadores	-	S/. 500.00	1	S/. 500.00
TUBERIAS DE CONDUCCION	De ¼" (control)y de ½"(potencia)	-	S/. 500.00	1	S/. 500.00
TRABAJO DEL INGENIERO PARA LA INSTALACIÓN Y SUPERVISIÓN	Pago único		S/. 3,000.00	1	S/. 3,000.00
				TOTAL	S/ 20,012.45

CONCLUSIONES

- 1) Se seleccionó un algoritmo de control adecuado para el sistema planteado (control de potencia por ángulo de disparo) ya que se establece el control de la temperatura regulando la potencia entregada a los actuadores y en consecuencia, se tiene una considerable disminución del consumo de energía eléctrica.
- 2) La lógica del funcionamiento del algoritmo se implementó en la placa de Arduino que integra las etapas de control y potencia del circuito. Asimismo, se verificó en el monitor serial de Arduino que se entregue el correcto ángulo de disparo hacia los Triacs y también se comprobó que la lectura del sensor de temperatura sea enviada al software de Labview.
- 3) Se logró realizar la interfaz de usuario en el software LabView y se verificó en el panel frontal la variación en tiempo real de la temperatura. Adicionalmente el registro e historial de esta variable se almacenó en un archivo de la computadora para un posterior uso.
- 4) Se diseñaron las etapas de sensado y actuación, para ello, se implementó una tarjeta con los valores de los elementos involucrados en el diseño y se comprobó el acoplamiento entre la etapa de control y potencia por las pruebas simuladas y comprobación de resultados presentes en el Capítulo 4.
- 5) Se logró dimensionar los elementos requeridos para implementar un sistema fotovoltaico, esto no solo permitirá que se utilice la energía necesaria por parte de los equipos internos al invernadero, sino que también su uso no generará sustancias nocivas para la supervivencia de los seres vivos.

RECOMENDACIONES

- 1) Si desea hacer más interactivo el sistema de control propuesto, se puede variar el código fuente para que el valor de referencia o Set Point pueda ser ingresado por el usuario a través de un teclado matricial, de una PC o un Smartphone vía bluetooth.
- 2) El control de la temperatura se puede también ejecutar directamente desde el software LabView que permite la comunicación serial entre un microcontrolador y la PC (ejecución de la función VISA de LabView), para que de esta manera el operario pueda modificar las ganancias del controlador en tiempo real.
- 3) Si se desea monitorear la temperatura o manipular los elementos de actuación de manera remota puede implementarse un sistema SCADA y por medio de comunicación por red se pueda ejecutar el control (cuando el área de control se encuentre alejado de la planta del proceso).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Red Hidroponía. "Producción Hidropónica en Invernaderos". Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral, Departamento de Biología. Universidad Nacional Agraria La Molina. Boletín Informativo Número 12. Lima, 2001.
- [2] Características de los Suelos Agrícolas. Consultado [05/05/13] <http://www.jardinyplantas.com>.
- [3] Jensen, M. & Malter, A..Protected Agriculture. World Bank Technical. Paper No 253. Washington. 157 p. Shive J.W. & Robbins,W.R. 1937. Methods of Growing Plants in Solution and Sand Cultures. New Jersey. Boletín 636, 1995.
- [4] Ortiz Suarez, Ismael. Estudio Técnico-Económico para la Producción de Jitomate Saladett Bajo Condiciones de Invernadero Hidropónico. Tesis para obtener el título de Ingeniero Agroindustrial. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Acaxochitlan, 2007
- [5] Borja Cazales, David. Invernadero Inteligente. Tesis para obtener el título de Técnico en Sistemas Digitales. México D.F.: Instituto Politécnico Nacional CECyT No1 GONZALO VAZQUEZ VELA. 2010
- [6] Rodríguez Díaz, Francisco. Modelado y Control Jerárquico de Crecimiento de Cultivos en Invernadero. Tesis doctoral para obtener el Grado de Doctor en Informática. Almería: Universidad de Almería. Departamento de Lenguajes y Computación. Escuela Politécnica Superior, 2002.
- [7] Åström, K.J.; 1997; Tuning and adaptation. Curso Internacional Nuevas Tendencias en Sistemas y Control. Fundación Ramón Areces. Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. Sevilla, España: pp. 19-36.

- [8] Camacho, E.F.; Rubio, F.R.; Hugues, F.M. Self-Tuning Control of a Solar Power Plant with a Distributed Collector Field. IEEE Control Systems. Magazine, vol. april, pp. 72-78. 1992.
- [9] Creus, A. Instrumentación Industrial; Ed. Marcombo Boixareu Editores; Barcelona; España; 732 pp. 1993.
- [10] Ministerio de Agricultura- Fichas Técnicas.
[Consultado 02/09/2013].
<http://www.minag.gob.pe/portal/sector-agrario/agricola>
- [11] Hoja Técnica LM35. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors.[Consultado 05/07/2013]
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>
- [12] Material del Curso de Maestría de Sensores y Actuadores. Escuela de Posgrado. Pontificia Universidad Católica del Peru.2013
- [13] Cables Calefactores Paralelos. [Consultado 05/05/2013]
http://www.elementoscalefactores.com/pdf/catalogos/cables_calefactores_paralelos.pdf
- [14] Espacio Calentador Ventilador de Ahorro [Consultado 14/09/2013]
<http://www.kampa.es/Products/termostato-calentadores-de-ptc-C28/Espacio-calentador-de-ventilador-de-ahorro-P161.htm>
- [15] Fullchance Heating Film Factory. PTC Heat Conductors
<http://www.fullchance.com/html.aspx?id=318>
[Consultado 01/09/2015].
- [16] Magefesa. Termoventiladores.
http://www.emagefesa.com/index.php?option=com_virtuemart&page=shop.browse&category_id=60&Itemid=3&lang=es
[Consultado 10/09/2015].

- [17] Extractor Karson
<http://www.sodimac.com.pe/sodimac-pe/category/cat30020/Extractores-de-Ban>
[Consultado 14/06/2013].
- [18] Making an Investment in Heating for your greenhouse
[Consultado 14/09/2013].
<http://www.sherrysgreenhouse.com/oldsite/GHheating.html>.
- [19] Diana del Rocio Casa Rojas, Ana Marcela Regalado Alvarado
Módulo Didáctico para Control Electrónico de Potencia del Triac
Proyecto previo a la Obtención del Título de Tecnólogo Especialista en
Electrónica y Telecomunicaciones
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL. Escuela de Formación Tecnológica
Quito, 27 de Agosto del 2007
- [20] TAU Solar - Grupo S.A.G. - Energía Solar Fotovoltaica y Medio ambiente.
[Consultado 06/09/2013]
<http://www.tausolar.com>
- [21] EARTHTOOLS
[Consultado 02/08/2013]
<http://www.earthtools.org/>
- [22] NASA Atmospheric Data Center.
[Consultado 01/09/2013]
<https://eosweb.larc.nasa.gov/>
- [23] Proyecto de Electrificación Solar. Implementación de un sistema de
electrificación solar en casa hacienda en Cañete.
Departamento Lima. Provincia Cañete, distrito Nuevo Imperial.
[Consultado 01/09/2013]
<http://www.electricidadgratuita.com/>

ANEXOS

1. Hoja de datos del sensor de Temperatura DS18B20.
2. Hoja de datos optoacoplador 4N35.
3. Hoja de datos Optotriac MOC3021.
4. Hoja de datos de Triac TIC225.
5. Cálculo del Derrateo por Altura.
6. Hoja de datos del Arduino Uno.
7. Cálculo de Resistencias de Circuito Implementado.
8. Código del Programa (en Arduino y Labview).
9. Déficit de Energía en Bolognesi.
10. Componentes del Sistema Fotovoltaico.
11. Cálculo de horas de funcionamiento de los actuadores.
12. Diagrama de Pistas del circuito prototipo implementado.

