

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

**INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**Sistema de Control para Unidad de Enfriamiento Activado con
Energía Solar-Biomasa**

T E S I S

Para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería

Presenta:

Adolfo Heriberto Ruelas Puente

Director :

Dr. Nicolás Velázquez Limón

Codirector:

Dr. David Isaías Rosas Almeida

Mexicali, B.C. México

Agosto 2010

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis padres María de Lourdes Puente Vasques y Emelanio Ruelas Valenzuela, por darme la vida y apoyarme incondicionalmente hasta en los momentos más difíciles.

A mis familiares y amigos por su muestra de afecto, ánimos y confianza en mi, para lograr subir un escalón más en mi carrera profesional.

Desarrollo de un sistema de control para una unidad de enfriamiento activada con energía solar-biomasa

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo teórico y experimental de un sistema de control para unidad de enfriamiento activada con energía solar y biogas, el objetivo es automatizar el servicio de acondicionamiento térmico de espacios de forma segura y consumiendo el mínimo de energía.

En el proyecto se contempla la propuesta de un circuito hidráulico que permite operar la unidad de enfriamiento en tres diferentes formas: 1. Con energía solar, 2. Con el sistema de almacenamiento de frío y 3. Con biogas. El control del flujo de agua que pasa a través de la manejadora de aire, se hace por medio de una válvula de 3 vías, con el fin de mantener la temperatura de confort en el espacio a climatizar. El estudio teórico fue realizado mediante la simulación dinámica del sistema de enfriamiento en el entorno de TRNSYS v.16, que permitió evaluar las estrategias de control: *Todo-Nada*, *If-Else*, Retroalimentación Iterativa y el clásico proporcional, integral y derivativo, para seleccionar el controlador con mejor desempeño.

En el campo de colectores solares se plantea un sistema de control para el seguimiento solar de un cilindro parabólico, el controlador se basa en un sistema a lazo cerrado mediante sensores fotoeléctricos, que incluye un innovador cálculo de histéresis de acuerdo a la intensidad de radiación.

Para efectuar el estudio experimental, se desarrolló el controlador del sistema de aire acondicionado solar y el controlador del sistema de seguimiento solar, además de la construcción e instrumentación de la configuración hidráulica propuesta y la instalación del sistema de climatización solar .

El controlador para el seguimiento solar no presentó ningún problema durante el tiempo de operación. El cálculo de las bandas del controlador de histéresis permitió un seguimiento continuo sin verse afectado por nublados o variación en la intensidad de radiación.

El estudio experimental del controlador del sistema de aire acondicionado solar aplicado en el sistema de climatización solar, demostró que fue capaz de mantener temperatura del espacio a climatizar en el punto de consigna. Además que la configuración del sistema hidráulico permitió satisfacer los objetivos de control establecidos, para operar el sistema en los diferentes modos de operación consumiendo el mínimo de energía.

Las principales contribuciones del proyecto, fue el diseño del controlador del sistema de aire acondicionado solar y del controlador del sistema de seguimiento solar, además de su implementación en un microcontrolador de bajo costo de 32 bits, empotrado en circuito impreso para conseguir un sistema de control consistente que pueda operar de forma automática, segura y continua.

Development of a control of system for a unit of cooling activated with solar energy-biomass

Abstract

This paper presents theoretical and experimental development of a control system for active cooling unit on solar energy and biogas, the goal is to automate the thermal conditioning service spaces safely and consuming as little energy.

The project proposal provides for a hydraulic circuit that allows the cooling unit operate in three different ways: 1. With solar energy, 2. With the cold storage system and 3. With biogas. The control flow of water passing through the air handler is done through a 3-way valve, in order to maintain the temperature of comfort in space to be cooled. The theoretical study was performed using a dynamic simulation of the cooling system in the TRNSYS environment v.16, which allowed the evaluation of control strategies: On-Off, If-Else, feedback iterative and the classical proportional, integral and derivative for select the best performing controller.

The solar collector field presents a system for solar tracking control of a parabolic trough, the controller is based on a closed-loop system using photoelectric sensors, which includes an innovative calculation of hysteresis according to the intensity of radiation.

To make the experimental study, we developed the controller solar air conditioning system and the controller solar tracking system, as well as the construction and implementation of the proposed hydraulic configuration and installation of solar air conditioning system.

The controller for solar tracking did not present any problems during the operation time. The calculation of the hysteresis band controller allowed a continuous monitoring without being affected by clouds or variations in the intensity of radiation.

The experimental study of controller of solar air conditioning system applied in the solar air conditioning system, showed that it was capable of maintaining temperature of the space to be conditioned on the point. In addition to the hydraulic system configuration allowed to meet the control objectives set, to operate the system in different operation modes consume the least energy.

The main contributions of the project was the design of the controller of Air conditioning system solar controller solar tracking system, as well as its implementation in a low-cost microcontroller 32-bit, embedded in printed circuit board to achieve a control system consistent that it can operate automatically, safely and continuously.

Agradecimientos

Al Dr. Nicolás Velázquez Limón que cada día se preocupó por mi formación, además de compartir su conocimiento y contagiarme de ese entusiasmo para dar más que el máximo esfuerzo, en cada cosa que hago.

Al Dr. David I. Rosas Almeida y Dr. Anibal Luna León por brindarme ese conocimiento que se convirtió en una herramienta más en la elaboración de mi proyecto.

A mis sinodales y revisores de tesis Dr. Carlos Villa Angulo y Dr. Jesús Cerezo Román, por sus valiosas observaciones que me sirvieron como retroalimentación, para crecer profesionalmente.

A todos mis compañeros del posgrado y grupo de trabajo, en especial a Daniel Saucedo, Ricardo Beltrán, Fernando Lara, Daniel Aguayo, Fernando Kowasky, Alexis Acuña, Francisco Melendes, Efrén Ruelas, Guillermo Pérez, Pedro Rosales, Luis González y Ángel Alarcón por la compañía y apoyo en la realización de este trabajo.

Al Centro de Estudios de las Energías Renovables del Instituto de Ingeniería UABC, por el buen trato y permitirme realizar mis estudios de Maestría en tan prestigiosas instalaciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo otorgado para realizar mis estudios de Maestría.

Índice general

Resumen	III
Lista de Figuras	IX
Lista de Tablas	XII
Nomeclatura	XIII
1. Introducción	1
1.1. Problemática y justificación.	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Objetivos	9
1.3.1. Objetivo general	9
1.3.2. Objetivos específicos	9
1.4. Organización de la tesis	10
Nomeclatura	1
2. Generalidades	11
2.1. Fundamentos de la energía solar	11
2.1.1. El sol	11
2.1.2. Radiación en la superficie de la tierra.	12
2.1.3. Geometría solar	13
2.2. Enfriamiento termo-solar	15
2.2.1. Tecnologías de climatización solar.	16
2.3. Introducción a los sistemas de control	17
2.3.1. Historia del control automático	18
2.3.2. Sistemas de control realimentado	19
2.3.3. Sistemas de control en lazo cerrado	19
2.3.4. Sistemas de control en lazo abierto	20
2.3.5. Sistemas de control en lazo cerrado en comparación con los sistemas en lazo abierto	20
2.3.6. Algoritmos de control clásico	21
2.3.6.1. Control Todo o Nada	21

2.3.6.2.	Control proporcional	21
2.3.6.3.	Control integral	22
2.3.6.4.	Control PID	22
2.4.	Instrumentación	23
2.4.1.	Medición y error	23
2.4.1.1.	Sistemas de medición	24
2.4.1.2.	Tipos de error	24
2.4.2.	Reducción de errores	25
2.4.3.	Transductores	26
2.4.3.1.	Transductor de temperatura	27
2.4.4.	Instrumentos de medición solar	28
3.	Estudio teórico por medio de la simulación dinámica del sistema de enfriamiento	31
3.1.	Descripción del sistema convencional	31
3.1.1.	Unidad de enfriamiento	31
3.1.2.	Circuito hidráulico	33
3.1.3.	Circuito de aire	34
3.1.4.	Funcionamiento del sistema convencional	34
3.2.	Descripción del sistema propuesto	35
3.2.1.	Campo de colectores	35
3.2.2.	Funcionamiento del sistema propuesto	36
3.3.	Adecuación del simulador TRNSYS v.16 y creación de módulos	38
3.4.	Estudio de diferentes estrategias de control	44
3.4.1.	Control <i>Todo-Nada</i>	44
3.4.2.	Control por Retroalimentación Iterativa	44
3.4.3.	Control PID	44
3.4.4.	Control <i>If-Else</i>	45
3.5.	Comparación de las diferentes estrategias de control	46
3.6.	Análisis e interpretación de resultados	49
3.7.	Propuesta final del sistema de control	53
4.	Construcción del prototipo experimental	57
4.1.	Sistema de aire acondicionado	57
4.1.1.	Selección de dispositivos e instrumentación	57
4.1.2.	Instalación del sistema de aire acondicionado e implementación de la instrumentación	61
4.1.3.	Diseño e instrumentación del controlador de agua fría	63
4.1.3.1.	Desarrollo de acondicionamiento de señales	63
4.1.3.2.	Creación de circuitos impresos	69
4.1.3.3.	Programación del algoritmo de control	69
4.1.3.4.	Ajustes y calibración de componentes	73
4.2.	Diseño y construcción del sistema de control de seguimiento solar	75

4.2.0.5. Sensores fotoeléctricos	76
4.2.0.6. Sensores de límite	77
4.2.1. Creación de circuitos impresos	78
4.2.2. Programación del algoritmo de control	80
5. Implementación y estudio experimental	84
5.1. Controlador del sistema de aire acondicionado solar del CSAAS	84
5.1.1. Puesta en marcha de la unidad experimental	86
5.1.2. Pruebas experimentales	87
5.1.3. Procesamiento y análisis de la información	88
5.2. Sistema de seguimiento	92
5.2.1. Arranque y ajuste	92
5.2.2. Resultados experimentales	94
6. Conclusiones y recomendaciones	100
6.1. Conclusiones	100
6.2. Recomendaciones y Trabajos futuros	101
Bibliografía	102
A. Circuitos impresos del controlador del sistema de aire acondicionado solar.	108
Apéndices	108
B. Circuitos impresos del sistema de seguimiento	118

Lista de figuras

2.1. Fenómenos de reflexión y dispersión de la radiación solar.	13
2.2. Ángulo zenital, ángulo azimutal y ángulo azimutal de la superficie inclinada.	13
2.3. Esquema de un ciclo de absorción de simple efecto	17
2.4. Diagrama a bloques de un sistema a lazo cerrado.	19
2.5. Diagrama a bloques de un sistema a lazo abierto.	20
2.6. Características del controlador Todo-Nada.	22
2.7. Acción de control PID basándose en los errores de control pasados, presentes y futuros.	23
2.8. Sistema de medición y elementos que lo conforman.	24
2.9. Heliógrafo común.	29
2.10. Piranómetro de uso común.	29
2.11. Pirheliómetro de uso común.	30
3.1. Equipo ACF-60 versiones HT,TK, y LB.	32
3.2. Configuración del circuito hidráulico convencional.	34
3.3. Sistema de captación solar cilindro parabólico.	36
3.4. Configuración propuesta para el circuito hidráulico de agua fría.	36
3.5. Configuración del sistema bajo el entorno de simulación TRNSYS	40
3.6. Parámetros, entradas y salidas del módulo creado para el control del circuito de agua fría.	41
3.7. Algoritmo propuesto para el sistema de control CSAAS.	43
3.8. Control de la temperatura de la vivienda bajo las diferentes estrategias de control, con condición inicial de $25^{\circ}C$	47
3.9. Control de la temperatura de la vivienda bajo las diferentes estrategias de control, con condición inicial de $35^{\circ}C$	48
3.10. Simulación de la vivienda con condiciones iniciales de la vivienda a $15^{\circ}C$	51
3.11. Simulación de la vivienda con condiciones iniciales de la vivienda a $25^{\circ}C$	52
3.12. Simulación de la vivienda con condiciones iniciales de la vivienda a $35^{\circ}C$	54
3.13. Implementación en hardware del controlador del sistema de aire acondicionado solar.	55
3.14. Diagrama de tubería e instrumentación del banco de pruebas del sistema de enfriamiento solar.	56

4.1. Sensor de temperatura RTD PTC100.	57
4.2. Indicador y transmisor de flujo volumétrico.	58
4.3. Válvula solenoide todo o nada.	58
4.4. Válvula proporcional de 3 vías.	59
4.5. Transmisor de temperatura y humedad para ducto.	59
4.6. Fototransistor con filtro.	60
4.7. Tarjeta de demostración DEMOQE.	60
4.8. Tanque de almacenamiento de frío.	61
4.9. Instalación de válvula de 3 vías y sensor de temperatura.	62
4.10. Vista panorámica del sistema de aire acondicionado.	62
4.11. Fotografía de la construcción del circuito de agua fría.	63
4.12. Etapa de acondicionamiento para los sensores de temperatura.	64
4.13. Acondicionamiento de señal para el indicador de flujo.	65
4.14. Etapa de acondicionamiento para las electroválvulas.	66
4.15. Etapa de acondicionamiento para interruptores magnéticos.	67
4.16. Modulación por ancho de pulso.	67
4.17. Etapa de acondicionamiento para generar señal analógica para el control de la válvula proporcional de 3 vías.	68
4.18. Acondicionamiento de señal para el sensor de radiación solar.	68
4.19. Descripción de conexiones del controlador del sistema de aire acondicionado solar.	70
4.20. Piranómetro y sensor de radiación.	73
4.21. Caracterización del sensor de radiación.	74
4.22. Curva de calibración de los sensores de temperatura RTD PTC100.	75
4.23. Diagrama electrónico y estructura de los sensores fotoeléctricos.	77
4.24. Movimiento del cilindro parabólico según la posición del sol en los sensores fotoeléctricos.	77
4.25. Sensores de límite.	78
4.26. Tableta del sistema de control para el seguimiento solar.	79
4.27. Tableta del puente H del sistema electrónico para el seguimiento solar.	80
4.28. Algoritmo de control para el sistema de seguimiento solar.	81
5.1. Instalación del controlador del sistema de aire acondicionado.	85
5.2. Operación del CSAAS en la planta piloto, de las 10:00 a las 18:00Hrs.	89
5.3. Operación del CSAAS en la planta piloto, de las 10:00 a las 16:00Hrs.	90
5.4. Operación del CSAAS en la planta piloto, de las 15:15 a las 18:00 hrs.	91
5.5. Operación del CSAAS en la planta piloto, de las 14:00 a las 18:30 Hrs.	92
5.6. Instrumento para medir el grado de desenfoque.	93
5.7. Dispositivo de medición solar, el día 10 de marzo del 2010.	95
5.8. Dispositivo de medición solar, el día 11 de marzo del 2010.	96
5.9. Dispositivo de medición solar, el día 12 de marzo del 2010.	97
5.10. Desenfoque del sistema de seguimiento, el día 10 de Marzo del 2010.	98
5.11. Desenfoque del sistema de seguimiento, el día 11 de Marzo del 2010.	98

5.12. Desenfoque del sistema de seguimiento, el día 10 de Marzo del 2010. . .	99
A.1. Esquema del circuito de control del sistema de aire acondicionado hoja 1.	109
A.2. Esquemático del circuito de control del sistema de aire acondicionado hoja 2.	110
A.3. Tableta del controlador del sistema de aire acondicionado.	111
A.4. Plantilla del controlador del sistema de aire acondicionado capa 1. . . .	112
A.5. Plantilla del controlador del sistema de aire acondicionado capa 2. . . .	113
A.6. Etapa de construcción del CSAAS.	115
A.7. Ensamble de componentes y vista preliminar del circuito CSAAS. . . .	116
B.1. Esquema del circuito electrónico de control.	121
B.2. Esquema del Puente H.	122
B.3. Plantilla para circuito impreso del sistema de control.	123
B.4. Plantilla para circuito impreso del puente H.	123
B.5. Componentes del circuito de control de seguimiento solar.	124
B.6. Componentes del circuito del puente H.	124

Lista de tablas

1.1. Estado del arte de los sistemas de control utilizados en sistemas de enfriamiento solar.	3
1.2. Estado del arte de los sistemas de seguimiento.	8
2.1. Rangos de longitud de onda expresado en micras y clasificados por color.	11
2.2. Descripción de diferentes metales usados en RTD's.	27
3.1. Información técnica del equipo ACF60-00 HT.	32
3.2. Capacidad de enfriamiento del equipo ACF60-00-HT, de acuerdo a diferentes condiciones de operación.	33
3.4. tabla de verdad de las válvulas solenoides del circuito hidráulico propuesto.	38
3.5. Módulos contenidos en el circuito hidráulico de agua fría.	41
3.6. Módulos de uso general utilizados en la simulación.	41
3.7. Parámetros de ajuste del método de oscilación Ziegler and Nichols [1983].	45
3.8. Flujo manejado en el control para la temperatura de la vivienda	45
3.9. Indicador de confort PMV,ISO:7730 (2005).	46
3.10. Uso del recurso de almacenamiento frío y biogas para cada estrategia de control.	49
4.1. Correlaciones de corrección para los sensores de temperatura.	75
A.1. Componentes electrónicos del CSAAS.	117
B.1. Componentes del circuito electrónico de control del sistema de seguimiento.	119
B.2. Componentes del circuito de potencia del sistema de seguimiento.	120
B.3. Componentes adicionales del sistema de seguimiento.	120

Nomenclatura

α	Coefficiente de temperatura [adimensional].
α_s	Altura solar [grados].
β	Inclinación [grados].
δ	Declinación de la tierra [grados].
\dot{m}	Flujo masico [kg/h].
γ	Angulo acimutal de la superficie [grados].
γ_s	Angulo azimutal [grados].
λ	Longitud de onda [micras].
ω	Angulo horario [grados].
\bar{x}	Media aritmética [adimensional].
ϕ	Latitud [grados].
τ	Constante de tiempo.
θ	Angulo de incidencia [grados].
θ_z	Angulo zenital [grados].
COP	Coefficiente de operacion [adimensional].
COP_m	Coefficiente de operacion nominal [adimensional].
C_p	Calor especifico del fluido [Wh/kgK].
G_{on}	Radiacion extraterreste por dia [W/m^2].
G_{sc}	Constante solar [W/m^2].
K	Ganancia del controlador [adimensional].

k_i	Ganancia integral del controlador [adimensional].
L_{loc}	Longitud local [grados].
L_{st}	Longitud estandar [grados].
n	Dia el año. [adimencional].
Q_c	Capacidad de enfriamiento [kW].
Q_{cap}	Capacidad de enfriamiento en condiciones actuales [adimensional].
Q_{carga}	Carga termica en las condiciones actuales [adimensional].
Q_{dis}	Energia disipada [kW].
Q_{gen}	Energia entrante en el generador [kW].
Q_u	Carga termica en condiciones actuales [kW].
R	Reistencia del material [ohm].
T	Temperatura [$^{\circ}C$].
T_c	Temperatura correlacionada [$^{\circ}C$].
T_c	Tiempo civil [horas].
t_d	Tiempo derivativo [s].
T_i	Tiempo integral [s].
T_s	Tiempo solar [horas].
T_{ref}	Temperatura de referencia [$^{\circ}C$].
u	Variable de control o manipulad [adimensional].
y	Variable de salida o de proceso [adimensional].
y_{sp}	Punto de consigna [adimensional].

Capítulo 1

Introducción

1.1. Problemática y justificación.

Las condiciones de temperatura extremas que podemos encontrar en algunas localidades, como lo es en el caso Mexicali. B.C., y la exigencia del confort humano para realizar actividades cotidianas, impulsaron el desarrollo de tecnologías de climatización de espacios. La demanda de energía eléctrica con tarifas elevadas y además la contaminación del medio ambiente que provoca el aumento del calentamiento global, son provocados en gran medida por la utilización de tecnologías convencionales, comúnmente conocidos como aire acondicionado ó refrigeración.

Desde hace algún tiempo y fundamentalmente tras la crisis energética, se ha visto un creciente interés por el aprovechamiento de fuentes energéticas no explotadas hasta ahora, uno de los casos es la energía solar, Rubio et al. (2006). La producción de frío ha ocupado para la conservación de alimentos perecederos y la climatización de espacios, representan una demanda importante de energía para los diferentes países, Fernández et al. (2006).

La tecnología de sistemas de absorción puede ser utilizada en aire acondicionado y refrigeración para los sectores residencial, comercial e industrial, Velázquez y Best (2002). El acoplamiento entre el campo solar y la máquina de absorción presentan serias deficiencias que las invalidan para valorar el comportamiento real de la instalación, por un lado, la ausencia de un sistema de control que modifique las condiciones de operación para funcionar continuamente en el máximo Coeficiente de Operación (*COP*, iniciales de las palabras *Coefficient Of Performance*), hacen que el valor de este parámetro se aparte del óptimo, García (2005). Debido a esto, una de las tendencias de la investigación en el área de climatización en estos últimos años, se ha enfocado en el desarrollo de sistemas de enfriamiento termosolares sustentables. Por esta causa a surgido una propuesta del Centro de Estudios de las Energías Renovables (CEENER) del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma Baja California (UABC) para desarrollar una unidad de enfriamiento activada con una fuente de energía híbrida solar-biogas aplicada en la climatización de espacios y consecuentemente el desarrollo de una tecnología innovadora para el remplazo de las tecnologías convencionales. Debido a la falta de un sistema de

control, la unidad de enfriamiento presenta una barrera para su desarrollo e introducción al mercado, por lo que surge la necesidad de realizar un sistema de control que permita operar el sistema de forma automática y segura, además de ser capaz de brindar confort y ahorro de energía.

En el CEENER se cuenta con un campo de colectores, máquina de enfriamiento basado en un ciclo por absorción y el espacio a climatizar, estos sistemas se interconectan entre si para conformar el sistema de aire acondicionado solar. El campo de colectores son de tipo cilindro parabólico, que requieren estar en movimiento constantemente para mantener un ángulo requerido con respecto a los rayos del sol, por ello surge la necesidad de un sistema de control para brindar al campo de colectores un seguimiento solar de forma segura, automática y precisa. Otro sistema de control es requerido para solucionar el problema relacionado con en el acoplamiento entre el campo de colectores y el equipo de absorción, aunado a una interfaz de usuario que permita configurar las variables de control del equipo de enfriamiento. Debido a que el sistema es operado con energía solar, éste necesita un sistema de control para mantener la temperatura de confort en la vivienda a climatizar, además de modificar una serie de eventos que puedan permitir el uso del sistema ante diferentes escenarios, como lo son: funcionamiento con energía solar, almacenamiento de frío y a fuego directo (biogas).

Las necesidades de control, para el sistema de climatización solar son: 1. Sistema de control para seguimiento solar, 2. Sistema de control para el campo de colectores y unidad de absorción, 3. El controlador para el sistema de aire acondicionado solar.

Dado lo anterior, en este proyecto se plantea atacar: la problemática del desarrollo del sistema de seguimiento solar, instrumentación e instalación del del sistema de climatización solar y por último el desarrollo del controlador del sistema de aire acondicionado solar. Como el proyecto está enfocado en un desarrollo tecnológico, los controladores se implementaran en dispositivos baratos y capaces de realizar el control de forma automática y continua.

1.2. Antecedentes

En la Escuela Superior de Almería de Ingenieros de Sevilla, España instalaron un sistema de climatización solar, donde se empleó un controlador tipo PID que, en general dio buenos resultados, aunque se presentaron dificultades debido a la inercia de la temperatura ocasionada por la naturaleza del sistema, Delgado et al. (2000). El control de una planta de enfriamiento solar es un problema complejo, en el que interviene un número significativo de variables cuyo entorno de operación esta sujeto a condiciones climatológicas. Zambrano y Camacho (2001) plantean y simulan un algoritmo de optimización multi-objetivo donde se selecciona el modo de funcionamiento de una planta para la minimización de costos, el algoritmo es una herramienta útil para el manejo de procesos, sin embargo su uso fue limitado debido a que toma mucho tiempo para el cálculo y el número de iteraciones que se realizan. Tres años más tarde, Corchero et al. (2004) aplicaron técnicas de control robusto

(H_∞) en una planta solar para producir frío, el control se basa en la regulación de la temperatura de salida de los colectores solares, con la cual es alimentado un equipo por absorción para la climatización de espacios, la implementación del controlador se realizó mediante una computadora y el software *Simulink de Matlab*. En Puerto Rico, Gonzalez (2004), desarrolló un sistema de control de temperatura, aplicado en un sistema de aire acondicionado solar, para regular la temperatura se utilizó un controlador clásico Proporcional e Integral (PI), el cual fue implementado mediante una computadora, un sistema de adquisición de datos y el conocido software de Labview, el autor comenta que al reducir el flujo de agua entre las líneas de el equipo de absorción y el tanque de almacenamiento térmico, es posible extender el tiempo de operación de la unidad de enfriamiento operado con almacenamiento térmico mientras se mantiene el confort establecido. Además, para fines comerciales, la estrategia de control puede ser implementada en un microcontrolador. Al siguiente año Núñez et al. (2005), presentan la aplicación de un modelo de control predictivo para controlar la temperatura de una planta solar. La sintonización del sistema fue simple y se buscó un compromiso entre la robustez y el rendimiento. Lygouras et al. (2007), implementaron la combinación de un controlador en lógica difusa y un convencional PID para sistemas de aire acondicionado solar, donde controlan la bomba del fluido caloportador entrante al generador y la bomba de la solución de trabajo, la implementación en hardware fue en un microcontrolador de 16 bits, aclarando que este dispositivo no contaba con habilidades especiales para la lógica difusa. En el siguiente año Lygouras et al. (2008), trabajaron en el mismo sistema de aire acondicionado solar, solo que en esta ocasión desarrolla un sistema Múltiples Entradas Múltiples Salidas (*MIMO*, iniciales de las palabras en ingles *Multiple In Multiple Out*) en un sistema difuso, la implementación del algoritmo se realizó en un microcontrolador de 16 bits. En el mismo año Zetzsche et al. (2008), controló un sistema de enfriamiento mediante un Programa Almacenado de Control (*SPC*, iniciales de las palabras *Stored Program Control*), el cual conmuta válvulas y bombas para regular flujo y mantener el COP en su máxima eficiencia. En la tabla 1.1 se muestra algunos sistemas de control en aire acondicionado solar, resaltando las características del control y su aplicación.

Tabla 1.1: Estado del arte de los sistemas de control utilizados en sistemas de enfriamiento solar.

Autor	Estrategia	Implementación
Delgado et al. (2000)	PID	PC
Zambrano y Camacho (2001)	Algoritmo	Simulación
Corchero et al. (2004)	H_∞	PC
Gonzalez (2004)	PI	PC
Núñez et al. (2005)	MPC	-
Lygouras et al. (2007)	LD-PID	Microcontrolador
Lygouras et al. (2008)	LD-PID	Microcontrolador
Zetzsche et al. (2008)	SPC	-

En las diversas técnicas de control electrónico empleadas para seguimiento solar destacan los sistemas de lazo abierto y lazo cerrado, Lee et al. (2009). Los sistemas de lazo abierto no comparan la variable de control con una de referencia, es decir, el controlador se basa en un modelo matemático que calcula la posición mediante un algoritmo para asociarlo con ángulos de posicionamiento de un concentrador o reflector para realizar el posicionamiento deseado. Los sistemas de lazo cerrado se basan en sistemas de control realimentado, que por medio de sensores, el controlador puede leer la variable que depende el control, en este caso variables climáticas y radiación solar. Uno de los primeros trabajos en sistemas de seguimiento lo presentó McFee (1975), donde posiciona helióstatos para concentrar los rayos solares en un receptor central, para realizar el movimiento del arreglo de espejos, el algoritmo calcula la distribución de la potencia y el flujo de calor del receptor. Cuatro años más tarde se realiza la patente por Neale (1979), que consiste en un sistema de seguimiento para un arreglo de colectores tipo cilindro parabólico, el control electrónico se diseñó mediante sensores fotoeléctricos y circuitos electrónicos. Dos años más tarde se publica el trabajo de David et al. (1981), donde el alineamiento de espejos de un concentrador fresnel reflectivo tipo lineal, para irradiar a un sistema fotovoltaico, el sistema de control se realiza en base a fotoresistencias y amplificadores operacionales, además se incluye un puente H como etapa de potencia para darle movimiento al actuador. Gerwin (1985), patenta un sistema de posicionamiento para helióstatos, los cuales realizan el seguimiento en un punto de concentración llamado Cabeza de Seguimiento (*TrackHead*), esto asociándolo con los ángulos azimutal y altura solar para el movimiento de los reflectores. Akhmedyarov (1986), utilizó un sistema de seguimiento en lazo cerrado para incrementar la potencia en una estación fotoeléctrica. En el mismo año, otra patente de un método para posicionar helióstatos fue realizada por Stone (1986), que por medio de una computadora y un radiómetro calcula el error de desenfoque en una torre central para obtener la posición de los Helióstatos y corregirla. Comenzando los años 90's se desarrolló *SolarTrack* por Maish (1990), para brindar un seguimiento solar a bajo costo en uno y dos ejes, el cual contenía un algoritmo capaz de autoajustar la hora y la latitud. Algunos años más tarde Brown y Stone (1993), aplican redes neuronales en un sistema de seguimiento para concentradores solares, donde se logró un error máximo de 0.01° .

Kalogirou (1996), desarrolló un sistema de seguimiento en un eje para un cilindro parabólico, donde utiliza 3 fotoresistencias, las primeras dos son utilizadas para la determinación nublados y diferenciar de día o noche, la restante para determinar el enfoque del sistema de seguimiento. Dos años más tarde Khalifa y Al-Mutawalli (1998), estudiaron el efecto de un seguimiento solar en dos ejes para un Cilindro Parabólico Compuesto (CPC), el circuito electrónico para el seguimiento en un eje consta de un par de fototransistores separados por una pared, la operación del seguimiento parte de la diferencia de voltajes brindados por los sensores que se amplifican para enviarlos al controlador del motor, el colector se mueve hasta obtener un diferencial de potencial cero. Para dar seguimiento en dos ejes se utilizan dos circuitos electrónicos en paralelo del antes mencionado, uno para cada eje, en el estudio se concluyó que el seguimiento en dos ejes para un CPC con respecto a uno fijo, el resultado obtenido fue de un incrementó

de la energía en un 75 %. Yousef (1999), realizó el diseño y la implementación de un sistema de seguimiento solar a lazo cerrado mediante sensores, donde las señales de estos pasan por un sistema de adquisición de datos para enviarse a una computadora y tomar la decisión mediante un algoritmo basado en lógica difusa, concluyendo que este tipo de control es una buena opción para realizar el seguimiento a la fuente de luz. Dos años más tarde Blanco-Muriel et al. (2001), presentan un algoritmo simple y exacto con un error de 0.008° , para utilizarlo en sistemas basados en microprocesadores y seguir manteniendo un costo bajo de construcción, exactitud en el cálculo de la posición solar y al mismo tiempo una buena eficiencia computacional. En el mismo año Nuwayhid et al. (2001), elaboro un sistema de seguimiento solar a lazo abierto en dos ejes para un concentrador parabólico, y utilizarlo como una herramienta educacional de bajo costo. Falbel et al. (2002), presento un circuito de seguimiento solar para posicionar un sistema fotovoltaico mediante sensores, que obtienen la posición del sol a través de una diferencia de señales ocasionada por la geometría de dichos sensores, que pueden obtener la posición del sol con una exactitud del 0.05° . Al siguiente año se presenta un sistema híbrido, que consiste en una combinación de un sistema lazo cerrado y lazo abierto, con el que se da seguimiento para un concentrador disco parabólico utilizado en la generación de energía eléctrica mediante un motor Stirling, Lagunas et al. (2003). Al mismo tiempo trabajó en el proyecto de posicionamiento solar por medio de ecuaciones, para un cilindro parabólico con el propósito de obtener calor de proceso, Lagunas et al. (2003). Abdallah (2004) realiza un estudio en 4 tipos de seguimiento solar con arreglos fotovoltaicos para 2 ejes, un eje vertical, un eje este-oeste y un eje norte sur, obteniendo un incremento en potencia eléctrica con respecto a uno fijo, de hasta 43.9 %, 34.4 %, 15.7 % y 37.5 %. En el mismo año Abdallah y Nijmeh (2004), diseñaron y construyeron una estructura electromecánica y un sistema de seguimiento solar, programando un algoritmo de lazo abierto en un controlador lógico programable (PLC), los resultados arrojaron que la superficie con seguimiento en dos ejes captó 41.3 % más que la superficie fija. Aiuchi et al. (2004), presento un sistema de seguimiento a lazo cerrado con 2 fotoceldas, cada una en el extremo de una caja con una apertura en el centro, al entrar la radiación por dicha apertura ilumina los foto-sensores produciendo una señal proporcional al área iluminada, donde el reflector se mueve para mantener las fotoceldas con la misma magnitud de radiación. En el mismo año Al-Mohamad (2004), diseñó un seguimiento solar controlado por la radiación solar, para mover un módulo fotovoltaico incrementando su energía diaria un 20 % con respecto a un modulo fijo. El sistema permite la interconexión con una computadora para realizar monitoreo y adquisición de datos. También Berenguel et al. (2004), desarrollan la simplificación del posicionamiento de helióstatos usando técnicas de visión artificial, para concentrar la radiación solar en un receptor volumétrico. Reda y Andreas (2004), describen el procedimiento paso por paso para implementar un algoritmo de posicionamiento solar, donde se puede calcular el ángulo cenital y azimutal con una incertidumbre de 0.0003° . Un sistema de seguimiento solar en 2 ejes a lazo cerrado con un servo sistema y 4 foto-sensores divididos en cuadrantes, fue desarrollado y construido por Roth et al. (2004), para realizar mediciones de radiación solar con un pirheliómetro. Alata et al. (2005),

presenta tres simulaciones de seguimientos solares basados en lógica difusa, donde el modelo y control fue a través de un sistema Sugeno de primer orden, se diseñó un sistema de control de lazo abierto para cada uno, las reglas difusas fueron sintonizadas con un sistema de inferencia neuro-difuso (ANFIS). En el mismo año Hoyos et al. (2005), llevan a cabo el diseño y construcción de otro sistema de seguimiento basado en lógica difusa, a diferencia del trabajo de Alata et al. (2005), este es en lazo cerrado por medio de fotoresistencias. Karimov et al. (2005), describen el diseño de un sistema de seguimiento fotovoltaico simple, las celdas fotovoltaicas están acomodadas en una especie de triángulo para ser utilizadas como sensores que funcionan a lazo cerrado, resulta innovador al utilizar la cantidad de energía captada por el arreglo fotovoltaico como sensores y con esto realizar el enfoque. Al siguiente año Chen et al. (2006), presentaron un fotosensor digital de gran exactitud, los resultados arrojaron que tiene 0.02° de error. Arasu y Sornakumar (2007), desarrollaron un controlador electrónico embebido para dar seguimiento solar automático a un cilindro parabólico utilizado para el calentamiento de agua. La posición del sol puede obtenerse mediante fotoresistencias con una exactitud del 0.1° . En Mexicali, Castro et al. (2007), diseñaron un sistema de seguimiento barato y sencillo en 1 eje, utilizando foto-transistores como sensores para cerrar el lazo de control, el diseño electrónico sólo consta de circuitos operacionales y algunos integrados con lo que se logró el aumento de captación de energía hasta en un 29% con respecto a un sistema fotovoltaico fijo. Chen y Feng (2007), presentaron otro sensor que a diferencia de su trabajo anterior en el 2006, este es analógico basado en el principio de medición de ángulos, con el cual se alcanza una exactitud de 0.2° . Khlaichom y Sonthipermpon (2007), presentaron la primera optimización con algoritmos genéticos para un sistema de seguimiento solar, el sistema de control de lazo abierto calcula los ángulos del sol para realizar su posicionamiento, pero debido a las inexactitudes de la estructura mecánica se decidió incrementar la exactitud del posicionamiento con un ajuste fino mediante los algoritmos genéticos. En el mismo año se desarrolló un sistema de control para el seguimiento solar híbrido que presenta ventajas al no necesitar procedimientos especiales de instalación o calibración, con el que se da seguimiento en dos ejes a un bajo costo, los resultados arrojan que se obtuvo un 40% más de ganancia de energía con la estrategia propuesta que con la de lazo abierto, debido a las imperfecciones de la estructura, Rubio et al. (2007). Abdallah y Badran (2008), construyeron un sistema de seguimiento en un eje a lazo abierto con un PLC, con el objetivo de destilar agua, concluyendo que aumentó la producción de agua en un 22% con respecto a un sistema fijo. Chiang et al. (2008) exploraron la relación entre los voltajes de salidas de celdas fotovoltaicas para determinar la posición del sol y la latitud, encontrando que es posible determinar dichas variables con fotoceldas inclinadas a 45° , con lo cual colaboran al desarrollo de un sistema de seguimiento en el desarrollo de tecnología. Al mismo tiempo otro nuevo algoritmo se desarrolla por Grena (2008), expresando que en la literatura se encuentran algoritmos de posicionamiento del sol desde 0.01° y otros muy complejos de hasta 0.0003° , sin embargo estos implican un alto tiempo de cálculo, por ello este autor toma en cuenta la precisión y el tiempo de cálculo y propone un algoritmo con error máximo de 0.0027° suficiente para aplicaciones de la ingeniería solar, y un costo

computacional comparado con algoritmos rápidos. Arbab et al. (2009), publicaron un trabajo de un sistema electrónico de seguimiento solar, que resulta innovador al utilizar una computadora y una cámara para capturar la imagen de una barra que sombrea un plano cartesiano, equivalente a la dirección donde se encuentra el sol. En el mismo año nuevamente se publicó una fórmula general para el cálculo de la trayectoria solar que puede ser aplicado en el seguimiento de receptores solares como módulos fotovoltaicos, concentradores fresnel y parabólicos, Chong et al. (2009); Chong y Wong (2009). Por último Sungur (2009), desarrolló un sistema de seguimiento de dos ejes en lazo abierto para aplicaciones en paneles fotovoltaicos en Turquía, cuando compararon los datos obtenidos se encontró que se obtuvo un 42.6% más de energía con seguimiento en dos ejes comparado con uno fijo. En la tabla 1.2 se muestra el estado del arte de los sistemas de control para el seguimiento solar, resaltando las características del control y su aplicación.

Tabla 1.2: Estado del arte de los sistemas de seguimiento.

Autor	Control	Estrategia	Implementación	Aplicación
McFee (1975)	Lazo-Abierto	-	-	Helióstatos
Neale (1979)	Lazo-Cerrado	On-Off	A. Operacionales	CCP
David et al. (1981)	Lazo-Cerrado	On-Off	A. Operacionales	FV
Gerwin (1985)	Lazo-Abierto	On-Off	Circuitos Electrónicos	Helióstatos
Akhmedyarov (1986)	Lazo-Cerrado	-	-	FV
Stone (1986)	Lazo-Cerrado	-	Computadora	Helióstatos
Maish (1990)	Lazo-Cerrado	-	-	-
Brown y Stone (1993)	Lazo-Cerrado	Redes-Neuronales	-	Concentradores solares
Kalogirou (1996)	Lazo-Cerrado	On-Off	Circuitos Electrónicos	CCP
Khalifa y Al-Mutawalli (1998)	Lazo-Cerrado	On-Off	Operacionales	CPC
Yousef (1999)	Lazo-Cerrado	Lógica-Difusa	PC	FV
Blanco-Muriel et al. (2001)	Lazo-Abierto	Algoritmo	Microprocesador	-
Nuwayhid et al. (2001)	Lazo-Abierto	-	PC	Concentrador Parabólico
Lagunas et al. (2003)	-	-	-	CCP
Lagunas et al. (2003)	-	-	-	CCP
Falbel et al. (2002)	Lazo-Cerrado	-	-	FV
Abdallah (2004)	-	-	-	FV
Abdallah y Nijmeh (2004)	Lazo-Abierto	-	PLC	-
Aiuchi et al. (2004)	Lazo-Cerrado	-	-	-
Al-Mohamad (2004)	Lazo-Cerrado	-	PLC	-
Berenguel et al. (2004)	Lazo-Cerrado	-	PC	Helióstatos
Reda y Andreas (2004)	Lazo-Abierto	Algoritmo	-	-
Roth et al. (2004)	Lazo Cerrado	-	Procesador	Pirheliómetro
Alata et al. (2005)	Lazo-Abierto	Lógica-Difusa	Simulación	-
Hoyos et al. (2005)	Lazo-Cerrado	Lógica-Difusa	Microcontrolador	-
Karimov et al. (2005)	Lazo-Cerrado	-	-	-
Chen et al. (2006)	Sensor	-	-	-
Arasu y Sornakumar (2007)	Lazo-Cerrado	On-Off	Microcontrolador	Calentamiento agua
Castro et al. (2007)	Lazo-Cerrado	On-Off	Operacionales	Fotovoltaico
Chen y Feng (2007)	Sensor	-	-	-
Khlaichom y Sonthipermpoon (2007)	Lazo-Abierto	Algoritmo-Gen.	PC	-
Rubio et al. (2007)	Híbrido	-	Microprocesador	Fotovoltaico
Abdallah y Badran (2008)	Lazo-Abierto	-	PLC	Destilación
Chiang et al. (2008)	-	-	-	-
Grena (2008)	Algoritmo	-	-	-
Arbab et al. (2009)	Lazo-Cerrado	P. Imagen	PC	Concentrador Parabólico
Chong et al. (2009)	Lazo abierto	Formula	-	-
Chong y Wong (2009)	Lazo abierto	Formula	-	-
Sungur (2009)	Lazo-Abierto	-	PLC	Fotovoltaico

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Investigar y desarrollar teórica y experimentalmente un sistema de control para automatizar una unidad de enfriamiento solar, operado con una fuente de energía híbrida solar y biogas, con la capacidad de brindar seguridad, confort y ahorro de energía.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar un estudio del estado del arte en estrategias de control, utilizadas en los sistemas de enfriamiento termosolar, así como en los sistemas de seguimiento solar.
- Simulación dinámica del sistema de enfriamiento solar.
- Desarrollar una configuración para el circuito de agua fría del sistema de enfriamiento solar.
- Realizar el diagrama de tuberías e instrumentación del sistema de enfriamiento solar.
- Desarrollar una propuesta del controlador para un sistema de enfriamiento solar.
- Especificación de la instrumentación y elementos finales de control para el sistema de enfriamiento solar.
- Calibración de instrumentación.
- Construcción e instrumentación del circuito de agua fría y circuito de aire .
- Instalación y operación de la unidad de enfriamiento por absorción.
- Desarrollo de circuitos impresos para el controlador del sistema de seguimiento solar y sistema de aire acondicionado solar.
- Programación de los algoritmos de control tanto del sistema de seguimiento solar como el del sistema de aire acondicionado solar.
- Implementar el sistema de control para el seguimiento solar y aire acondicionado solar en la planta piloto, para convertirla en un proyecto demostrativo.
- Realizar estudio experimental del Controlador del Sistema de Aire Acondicionado Solar operando en la instalación del sistema de climatización.
- Escritura de tesis.

1.4. Organización de la tesis

En este documento se redacta el desarrollo de un Controlador para un Sistema de Aire Acondicionado Solar, en cual se involucro un conjunto de áreas multidisciplinarias, por ello en el Capítulo 2 se mencionan algunos conceptos básicos de la energía solar y sistemas de automatización y control, con el objetivo de brindar bases al lector para entender el desarrollo del proyecto.

En el Capítulo 3 se muestra la descripción física y operativa del sistema de climatización propuesto, además de un análisis basado en simulación dinámica a través del entorno TRNSYS, con el objetivo de realizar un estudio de sensibilización del sistema y un análisis comparativo de las diferentes estrategias de control.

En el Capítulo 4 se muestra la selección de dispositivos e instrumentación del sistema de climatización, además del diseño electrónico e implementación en hardware del Controlador del Sistema de Aire Acondicionado solar y del sistema de Seguimiento solar.

En el Capítulo 5 se presenta la instalación del sistema de enfriamiento y los resultados del estudio experimental del circuito de control de la unidad de enfriamiento y del sistema de seguimiento solar.

En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones obtenidas a lo largo del proyecto, además de las recomendaciones y trabajos futuros.

Los Apéndices A y B contienen el proceso de fabricación y materiales utilizados en los circuitos en impresos de la unidad de enfriamiento y sistema de seguimiento solar.

Capítulo 2

Generalidades

2.1. Fundamentos de la energía solar

La energía recibida directamente del sol, es lo que llamamos energía solar. Se absorbe de manera natural por seres vivos fotosintéticos, y comúnmente se utiliza para calentar o generar energía eléctrica. En esta sección se muestran los conceptos básicos de la energía solar.

2.1.1. El sol

El sol es una esfera de intenso gas caliente con un diámetro de 1.39×10^9 m, a una distancia de 1.5×10^{11} m de la tierra. Desde la tierra puede observarse, como él sol gira en su eje alrededor de 4 semanas. Sin embargo, el no gira como un cuerpo sólido, su ecuador toma cerca de 27 días y la región polar 30 días por cada rotación.

El sol es considerado como un cuerpo negro con una temperatura cerca a los 5762 K, algunas regiones en su interior son estimadas de 8×10^6 hasta 40×10^6 K, su densidad se encuentra entre 80 y 100 veces mayor que el agua. El sol es considerado una fuente de energía inagotable, debido a las reacciones nucleares que en él se llevan a cabo, la radiación llega en forma de ondas electromagnéticas con longitudes de onda (λ) de $0.2 \mu\text{m}$ hasta $2.6 \mu\text{m}$ llamadas luz, donde el ojo humano sólo puede percibir en el rango de $0.4 \mu\text{m}$ hasta $0.7 \mu\text{m}$ como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Rangos de longitud de onda expresado en micras y clasificados por color.

Rango de longitud de onda	Valor medio	Color
0.38-0.43	0.41	Violeta
0.43-0.5	0.47	Azul
0.5-0.57	0.55	Verde
0.57-0.6	0.58	Amarillo
0.6-0.64	0.61	Naranja
0.64-0.77	0.66	Rojo

La constante solar G_{sc} , es la energía recibida del sol por unidad de tiempo, en un área de una superficie perpendicular a la propagación de la radiación, a una distancia promedio entre el sol y la tierra, afuera de la atmósfera terrestre. El valor de la constante solar ha sido sujeto a investigaciones experimentales, a lo largo de los años diferentes investigadores han reportado diversos valores. *The World Radiation Center* (WRC) adoptó el valor de 1367 W/m^2 con una incertidumbre de 1%. La variación de la radiación extraterrestre afecta a la radiación captada en la tierra, el segundo factor es que la tierra envuelve al sol en una órbita elíptica y tiene una pequeña excentricidad. Consecuentemente la distancia entre el sol y la tierra varía a través del año. La dependencia de la radiación extraterrestre en el tiempo del año, la indica la Ecuación 2.1:

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right], \quad (2.1)$$

donde n es el día del año.

2.1.2. Radiación en la superficie de la tierra.

La radiación recibida en la superficie de la tierra es reflejada, dispersada y absorbida. El mecanismo de absorción sucede cuando pasa a través de la atmósfera de la tierra. La absorción ocurre principalmente por la presencia de ozono, vapor de agua en la atmósfera y otros gases (como CO_2 , N_2 , CO , O_2 y H_2O). Por otro lado la claridad del cielo influye en la atenuación y dispersión, por consecuencia cuando se cuenta con cielo claro se obtiene la máxima radiación. Debido a estos 3 procesos de absorción, reflexión y dispersión, la radiación obtenida en la superficie de la tierra es menor a la radiación extraterrestre, es decir, se atenúa en su trayecto. El grado de atenuación depende del medio por donde la radiación hace su recorrido, por ejemplo, la longitud de la atmósfera y el espesor de la masa de aire contenida entre la atmósfera y la superficie terrestre.

Algunos conceptos relacionados con el tema de la energía solar, deben ser comprendidos para aprovechar el contenido de esta sección:

Radiación o Irradiancia, es la cantidad de energía radiante recibida en una superficie por unidad de área (W/m^2).

Irradiación, es la cantidad o densidad de energía acumulada por unidad de área en una superficie (W s/m^2 o J/m^2). Insolación es un término específico en la energía solar para llamar a la irradiación.

Pico de radiación solar, es la radiación directa aproximada de 1000 W/m^2 bajo las condiciones de día claro, al nivel del mar y estando el sol en el cenit del captador.

Hora pico, es llamada a la cantidad de insolación recibida en un captador en un tiempo de una hora, su unidad es: 1 Hora pico = $1000 \text{ (W h/m}^2)$

Radiación directa, es la radiación recibida del sol sin cambios de dirección (ver figura 2.1).

Radiación difusa, es la radiación solar recibida desde el sol después que su dirección a sido cambiada.

Latitud(ϕ), es la ubicación angular norte o sur del ecuador, norte positivo; $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.

Ángulo de incidencia (θ), es el ángulo entre la radiación directa en una superficie y la normal de la superficie.

Inclinación (β), es el ángulo entre el plano en cuestión y la horizontal; $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$.

Ángulo azimutal de la superficie (γ), es la desviación de la proyección en la horizontal de la normal de un plano hacia la superficie desde el meridiano local, cero estando en el sur, este negativo y oeste positivo; $-180^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$.

Declinación (δ), es la posición angular del sol al de medio día (en otras palabras, cuando el sol está en el meridiano local) con respecto al plano del ecuador, norte es positivo; $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$. y se puede determinar por la siguiente ecuación, Cooper (1969),

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right), \quad (2.2)$$

donde n es el día del año.

Ángulo horario (ω), es el desplazamiento angular del sol este u oeste a partir del meridiano local, debido a la rotación de la tierra sobre su eje, donde son 15° por hora, negativo en la mañana, positivo en la tarde, y esta dado por la Ecuación 2.3,

$$\omega = 15 (T_s - 12). \quad (2.3)$$

Tiempo solar (T_s), el tiempo solar está basado en el movimiento aparente del sol a lo largo del cielo, donde el medio día solar es, cuando el sol cruza por el meridiano del observador. El tiempo solar es utilizado para el cálculo de todas las relaciones de los ángulos del sol, este no coincide con el tiempo local o civil (T_c). Para convertir el tiempo civil en tiempo solar es necesario aplicar dos correcciones. La primera es una constante de corrección, dada por la diferencia en longitud entre el meridiano del observador y el meridiano (L_{st}) en el cual esta basado el tiempo civil. La segunda corrección es la ecuación del tiempo (E), que toma en cuenta las perturbaciones de la tierra y la proporción de rotación que afectan el tiempo en que el sol cruza el meridiano del observador. El tiempo solar en horas se define por la Ecuación 2.4,

$$T_s = T_c + \frac{L_{st} - L_{loc}}{15} + \frac{E}{60}, \quad (2.4)$$

la ecuación del tiempo E esta dado en minutos, Spencer (1971),

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868\cos(B) - 0.032077\sin(B) - 0.014615\cos(2B) - 0.04089\sin(2B)), \quad (2.5)$$

donde L_{loc} es la longitud de la localidad en cuestión, B se define por la Ecuación 2.6,

$$B = (n - 1) \left(\frac{360}{365} \right), \quad (2.6)$$

y n es el día del año.

Ángulo zenital (θ_z), es el ángulo entre la vertical y la línea que forma los rayos solares, esto es, el ángulo de incidencia de la radiación en la superficie horizontal.

$$\cos\theta_s = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega). \quad (2.7)$$

Altura solar (α_s), es el ángulo entre la horizontal y la línea de los rayos del sol, en otras palabras, el complemento del ángulo zenital.

$$\alpha_s = 90 - \theta_z. \quad (2.8)$$

Ángulo azimutal (γ_s), es el desplazamiento angular desde el sur a la proyección de la radiación directa en el plano horizontal. El desplazamiento sur a este es negativo y de sur a oeste es positivo.

$$\sin\gamma_s = \frac{\sin(\omega)\cos(\delta)}{\sin(\theta_s)}. \quad (2.9)$$

2.2. Enfriamiento termo-solar

Hablando de los requisitos y la exigencia de la climatización, existe una gran variedad de posibilidades de aplicación de la tecnología solar en dicho sector. Desde luego, la ventaja es que se dejan de consumir energías no renovables y por lo tanto la energía calorífica resulta gratis. Además, el calor solar podrá utilizarse en los periodos de transición y en invierno para el apoyo a la calefacción.

Hasta la fecha, en el mercado de equipos utilizados para aplicaciones de climatización predominan las máquinas por compresión mecánica de vapor que funcionan con energía eléctrica. Anualmente se venden a nivel mundial millones de instalaciones estacionarias y alrededor de 35 millones de instalaciones móviles. La incompatibilidad medioambiental de los refrigerantes convencionales, así como el aprovechamiento de su energía de activación constituyen un tema de discusión crítico.

Algunas ventajas ecológicas de las tecnologías de refrigeración activadas con energía térmica en comparación con las máquinas de compresión de funcionamiento eléctrico, se pueden mencionar las siguientes:

- Se hace una sustitución de la energía eléctrica para el compresor de la máquina de compresión mecánica de vapor, con el propósito de ahorrar energía primaria.
- No se aplican refrigerantes que dañan el medio ambiente.
- Se reducen considerablemente las emisiones de CO₂.

2.2.1. Tecnologías de climatización solar.

En la climatización solar se utiliza la energía térmica como fuerza motriz en sistemas de enfriamiento para la producción de frío, que pueden clasificarse en sistemas cerrados con ciclos basados en el principio de absorción o adsorción y sistemas abiertos con sistemas de enfriamiento con desecante.

Ciclo por absorción

Igual que en el caso de las máquinas por compresión mecánica de vapor, se aprovecha que todas las sustancias absorben calor cuando se evaporan a baja presión y temperatura. Así como en el sistema de compresión, el ciclo se realiza mediante un compresor mecánico, en el caso de la absorción se basa en la capacidad que tienen las sustancias, como el amoníaco, de absorber otra sustancia, tal como es el agua, en fase vapor.

Funcionamiento del circuito refrigerante

Según la figura 2.3, el vapor de refrigerante proveniente del evaporador (1) es absorbido en el absorbedor (2). La disolución líquida resultante, con alta concentración de refrigerante, se pasa a un nivel de presión superior mediante una bomba (3) hacia el generador (4). Bajo el suministro de calor, el refrigerante se evapora y circula al condensador, donde se condensa cediendo su calor al agua de la torre de enfriamiento (5). Al pasar por la válvula de expansión (6) se expande a un nivel de presión inferior y vuelve a llegar al evaporador (1). De esta manera se cierra en el circuito del refrigerante. La disolución con baja concentración de refrigerante proveniente del generador (4) circula después de pasar por la válvula de expansión (6) hacia el absorbedor, con el fin de absorber el vapor de refrigerante, de esta manera se cierra el circuito de la solución o fluido de trabajo. El proceso se compone de dos circuitos que se interceptan: el circuito de refrigerante y el circuito de la solución de trabajo. El circuito del refrigerante funciona de acuerdo con el principio del desplazamiento de equilibrio térmico de un par de sustancias bajo las diferentes condiciones de temperatura y presión. La transferencia de calor desde el absorbedor (2) y el condensador (5) al ambiente se lleva a cabo a través de una torre de enfriamiento.²

²Transcrito de la referencia Peuser et al. (2004); Pita (2002)

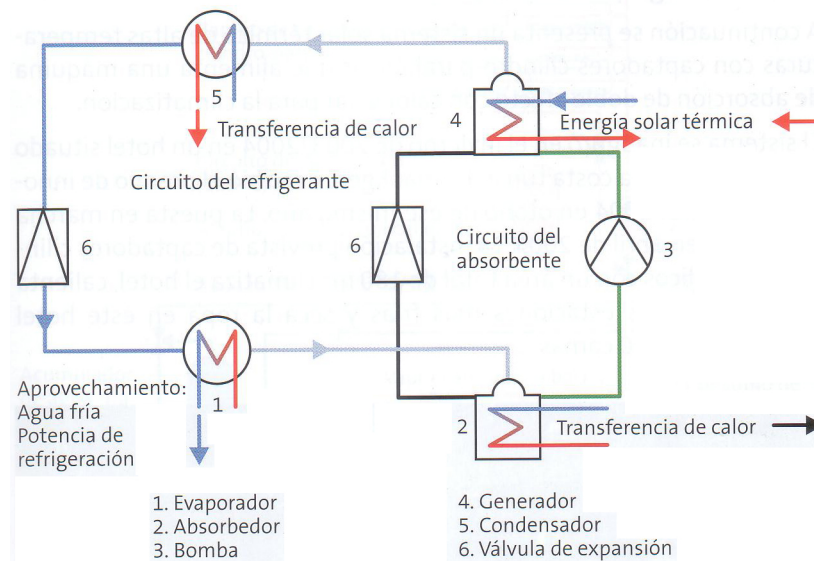


Figura 2.3: Esquema de un ciclo de absorción de simple efecto

Según el nivel de temperaturas del medio a enfriar se utilizan diferentes tipos de sustancias. En el caso de la producción de frío para el aire acondicionado de edificios, suele emplearse el agua como refrigerante y el bromuro de litio como absorbente. Cuando se exigen temperaturas inferior a 0°C se suele emplear amoníaco (NH_3) y agua. Es por ello que se debe seleccionar colectores solares, según se requiera el nivel de temperatura en el generador, en algunos casos se utiliza captadores de tubos de vacío o colectores planos de muy alta eficiencia. El rendimiento de los captadores solares térmicos disminuye al aumentar la temperatura de operación, mientras que el equipo de absorción aumenta con temperaturas elevadas de operación.

Las máquinas basadas en ciclos de absorción, requieren potencias eléctricas bajas, son propensas a pocos desgastes y requieren poco mantenimiento. La eficiencia de los equipos de enfriamiento se describe por medio del Coeficiente de Operación (COP), que se define como la relación entre la energía cedida en el evaporador en potencia frigorífica, y la utilizada para el accionamiento de la unidad de climatización.

$$COP = \frac{\text{Potencia Frigorífica}}{\text{Potencia Térmica}}$$

2.3. Introducción a los sistemas de control

El control automático juega un papel importante en la vida diaria, como control de procesos en industrias y en gran parte de la ingeniería y ciencia, un ejemplo puede ser desde un reloj hasta una nave espacial. Para dar idea de un sistema de control, podemos pensar, a la hora de bañarnos y tener un confort térmico con respecto al agua que utilizamos, si nos vamos más a la raíz, nos encontramos con un calentador de agua (*boiler*), el cual mantiene una temperatura constante que es establecida por el usuario,

aquí tenemos un parámetro como entrada, la temperatura de salida del agua y otro de ellos podría ser la temperatura de entrada del agua, con ello el sistema de control tiene un objetivo que realizar. Con lo anterior se puede decir que los sistemas de control los utilizamos para obtener un fin en un sistema o proceso, donde se tienen parámetros de entrada y salida.

2.3.1. Historia del control automático

En Newton et al. (1957), se cita uno de los primeros empleos de la realimentación en relojes de agua construido por árabes, que trata entre los años 300 a.C. y 1200 d.C. Uno de los primeros sistemas de control fue un reloj de agua desarrollado por el griego Ktesibios, donde su función era mantener un flujo de agua de un tanque a otro tanque mediante un flotador, según el nivel de agua conducido al segundo tanque era el tiempo transcurrido. El reloj con el flotador fue extrapolado por los griegos para distribuir vino de una forma automática. Se siguieron realizando aportes hasta el siglo XVIII, donde la revolución industrial motivó a la creación de motores y máquinas auto-conducidas. James Watt [1788], realizó el primer trabajo significativo en el control automático, que consistió en un regulador centrífugo para el control de velocidad de una máquina de vapor.

Sin embargo, no se puede decir que estos inventos aislados reflejen de algún modo la teoría de control, aproximadamente en el mismo tiempo en que Watt perfeccionaba su regulador centrífugo, tanto Laplace como Fourier desarrollaban sus métodos de transformaciones matemáticas, que son tan importantes en la teoría de control de la actualidad.

En el comienzo de la primera y segunda guerra mundial (1910-1945), se dio la necesidad de control de navegación para barcos, aviones, tanques de guerra y otros, por lo que se estimuló en gran medida una teoría de control. El lapso que se considera como el inicio de la teoría de control, es en el año de 1922 cuando Minorsky trabajó con controladores automáticos para dirigir embarcaciones y mostró que la estabilidad puede determinarse a partir de ecuaciones diferenciales que modelen al sistema. Nyquist (1932), diseñó un procedimiento relativamente simple para determinar la estabilidad de sistemas en lazo cerrado, en base a la respuesta en lazo abierto en estado estable, cuando la entrada aplicada es una senoidal. En 1934, Hazen, quien introdujo el término servomecanismos para los sistemas de control de posición, analizó el diseño de los servomecanismos con relevadores, capaces de seguir con precisión una entrada cambiante. En la época de los cuarenta los métodos de respuesta en frecuencia hicieron posible el diseño de sistemas de control lineal en lazo cerrado que cumplieran requisitos de desempeño. A principios de los cincuenta se desarrolló por completo el método propuesto por Evans, de lugar geométrico de raíces. Aproximadamente en los sesentas se introdujo la era informática, con computadoras que ayudaron al estudio de sistemas complejos en el dominio del tiempo, dando como resultado a partir de esta fecha, una nueva teoría llamada control moderno, llevando su análisis en representación de variables de estado, para enfrentar plantas complejas de múltiples entradas y múltiples

salidas, donde la teoría de control clásica pierde su solides. En el control moderno se estudian técnicas como: control óptimo, adaptativo y robusto.

2.3.2. Sistemas de control realimentado

El control realimentado es un sistema que mantiene una relación prescrita entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control, se denomina sistema de control realimentado. Un ejemplo sería el control de temperatura de una habitación. Midiendo la temperatura real y comparándola con la temperatura de referencia (la temperatura deseada), el termostato activa o desactiva el equipo de calefacción o de enfriamiento para asegurar que la temperatura de la habitación conserve un nivel de confort aceptable, sin considerar las condiciones externas. Los sistemas de control realimentados no se limitan a la ingeniería, sino que también se encuentran en diversos campos ajenos a ella. Por ejemplo, el cuerpo humano es un sistema de control realimentado muy avanzado. Tanto la temperatura corporal como la presión sanguínea se conservan constantes mediante una realimentación fisiológica. De hecho, la realimentación realiza una función vital: vuelve el cuerpo humano relativamente insensible a las perturbaciones externas, por lo cual lo habilita para funcionar en forma adecuada en un ambiente cambiante.

2.3.3. Sistemas de control en lazo cerrado

Los sistemas de control realimentados se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. En la práctica, los términos control realimentado y control en lazo cerrado se usan indistintamente. En un sistema de control en lazo cerrado (ver figura 2.4), se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema.

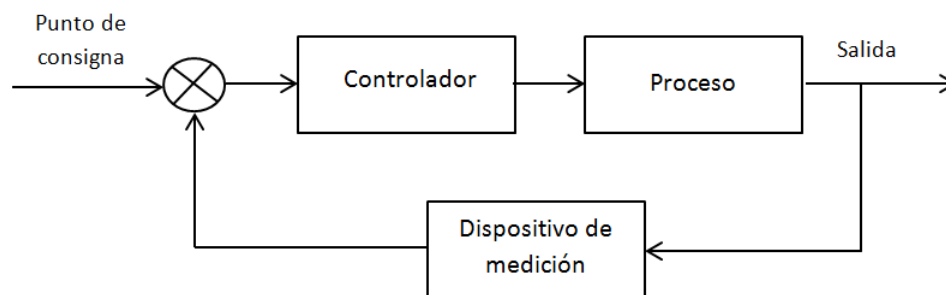


Figura 2.4: Diagrama a bloques de un sistema a lazo cerrado.

2.3.4. Sistemas de control en lazo abierto

Los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada (ver figura 2.5). Un ejemplo práctico es una lavadora. El remojo, el lavado y el enjuague en la lavadora operan con una base de tiempo. La máquina no mide la señal de salida, que es la limpieza de la ropa. En cualquier sistema de control en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia. Por tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija; como resultado, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada. En la práctica, el control en lazo abierto sólo se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas ni externas. Es evidente que estos sistemas no son de control realimentado. Observe que cualquier sistema de control que opere con una base de tiempo es en lazo abierto. Por ejemplo, el control del tránsito mediante señales operadas con una base de tiempo es otro ejemplo de control en lazo abierto.

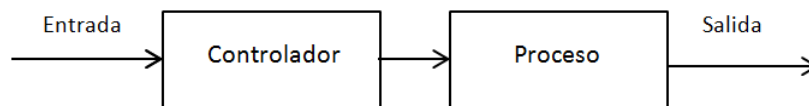


Figura 2.5: Diagrama a bloques de un sistema a lazo abierto.

2.3.5. Sistemas de control en lazo cerrado en comparación con los sistemas en lazo abierto

Una ventaja del sistema de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema. Por tanto, es posible usar componentes relativamente precisos y baratos para obtener el control adecuado de una planta determinada, en tanto que hacer eso es imposible en el caso de un sistema en lazo abierto. Desde el punto de vista de la estabilidad, el sistema de control en lazo abierto es más fácil de desarrollar, porque la estabilidad del sistema no es un problema importante. Por otra parte, la estabilidad es una función principal en el sistema de control en lazo cerrado, lo cual puede conducir a corregir en exceso errores que producen oscilaciones de amplitud constante o cambiante.

Debe señalarse que, para los sistemas en los que se conocen con anticipación las entradas y en los cuales no hay perturbaciones, es aconsejable emplear un control en lazo abierto. Los sistemas de control en lazo cerrado sólo tienen ventajas cuando se presentan perturbaciones y/o variaciones impredecibles en los componentes del sistema. Observe que la valoración de la energía de salida determina en forma parcial el costo, el peso y el tamaño de un sistema de control. La cantidad de componentes usados en

un sistema de control en lazo cerrado es mayor que la que se emplea para un sistema de control equivalente en lazo abierto. Por tanto, el sistema de control en lazo cerrado suele tener costos y potencias más grandes. Para disminuir la energía requerida de un sistema, se emplea un control en lazo abierto cuando puede aplicarse. Por lo general, una combinación adecuada de controles en lazo abierto y en lazo cerrado es menos costosa y ofrecerá un desempeño satisfactorio del sistema general.³

2.3.6. Algoritmos de control clásico

2.3.6.1. Control Todo o Nada

La realimentación se puede realizar de muchas formas diferentes. Un mecanismo de realimentación simple se puede describir como:

$$u = \begin{cases} u_{max}, & \text{si } e > 0 \\ u_{min}, & \text{si } e < 0 \end{cases}, \quad (2.10)$$

donde $e = y_{sp} - y$ es el error de control. Esta ley de control implica que siempre se utiliza una acción correctora máxima. Este tipo de realimentación se llama control on-off. Es simple y no hay parámetros que elegir. El control on-off a menudo funciona al mantener la variable de proceso próxima al punto de consigna, pero generalmente resultará en un sistema donde las variables oscilan. Obsérvese que en la Ecuación 2.10 la variable de control no está definida cuando el error es cero. Es común realizar algunas modificaciones bien introduciendo una histéresis o una zona muerta (Ver figura 2.6).⁴

2.3.6.2. Control proporcional

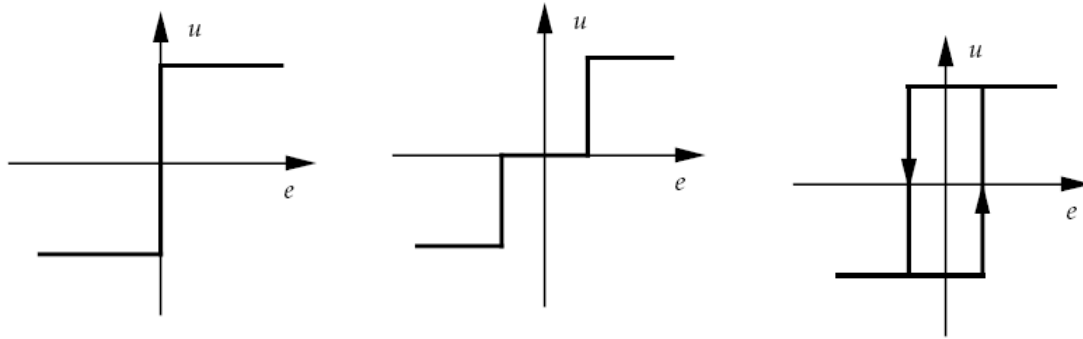
La razón de por qué el control on-off a menudo da lugar a oscilaciones es por que el sistema sobreactúa, ya que un pequeño cambio en el error hará que la variable manipulada varíe entre los valores máximos. Este efecto se evita en el control proporcional, donde la característica del controlador es proporcional al error de control para pequeños errores. Esto se puede conseguir haciendo la señal de control proporcional al error,

$$u = K(y_{sp} - y) = Ke,$$

donde K es la ganancia del controlador.

³Definiciones adoptadas de Ogata (2003) y Rohrs et al. (1994).

⁴Los algoritmos de control clásico se obtuvieron de Åström y Hägglund (2009).



(a) Todo-Nada ideal. (b) Todo-Nada con zona muerta. (c) Todo-Nada con histéresis.

Figura 2.6: Características del controlador Todo-Nada.

2.3.6.3. Control integral

El control proporcional tiene la desventaja de que la variable de proceso a menudo se desvía del punto de consigna. esto se puede evitar haciendo la acción de control proporcional a la integral del error,

$$u(t) = k_i \int_0^t e(\tau) d\tau,$$

donde k_i es la ganancia integral y τ es una constante de tiempo. Esta estrategia se llama control integral. El control integral tiene una propiedad sorprendente. Supóngase que hay un estado estacionario con un error constante e_0 y una señal de control constante u_0 . Se sigue de la ecuación anterior que

$$u_0 = k_i e_0 t,$$

como u_0 es una constante se sigue que e_0 debe ser cero. Hay un estado estacionario y un controlador tiene acción integral, el error en estado estacionario es siempre cero. Esto es también cierto para el controlador PI

$$u(t) = K e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau.$$

Esta es una de las razones de por qué los controladores PI son tan comunes.

2.3.6.4. Control PID

Un refinamiento adicional consiste en dotar al controlador de una capacidad anticipativa utilizando una predicción de la salida basada en una extrapolación lineal. Ver figura 2.7. Esto se puede expresar matemáticamente como:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right).$$

La acción de control es así una suma de tres términos que representan el pasado por la acción integral del error (el término-I), el presente (el término-P) y el futuro por una extrapolación lineal del error (el término-D). El término $e + T_d \frac{de}{dt}$ es una predicción lineal del error T_d unidades de tiempo en el futuro. Los parámetros del controlador se llaman: ganancia proporcional K , tiempo integral T_i , y tiempo derivativo T_d . Se ha comprobado empíricamente que el controlador PID es capaz de resolver un amplio espectro de problemas de control. Hay controladores más complejos que difieren del controlador PID porque utilizan métodos más sofisticados para la predicción.

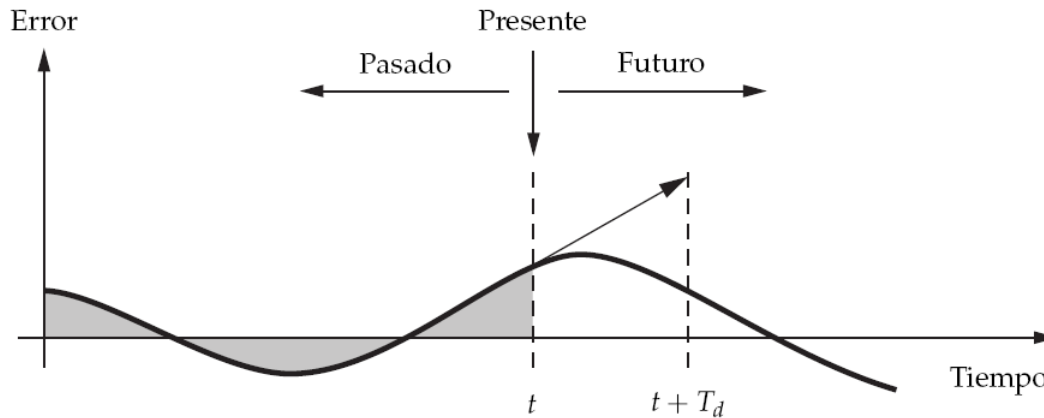


Figura 2.7: Acción de control PID basándose en los errores de control pasados, presentes y futuros.

2.4. Instrumentación

2.4.1. Medición y error

El proceso de medición generalmente refiere el uso de instrumento como medio físico para determinar la magnitud de la variable. Los instrumentos constituyen una extensión de las facultades humanas y en muchos casos permiten a las personas determinar el valor de la cantidad desconocida, la cual no podría medirse utilizando solamente las facultades sensoriales. Por lo tanto, un instrumento se puede definir de la siguiente manera: dispositivo para determinar el valor o la magnitud de una cantidad variable. El instrumento electrónico, como lo indica su nombre, se basa en principios eléctricos o electrónicos para efectuar una medición. Un instrumento electrónico puede ser un aparato relativamente sencillo y de construcción simple, como el medidor básico de

corriente directa. Sin embargo, el desarrollo de la tecnología, demanda la elaboración de mejores instrumentos y más exactos.

2.4.1.1. Sistemas de medición

En general los sistemas de medición están conformados por tres elementos como se muestra en la figura 2.8.

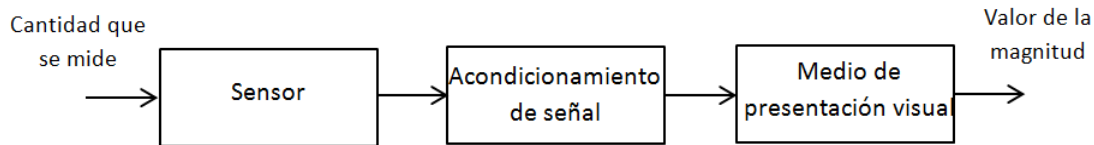


Figura 2.8: Sistema de medición y elementos que lo conforman.

1. Un sensor, es el cual responde a la cantidad que se mide, dando como salida una señal relacionada con dicha cantidad. Un termopar es un ejemplo de un sensor de temperatura y su salida es una fuerza electromotriz, la cual se relaciona con el valor de la temperatura respectiva.
2. Acondicionamiento de señal, el cual toma la señal del sensor y la manipula para convertirla a una forma adecuada para su presentación visual, como en el caso de un sistema de control. Por ejemplo, la salida que produce un termopar, que debe alimentarse a través de un amplificador para obtener una señal mayor. El amplificador es acondicionador de señal.
3. Un sistema de presentación visual, es donde se despliega la salida producida por el acondicionador de señal. Por ejemplo, una aguja que se mueve a través de una escala, o bien una lectura digital.

2.4.1.2. Tipos de error

Ninguna medición se puede realizar con una exactitud perfecta, pero es importante descubrir cuál es la exactitud real y como se generan los diferentes errores en las mediciones. Un estudio de los errores es el primer paso al buscar modos de reducirlos con el objeto de establecer la exactitud de los resultados finales.

Los errores pueden provenir de diferentes fuentes y por lo general se clasifican en tres categorías principales⁵:

1. Errores humanos, son de origen humano, como mala lectura en los instrumentos, ajuste incorrecto y aplicación inapropiada, así como equivocaciones en los cálculos.

⁵Definiciones en esta sección por Pérez (1991); Bolton (1996); Acevedo (2006); Helfrick y Cooper (1991); Mendiburu (1997)

- a) *Errores de lectura*: el operador realiza una lectura incorrecta de un valor o de escala.
 - b) *Errores de cálculo*: el operador realiza un fallo en la realización de un cálculo.
 - c) *Instrumento incorrecto*: el operador elige un instrumento o método de medida incorrecto y, así, obtiene resultados falsos.
 - d) *Ajuste incorrecto*: el operador ajusta incorrectamente alguna función del sistema de medida.
2. Errores sistemáticos, se deben a falla de los instrumentos, como partes defectuosas o gastadas sobre el equipo.
- a) *Errores de fabricación*: estos errores son los que resultan del proceso de fabricación del instrumento y de los componentes utilizados.
 - b) *Errores de equipo*: se producen debido a un fallo en el instrumento en el que se realiza una calibración incorrecta.
3. Errores aleatorios ocurren por causas que no se pueden establecer directamente debido a variaciones aleatorias en los parámetros o los sistemas de medición.
- a) *Errores estocásticos*: la presión debida a un gas es inherentemente aleatoria ya que es el resultado del movimiento aleatorio de las moléculas del gas.
 - b) *Errores ambientales*: se deben a las condiciones externas que afectan la operación del dispositivo de medición, incluyendo las condiciones del área circundante.

2.4.2. Reducción de errores

Difícilmente los instrumentos son utilizados en un espacio a temperatura constante, en una mesa aislada de vibraciones, y un apantallamiento de campos magnéticos y eléctricos, por ello, los instrumentos pueden estar sometidos bajo interferencias o ruido.

Los errores aleatorios pueden ser reducidos tomando muchas medidas y aplicaciones de análisis estadístico, para ayudar a conseguir un sistema de medición para minimizar las interferencias de las fluctuaciones ambientales. Algunos errores sistemáticos pueden ser reducidos con una inspección cuidadosa y mantenimiento de los instrumentos para asegurar utilidades correctas.

Los errores humanos no pueden ser estimados. Pueden disminuir cuando dos o más personas tomen lecturas, pero la principal manera es poner atención especial en lo que se está haciendo y entender completamente las técnicas utilizadas y las limitaciones y prestaciones de los instrumentos.

Los errores aleatorios se analizan con una repetición de medidas de una cantidad particular, Los métodos estadísticos pueden ser utilizados para encontrar el valor más probable con cualquier medida. La técnica más frecuentemente utilizada para llegar al

valor más probable de una serie de mediciones de alguna cantidad sometida a errores aleatorios, es la determinación de la media aritmética o promedio.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}. \quad (2.11)$$

Entre mayor número de lecturas, más fiable será la media y la mayoría de los errores serán promediados. Con un gran número de resultados la media se hará más fiable. Tal media en ocasiones, recibe el nombre de media verdadera o mejor valor.

2.4.3. Transductores

Un sistema de instrumentación electrónico consiste en varios componentes que se utilizan para realizar una medición y registrar el resultado. Por lo general consta de tres elementos principales: un dispositivo de entrada, un acondicionador de señal o dispositivo de procesamiento y un dispositivo de salida. El dispositivo de entrada recibe la cantidad por medir y envía una señal eléctrica proporcional al dispositivo acondicionador de señal. Aquí la señal se amplifica, se filtra o se modifica en un formato para el dispositivo de salida. Este puede ser un simple medidor indicador, un osciloscopio o un registrador para representación visual⁶.

Los dispositivos de entrada se conocen, a menudo, como sensores, detectores, captadores, sondas y más frecuentemente llamados transductores.

Una definición de transductor, es un dispositivo que al ser afectado por la energía de un sistema de transmisión, proporciona energía en la misma forma o en otra a un segundo sistema de transmisión. Esta transmisión de energía puede ser eléctrica, mecánica, química, óptica (radiante) o térmica.

Existen transductores pasivos los cuales no requieren una potencia externa, produciendo una variación en algún parámetro eléctrico, como resistencia, capacitancia, etc., que se pueden medir con una variación de voltaje o corriente. Una segunda categoría corresponde a transductores del tipo de activos (auto-generación) que generan un voltaje o corriente análoga cuando son estimulados por medio de alguna forma física de energía. Los transductores de auto-generación no requieren potencia externa (por ejemplo, un termopar).

La selección del transductor apropiado es, por consiguiente, el primero y tal vez el paso más importante en la obtención de resultados exactos. Un número de preguntas elementales se deben hacer antes de seleccionar un transductor, por ejemplo,

1. ¿Cuál es la entrada del transductor, es decir, el tipo de señal y su escala?
2. ¿Cuál es el principio de transductor, que es mejor para medir esta señal?

⁶Definiciones en esta sección por Pérez (1991); Bolton (1996, 2001); Helfrick y Cooper (1991); Acevedo (2006)

3. ¿Qué características, es decir, precisión, sensibilidad, exactitud, tiempo de respuesta, resolución, linealidad, potencia necesaria, coste, etc., se requiere para el transductor?
4. ¿Qué características se requieren a la salida del transductor para que este sea compatible con el resto del sistema de medida?
5. ¿Cuáles son las condiciones ambientales, por ejemplo, temperatura, humedad, compuestos químicos corrosivos, en las que tendrá que trabajar el transductor?

2.4.3.1. Transductor de temperatura

El fenómeno físico con mayor frecuencia en ser medido es la temperatura, ya sea para controlar o monitorear procesos. comúnmente se utilizan los 4 siguientes tipos de transductores.

Detector de temperatura por resistencia (RTD), este tipo de sensor se basa en la propiedad de un material que varía su resistencia eléctrica de acuerdo a la temperatura, unos de los metales más utilizado son el platino y níquel. La resistencia está dada por la siguiente ecuación:

$$R = R_0 (1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \dots + \alpha_n T^n), \quad (2.12)$$

donde R es la resistencia del material, R_0 es la resistencia a temperatura de referencia y α es el coeficiente térmico que depende de cada material, en la tabla 2.2 se ilustran las características de los 3 elementos más utilizados.

Table 2.2: Descripción de diferentes metales usados en RTD's.

Metal	Resistividad	Coef. de temp.	Rango de op.(°C)	Costo	Presición (%)
Platino	9.83	0.00385	-200 a 900	Alto	±0.01
Níquel	6.38	0.0063-0.0066	-150 a 300	Medio	±0.5
Cobre	1.56	0.00425	-200 a 120	Bajo	±0.1

La Ecuación 2.12 también puede expresarse de la siguiente manera:

$$R = R_0(1 + \alpha T), \quad (2.13)$$

es de vital importancia considerar bajas corrientes que circulen a través de ellos para evitar auto-calentamiento.

Termistor, Los termistores son pequeñas piezas de materiales hechos con la mezcla de óxidos metálicos, por ejemplo, de cromo, cobalto, hierro, manganeso y níquel. Todos estos óxidos son semiconductores. La resistencia de los termistores convencionales de óxido metálico disminuye de una manera no lineal con el aumento de la temperatura.

Estos tienen coeficientes de temperatura negativos (CTN), aunque también los hay con coeficientes de temperatura positivos (CTP). El cambio de la resistencia por cada grado de temperatura que cambia es mucho mayor que la que ocurre con los metales. La relación de resistencia- temperatura de un termistor se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$R_t = K e^{\beta/t},$$

donde R_t es la resistencia eléctrica a la temperatura t , K y β son constantes del material. En comparación con otros sensores de temperatura, los termistores ofrecen ventajas como: su resistencia mecánica y las pequeñas dimensiones que puede ser fabricado. Gracias a su tamaño reducido, pueden realizarse mediciones de temperaturas en casi cualquier punto, además de responder rápidamente a los cambios de temperatura, sin embargo una desventaja muy grande que poseen es su no linealidad.

Termopar, cuando dos metales se unen, en el sitio de unión se produce una diferencia de potencial. Esta depende de los metales utilizados y la temperatura de unión. Si ambas uniones se encuentran a la misma temperatura, no existe fuerza electromotriz (E). En cambio, si la temperatura es diferente, si se produce esta fuerza electromotriz. El valor E de esta dependerá de los metales utilizados y de las temperaturas t de ambas uniones. Por lo general de una de ellas se mantiene a $0^\circ C$, cumpliendo el grado razonable la siguiente relación:

$$E = at + bt^2,$$

donde a y b son las constantes de los metales utilizados.

2.4.4. Instrumentos de medición solar

La manera de obtener la radiación incidente en una superficie es una medición real. Hay dos formas de mediciones cualitativas y cuantitativas. Las mediciones cualitativas permiten obtener una idea característica de la radiación más no obtener su magnitud. Las cuantitativas dan como resultado la magnitud de la medición.

Cualitativos

Heliógrafo, es un aparato meteorológico que mide la duración de la insolación diaria.

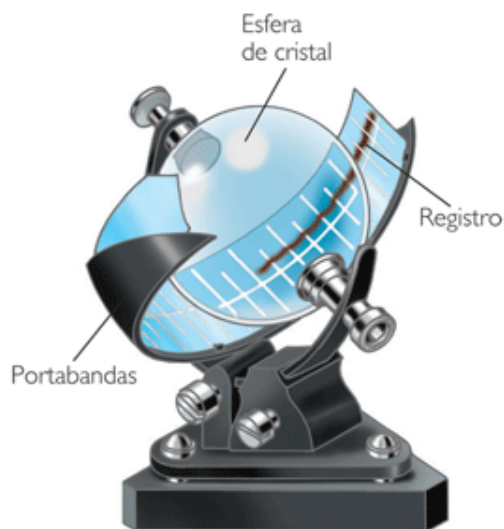


Figura 2.9: Heliógrafo común.

Cuantitativos

Piranómetro, es un instrumento para medir la radiación total (directa y difusa) en una superficie horizontal. Si se utiliza un anillo con un sistema de seguimiento que sombree la radiación directa, se mide la radiación difusa. El mostrado en la figura 2.10a, usa una termo-pila para censar la radiación solar. El mostrado en 2.10b usa como sensor a una celda solar de silicio cristalino.

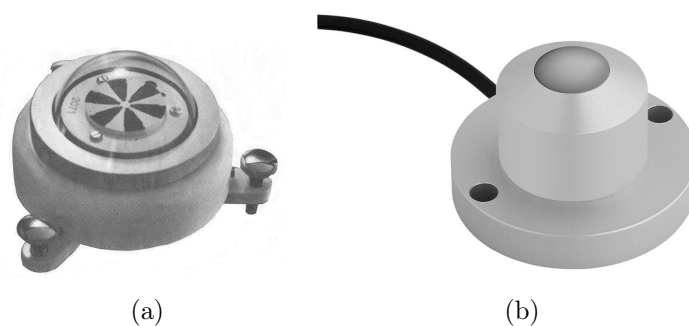


Figura 2.10: Piranómetro de uso común.

Pirheliómetro, es un instrumento para medir la radiación directa. Para que pueda medir la radiación directa a lo largo del día es necesario montarlo en un sistema de seguimiento solar como el mostrado en la figura 2.11b.

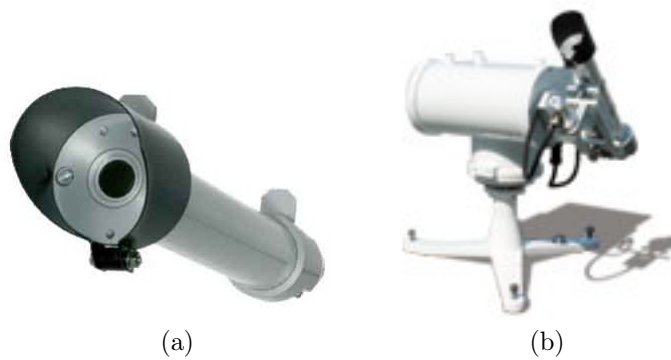


Figura 2.11: Pirheliómetro de uso común.

Capítulo 3

Estudio teórico por medio de la simulación dinámica del sistema de enfriamiento

En esta sección se muestra la descripción física y operativa del sistema de climatización propuesto, además de un análisis basado en simulación dinámica a través del entorno TRNSYS, con el objetivo de realizar un estudio de sensibilización del sistema y un análisis comparativo de las diferentes estrategias de control Todo-Nada, Retroalimentación Iterativa, *If-Else* y PID, para seleccionar la de mejor desempeño. Además de una propuesta para implementar en hardware el Controlador del Sistema de Aire Acondicionado Solar (CSAAS) y diagrama de tuberías donde se muestra la configuración final del Sistema Aire Acondicionado Solar (SAAS).

3.1. Descripción del sistema convencional

El sistema convencional consta de un equipo de enfriamiento por absorción, un circuito hidráulico y el circuito de aire, que se interconectan entre sí, para formar el sistema de climatización de espacios correccional.

3.1.1. Unidad de enfriamiento

La instalación del sistema de climatización dispone de un máquina de enfriamiento de la compañía Robur con modelo ACF60-00-HT (ver figura 3.1 y tabla 3.1), el equipo está basado en un ciclo por absorción con una solución de trabajo amoniaco-agua ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$), que produce una capacidad de enfriamiento de acuerdo a la tabla 3.2.



Figura 3.1: Equipo ACF-60 versiones HT,TK, y LB.

Tabla 3.1: Información técnica del equipo ACF60-00 HT.

Clasificación de operación	Unidades	ACF-60-00 HT
Capacidad de enfriamiento	kW	17.10
Entrada de gas	kW	27.78
COP	-	0.64
Temperatura ambiente de operación	C	0-50
Temperatura del circuito de agua	C	5-45
Flujo del agua	<i>l/s</i>	0.96-0.88
Refrigerante	-	R717

El equipo de absorción opera con una fuente de energía térmica a fuego directo proporcionada por un quemador de gas natural, el calor provoca que el ciclo por absorción produzca el efecto frigorífico en el evaporador, donde en al agua que entrante a la unidad cede calor, para bajar su temperatura.

Tabla 3.2: Capacidad de enfriamiento del equipo ACF60-00-HT, de acuerdo a diferentes condiciones de operación.

Temp. ambiente (°C)	Temperatura de salida de la unidad ACF60-00-HT				
	5 °C	7°C	10°C	12.5°C	14°C
4	17.46	17.46	17.46	17.46	17.63
6	17.46	17.46	17.46	17.46	17.63
8	17.46	17.46	17.46	17.46	17.63
10	17.46	17.46	17.46	17.46	17.63
12	17.46	17.46	17.46	17.46	17.63
14	17.46	17.46	17.46	17.46	17.63
16	17.46	17.46	17.46	17.46	17.63
18	17.46	17.46	17.46	17.46	17.63
20	17.46	17.46	17.46	17.46	17.63
22	17.46	17.46	17.46	17.46	17.63
24	17.46	17.46	17.46	17.46	17.63
26	17.29	17.46	17.46	17.46	17.63
28	17.29	17.46	17.46	17.46	17.63
30	17.29	17.46	17.46	17.46	17.63
32	16.94	17.46	17.46	17.46	17.63
34	16.43	17.29	17.29	17.29	17.46
35	16.09	17.09	17.09	17.09	17.46
36	15.75	16.94	17.91	17.91	17.46
38	14.89	16.60	16.94	16.94	17.29
40	14.03	15.92	16.60	16.77	17.12
42		15.06	16.09	16.60	16.94
44		14.03	15.57	16.26	16.60
46			14.72	15.75	16.26
48			13.69	14.89	15.57
50				13.86	14.72

3.1.2. Circuito hidráulico

El fabricante de la unidad propone la configuración de la figura 3.2, donde se observa una serie de componentes como: mangueras flexibles (para disminuir vibraciones), dispositivos de protección (filtro de agua y tanque de expansión térmica) e instrumentación (para el ajuste del equipo). Como elementos opcionales se maneja un sistema de control y monitoreo para la unidad de enfriamiento, por último un tanque de almacenamiento de no más de 70 litros, que se recomienda para absorber variaciones térmicas del agua entrante del sistema de enfriamiento, y con ello disminuir el tiempo de

trabajo de la unidad y reducir el consumo de energía, que consecuentemente se traduce en ahorro de dinero.

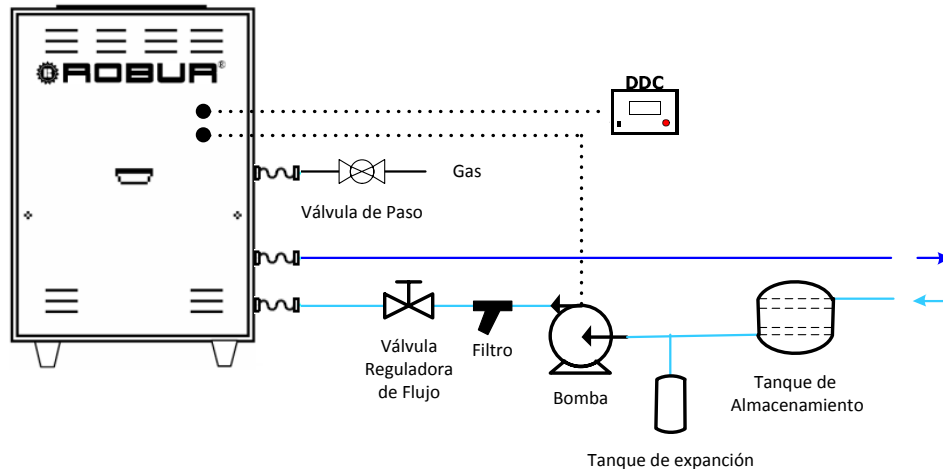


Figura 3.2: Configuración del circuito hidráulico convencional.

3.1.3. Circuito de aire

El circuito de aire es el medio de intercambio de calor entre el espacio a climatizar y el agua fría proveniente del sistema de enfriamiento, y se compone de una unidad manejadora con una capacidad de 18 kW (5 ton).

3.1.4. Funcionamiento del sistema convencional

Al encender el sistema de climatización para mantener la vivienda a una temperatura de confort, comienza a trabajar la bomba del circuito de agua fría, la unidad de enfriamiento y la unidad manejadora de aire. La bomba del circuito hidráulico hace circular agua entre la unidad de enfriamiento y la manejadora de aire, con ello la unidad de enfriamiento recibe agua a una temperatura entre los 12.5 y $45^{\circ}C$, si la capacidad de la unidad es suficiente, el agua es expulsada a $5^{\circ}C$, para trasladarse a la entrada de la unidad manejadora, donde intercambia calor con el aire contenido en el espacio a climatizar, y con ello conseguir el efecto frigorífico solicitado. Después de absorber calor, el agua sale de la manejadora con una temperatura entre 12.5 y $45^{\circ}C$, para ser dirigida nuevamente hacia el sistema de enfriamiento. En el circuito de aire, cuando la temperatura de consigna es alcanzada, el sistema de control envía una señal de apagado hacia la unidad de enfriamiento, de lo contrario la unidad permanece encendida.

3.2. Descripción del sistema propuesto

El sistema propuesto consiste en modificar el sistema convencional, de tal manera que se remplace el combustible fósil por fuentes de energías renovables (energía solar y biogas). La reingeniería consiste en modificar el quemador de gas natural del equipo de absorción, para trabajar con biogas, además de acoplar un campo de colectores para proveer de energía térmica al sistema por absorción.

Por lo que el sistema de climatización solar propuesto se compone de un campo de colectores solares, un equipo de enfriamiento por absorción, un circuito hidráulico y un circuito de aire, que se interconectan entre si, para formar el sistema de climatización solar.

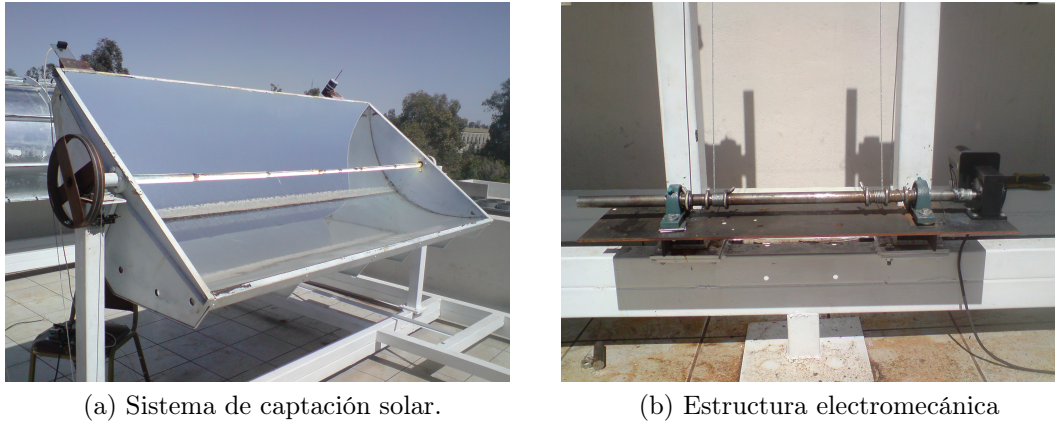
El campo de colectores se acopló a la unidad de enfriamiento, con la finalidad de calentar la solución de trabajo de forma directa y activar el ciclo por absorción, debido a ello la instalación depende de variables climáticas como lo son: temperatura ambiente, humedad y principalmente de la radiación solar, la que suministra la fuente de energía, varía con respecto a factores que no pueden ser controlados, como pueden ser: climatológicos, geológico y astronómicos, debido a ello el sistema debe tener la flexibilidad de ajustarse ante las posibles perturbaciones que pudiesen ser provocadas por la fuente de energía, con el objetivo de aprovechar al máximo el recurso solar, se considero lo siguiente:

1. Utilizar energía solar para climatización.
2. Capacidad de almacenar energía solar, para utilizarla en la climatización de la vivienda.
3. Utilizar la potencia frigorífica necesaria para climatización de espacios y almacenar el excedente.
4. Operar la unidad de enfriamiento con energía solar-biogas cuando no haya recurso solar y almacenamiento.

3.2.1. Campo de colectores

El campo de colectores se encuentra conformado por 6 concentradores cilindros parabólicos con un área total de colección de $18.9 m^2$, orientados Este-Oeste, sin inclinación con respecto a la horizontal, cada colector consta de un área de apertura de $1.3 \times 2.4 m$, montado en una estructura rígida con un motor de desplazamiento angular, que por medio de chumaseras en los extremos permite un giro de Norte-Sur (ver figura 3.3a).

Los concentradores se encuentran unidos en pares por un mecanismo de seguimiento mostrado en la figura 3.3b, que consiste en un motor con una flecha de $2.5 cm$ (1") de diámetro, interconectada a una polea de $30.5 cm$ (13"), que mueve directamente el colector mediante un cable de acero.



(a) Sistema de captación solar.

(b) Estructura electromecánica

Figura 3.3: Sistema de captación solar cilindro parabólico.

3.2.2. Funcionamiento del sistema propuesto

El funcionamiento de la unidad de enfriamiento se basó al analizar los distintos escenarios en que puede trabajar el sistema de climatización, para ello se propone la configuración de la figura 3.4 y los siguientes modos de operación:

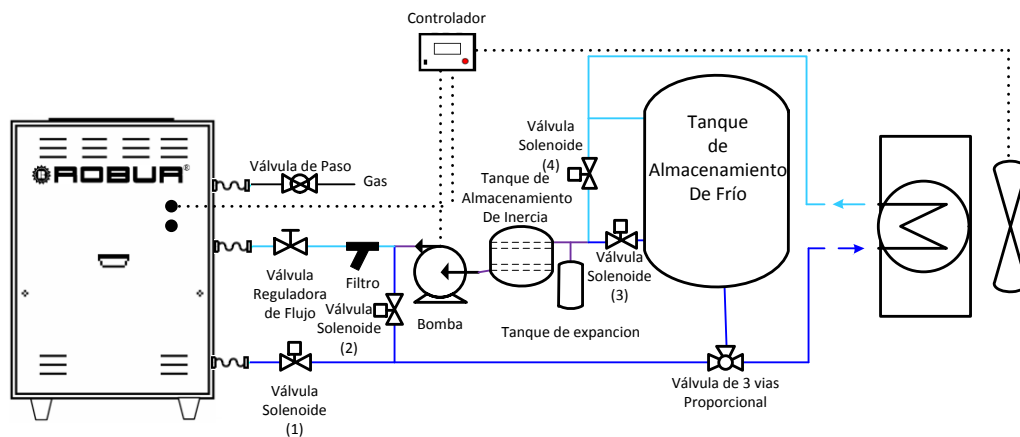


Figura 3.4: Configuración propuesta para el circuito hidráulico de agua fría.

- Modo 0 : El sistema permanece Totalmente apagado:** todos los componentes del sistema de enfriamiento se encuentran desactivados. Este modo entra en acción cuando la temperatura de la vivienda esta por debajo de la temperatura de referencia o simplemente el usuario apaga manualmente el sistema de enfriamiento. La apertura de las válvulas solenoides se puede ver en la tabla 3.4.
- Modo 1 : Equipo de absorción como generador de frío para almacenamiento mediante energía solar:** El generador de la unidad opera

con el campo de colectores, mientras que el evaporador le retira calor al agua del circuito hidráulico, y por medio de la válvula proporcional de 3 vías se direcciona el flujo total hacia el tanque de almacenamiento de frío.

Para activar este modo de operación se verifica la existencia de radiación solar suficiente para activar la máquina por absorción, además de no necesitar climatización en el espacio. La apertura de las válvulas solenoides se puede ver en la tabla 3.4.

- **Modo 2 : Equipo de absorción como generador de frío para climatización y almacenamiento mediante energía solar:** El generador de la unidad opera con el campo de colectores, mientras que el evaporador le retira calor al agua del circuito hidráulico, y por medio de la válvula proporcional de 3 vías se direcciona porcentajes de flujo hacia la entrada de la unidad manejadora y el tanque de almacenamiento de frío, la decisión se toma en base a la temperatura de referencia de la vivienda. La apertura de las válvulas solenoides se puede ver en la tabla 3.4.

Para activar este modo de operación se verifica la existencia de radiación solar suficiente para activar la máquina por absorción.

- **Modo 3 : Climatización del espacio con reserva de frío:** Cuando el recurso solar no es suficiente para activar el equipo por absorción, y a su vez existe reserva de frío, el campo de colectores y el equipo por absorción permanecen sin funcionamiento, por lo que se utiliza el tanque de almacenamiento para satisfacer la demanda de agua fría de la manejadora, con el objetivo de brindar confort en la vivienda. La apertura de las válvulas solenoides se puede ver en la tabla 3.4.

Este modo solamente es activado si el modo 2 no se cumple, además es necesario contar con reserva de frío.

- **Modo 4 : Equipo de absorción como generador de frío para climatización y almacenamiento con fuego directo:** El generador de la unidad opera a fuego directo mientras el evaporador le retira calor al agua del circuito hidráulico, y por medio de la válvula proporcional de 3 vías se direccionan porcentajes de flujo hacia la manejadora y el tanque de almacenamiento según sea la demanda de frío, la decisión se toma en base a la temperatura de referencia de la vivienda. Esto se hace con el fin de evitar las numerosas conmutaciones de encendido, a causa de un controlador convencional *on-off* en el equipo Robur, es decir, la unidad no está diseñada para trabajar a cargas parciales, sólo puede ser encendida o apagada, esto induce a un apagado constantemente al llegar al punto de consigna. En el lapso en el que el equipo es apagado, el ciclo de enfriamiento tiende a un equilibrio térmico, lo que provoca flujos de calor al exterior e igualaciones de presiones internas que se traducen en pérdidas de energía. Para evitar lo antes mencionado, el equipo se somete a la carga provocada por la vivienda y el tanque de almacenamiento, con ello se obliga al sistema de enfriamiento a trabajar a plena potencia, generando periodos de trabajo más

amplios al operar con biogas y tanque de almacenamiento, al mismo tiempo se reducen las pérdidas de energía que ocasiona la frecuencia de oscilación entre encendido y apagado. La apertura de las válvulas solenoides se puede ver en la tabla 3.4.

Este modo de operación entra en acción si no se cumple el modo 2 y 3.

Tabla 3.4: tabla de verdad de las válvulas solenoides del circuito hidráulico propuesto.

Modo	V1	V2	V3	V4
0	1	0	0	1
1	1	0	0	1
2	1	0	0	1
3	0	1	1	0
4	1	0	0	1

Al cumplir con los puntos anteriores mediante los modos de operación, esto permite incrementar la fracción solar en la operación del equipo, así como el manejo eficiente de energía sin perder el nivel térmico que se desea obtener.

3.3. Adecuación del simulador TRNSYS v.16 y creación de módulos

TRNSYS es un ambiente completo y amplio para simular sistemas en el estado transiente, con una trayectoria desde hace más de 25 años, utilizado por ingenieros e investigadores alrededor del mundo para estudiar nuevos relacionados con el consumo de energía, que va desde un simple calentamiento de agua doméstico hasta la simulación de grandes plantas y equipos, incluyendo estrategias de control y las principales fuentes de energías limpias. TRNSYS contiene una amplia librería de equipos basados en modelos matemáticos y resultados experimentales, cada modulo se manejan como una caja negra con entradas y salidas llamados *Types*, también permite la creación de estos módulos en lenguajes como C, Fortran, Pascal, etc.

Para obtener la dinámica del sistema de enfriamiento operado a fuego directo en el entorno de simulación, se utilizó el Type102 siendo un sistema de climatización enfriado por aire, el cual se conforma por un modelo simplificado que se basa en un híbrido entre ecuaciones y resultados experimentales. El modelo del *type* para simular la unidad comienza por obtener el Coeficiente de Operación Nominal (COP_{nom}) y la capacidad de enfriamiento (Q_{cap}), utilizando la información de las condiciones actuales de la unidad. Para calcular la energía que se necesita retirar al agua de entrada del equipo de absorción y llevarla al punto de consigna, se obtiene mediante:

$$Q_{carga} = \dot{m}Cp(T_{entrada} - T_{ref}), \quad (3.1)$$

la capacidad de la unidad de enfriamiento se obtiene por:

$$Q_u = \begin{cases} Q_{carga} & \text{si } Q_{carga} \geq Q_{cap} \\ Q_{cap} & \text{si } Q_{carga} \leq Q_{cap} \end{cases},$$

la temperatura de salida del circuito de agua fría se calcula por:

$$T_{salida} = T_{entrada} - \frac{Q_u}{\dot{m}Cp},$$

la energía disipada por la unidad de enfriamiento se obtiene por la suma de la energía entrante en el generador (Q_{gen}) y la energía absorbida por el evaporador,

$$Q_{dis} = Q_{gen} + Q_u,$$

el COP a las condiciones actuales es:

$$COP = \frac{COP_{nom}Q_u}{Q_c},$$

donde el COP_{nom} y Q_c son resultados experimentales almacenados en un archivo con un formato especial conteniendo las variables de COP y capacidad a diferentes temperaturas ambiente y temperaturas de salida del agua fría, estos datos se obtuvieron procesando la información de la tabla 3.2.

Para obtener un comportamiento similar a la realidad en cuanto a variables climatológicas, se utiliza un modulo capaz de leer archivos de formato TMY (*type109*), este tipo de archivo contiene información climatológica de un año típico de Mexicali B.C., en intervalos horarios, además se agregan módulos como la carta psicométrica (*Type33e*) para el cálculo de propiedades.

La demanda de enfriamiento proviene de una vivienda representada por el *type56* que simula el comportamiento térmico de las diferentes zonas de la vivienda, a partir un archivo creado con la herramienta TRNBuild que requiere parámetros como lo es, el área del envolvente de la vivienda y propiedades de los materiales constructivos. La vivienda simulada consistió de un espacio de 10m×10m×2.5m con una carga térmica de 13.6 kW (4 toneladas), debido a que la unidad bajo condiciones promedio de Mexicali cuenta con la capacidad de 4ton. El medio de intercambio de calor entre el espacio a climatizar y el agua fría proveniente del sistema de enfriamiento o del almacenamiento de frío, se utilizó el módulo *type32*, que es una manejadora de aire con los parámetros de un equipo comercial marca Carrier modelo 50RHC, con capacidad de 1.5 a 5 toneladas.

La interconexión de los componentes del sistema final bajo entorno de simulación se muestra en la figura 3.5. En la tabla 3.5, se muestra un resumen de los módulos que conforman el circuito hidráulico y en la tabla 3.6, se pueden observar componentes adicionales que facilitaron el análisis de la simulación.

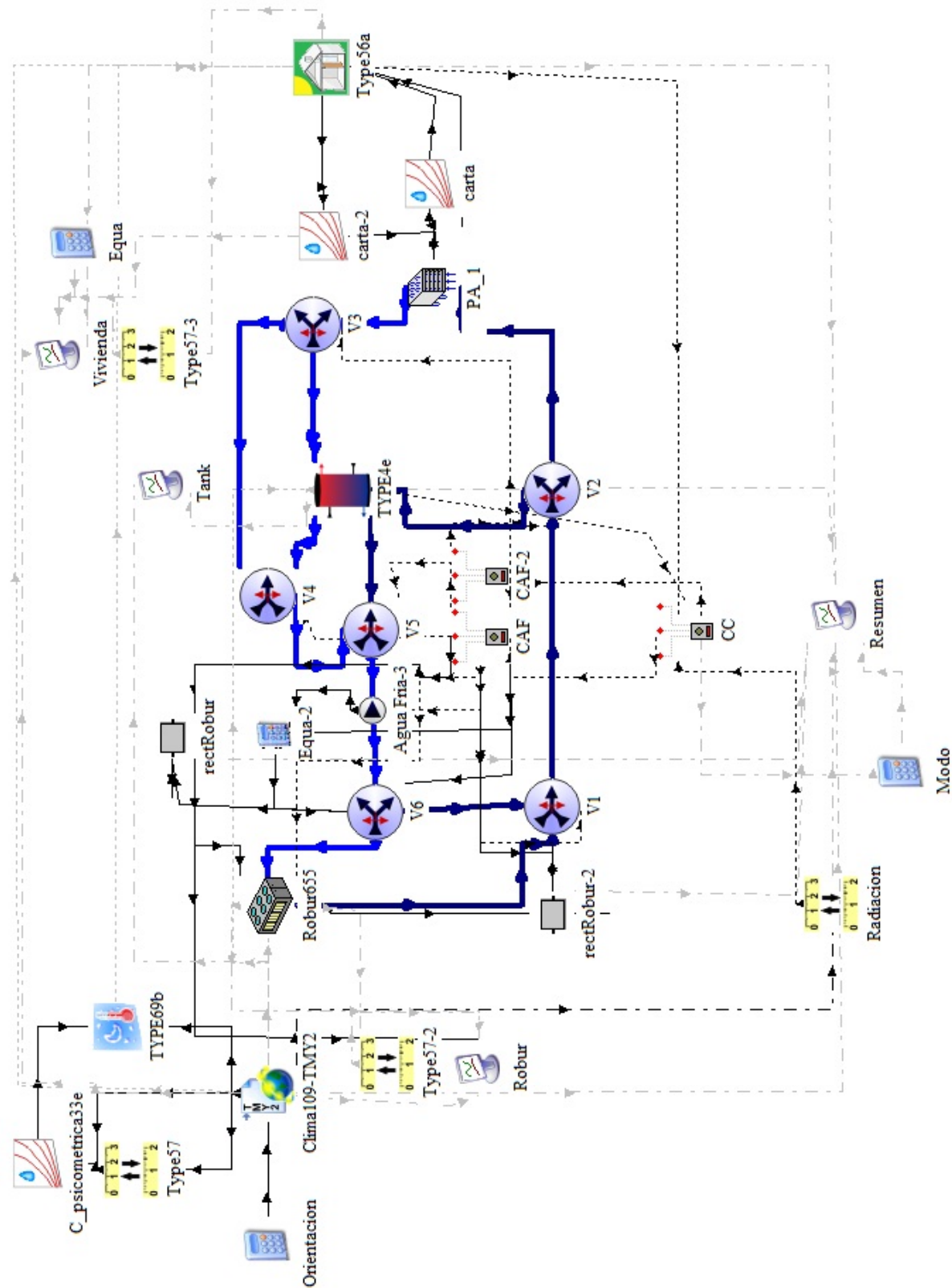


Figura 3.5: Configuración del sistema bajo el entorno de simulación TRNSYS

Tabla 3.5: Módulos contenidos en el circuito hidráulico de agua fría.

Cantidad	Descripción	#Type
1	Bomba	3d
3	Mezclador	11d
3	Diversor	11f
1	Tanque de almacenamiento de frío	4e
1	Manejadora de aire	32

Tabla 3.6: Módulos de uso general utilizados en la simulación.

Cantidad	Descripción	#Type
4	Convertor de unidades	57
2	Carta psicométrica	33e
2	Lector TMY	109
5	Graficador	65a
3	Editor de ecuaciones	32

TRNSYS nos proporciona una serie de módulos para crear proyectos generales y específicos, sin embargo, en este caso no se dispone de un *type* capaz de proporcionar el control de válvulas con el comportamiento deseado, por lo que hubo la necesidad de desarrollar un módulo para el control del circuito de agua fría, en la figura 3.6 se muestra las salidas para controlar las válvulas, el sistema de enfriamiento y la manejadora de aire, según sea el modo de operación. La decisión para cambiar entre cada modo de operación es tomada de acuerdo a la temperatura de la vivienda y la disponibilidad del recurso solar.

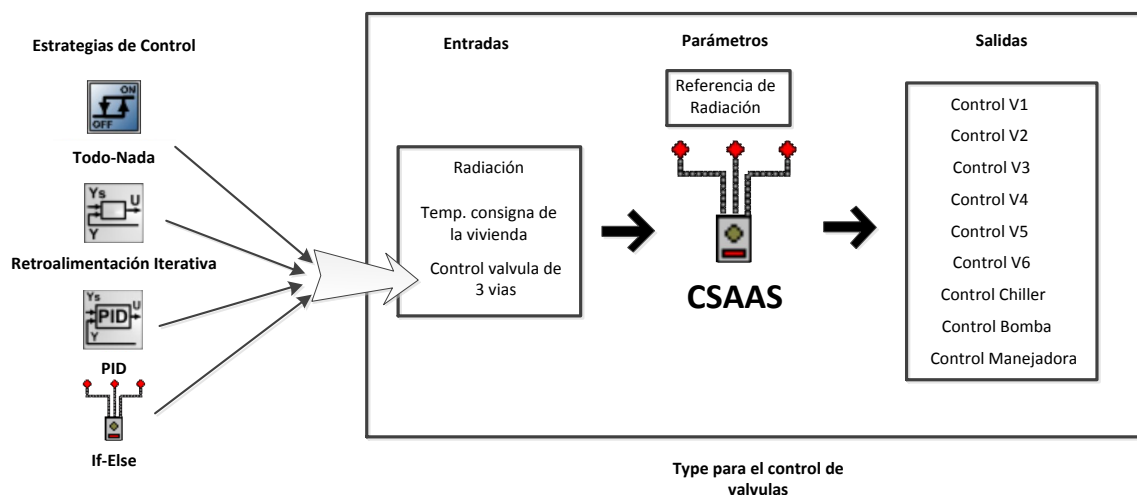


Figura 3.6: Parámetros, entradas y salidas del módulo creado para el control del circuito de agua fría.

Para controlar la temperatura de la vivienda, el *type* cuenta con una señal de entrada para manipular el porcentaje de flujo de la válvula de 3 vías, mediante esta entrada se pueden conectar diferentes tipos de controladores, para realizar una comparativa entre ellos. El algoritmo de control CSAAS mostrado en la figura 3.7 se codificó y compiló en el lenguaje de programación Fortran, bajo las normas de TRNSYS.

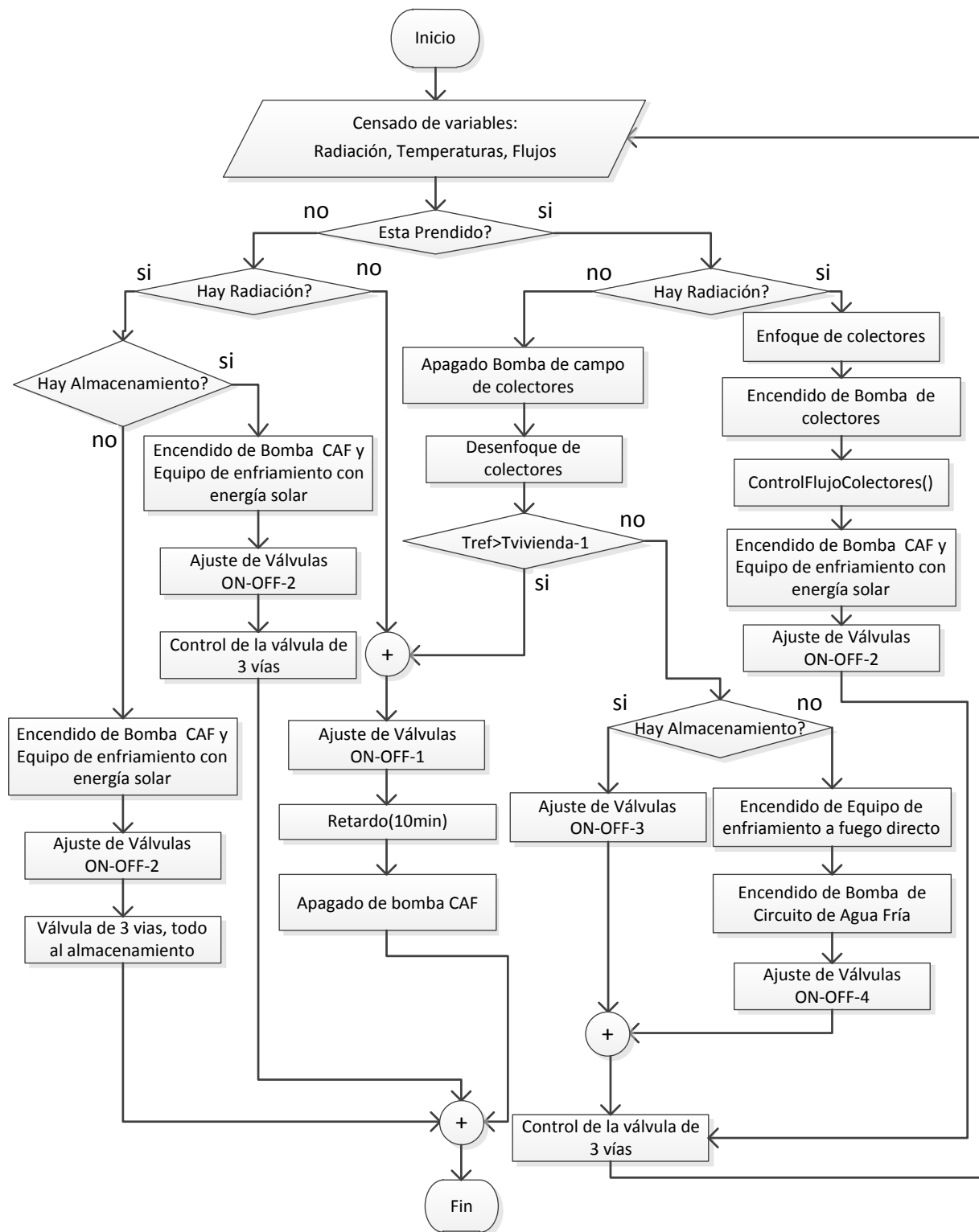


Figura 3.7: Algoritmo propuesto para el sistema de control CSAAS.

3.4. Estudio de diferentes estrategias de control

Para seleccionar el controlador con el mejor desempeño, se realizó un análisis teórico basado en la simulación dinámica del sistema de enfriamiento solar operado bajo diferentes estrategias de control.

Las estrategias de control elegidas consisten en el control Todo o Nada, Retroalimentación Iterativa, clásico PID y por último un control heurístico basado reglas *if* y *else*.

3.4.1. Control *Todo-Nada*

En este caso la válvula proporcional de 3 vías funciona como una válvula todo o nada. Cuando la temperatura de la vivienda esta por encima del punto de consigna (*setpoint*), todo el flujo es enviado a la manejadora, de lo contrario cuando el flujo es direccionado al tanque almacenamiento de frío. Como único parámetro introducido es la temperatura de consigna y el umbral de histéresis.

3.4.2. Control por Retroalimentación Iterativa

El control de Retroalimentación Iterativa determina el porcentaje de flujo requerido en la unidad manejadora para mantener la temperatura de la vivienda. El controlador puede ser usado como un controlador real por retroalimentación que puede ser adaptado a una señal continua.

Este controlador utiliza el método numérico de la secante para determinar el valor de la señal de control, como configuración se requiere el punto de referencia y los valores de saturación máximo y mínimo de la variable manipulada.

3.4.3. Control PID

El controlador clásico PID basado en un algoritmo en tiempo discreto, al igual que el control por Retroalimentación Iterativa, determina el porcentaje de flujo requerido para mantener la temperatura de la vivienda a la temperatura del punto de referencia. El algoritmo de control implementado en el Type 23 es presentado por Aström and Hägglund [1994], la Ecuación 3.2 describe el tipo de estructura del controlador utilizado.

$$v(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d(\tau) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) = P + I + D \quad (3.2)$$

Para realizar la sintonización de las constantes del algoritmo, se utilizó el método empírico de Ziegler and Nichols [1983]:

1. Utilizando sólo control proporcional, comenzando con un valor de ganancia pequeño, incrementar la ganancia hasta que el lazo comience a oscilar. Notar

que se requieren oscilaciones lineales y que éstas deben ser observadas en la salida del controlador.

2. Registrar la ganancia crítica del controlador $K_p = K_c$ y el periodo de oscilación P_c de la salida del controlador.
3. Ajustar los parámetros del controlador según la tabla 3.7.

Tabla 3.7: Parámetros de ajuste del método de oscilación Ziegler and Nichols [1983].

	K_p	T_i	T_d
P	$0.50K_c$		
PI	$0.45K_c$	$\frac{P_c}{1.2}$	
PID	$0.60K_c$	$0.5P_c$	$\frac{P_c}{8}$

Sin embargo, al ajustar la ganancia proporcional en $K=0.009$ se observó que el sistema presentaba una oscilación demasiado pequeña, por lo que, se ajusto el tiempo integral y derivativo sólo para suavizar un poco la señal de control cuando se presentaban perturbaciones, resultando $T_i = 0.0005$ y $T_d = 0.0001$.

3.4.4. Control *If-Else*

En base a prueba y error se caracterizó el comportamiento del retiro de calor de la manejadora de aire, para determinar la señal de control basado en reglas if-else, se determino la apertura de la válvula de 3 vías, para cada diferencia de temperatura entre la vivienda y el punto de consigna (ΔT). Con las condiciones mostradas en la tabla 3.8, se creo el módulo del controlador *If-Else*.

Tabla 3.8: Flujo manejado en el control para la temperatura de la vivienda

$\Delta T(^{\circ}C)$	% de Flujo
$\Delta T > 3$	100
$3 \geq \Delta T \geq 2$	30
$2 > \Delta T \geq 1.5$	20
$1.5 > \Delta T \geq 1$	18
$1 > \Delta T \geq 0.8$	15
$0.8 > \Delta T \geq 0.5$	10
$0.5 > \Delta T \geq 0.3$	7
$0.3 > \Delta T \geq 0$	5
$0 < \Delta T$	0

Tabla 3.9: Indicador de confort PMV,ISO:7730 (2005).

Valor	Indicador
-3	Extremadamente Frío
-2	Demasiado Frío
-1	Confortable Frío
0	Confortable
1	Confortable Caliente
2	Demasiado Caliente
3	Extremadamente Caliente

3.5. Comparación de las diferentes estrategias de control

Para comparar las estrategias de control descritas, se realizaron en el entorno de simulación 4 proyectos iguales, que utilizan diferentes estrategias de control para la válvula de 3 vías, en el módulo CSAAS como se ilustra en la figura 3.6, cada proyecto se evaluó bajo las mismas condiciones.

En la figura 3.8 se muestra la primera simulación, que cuenta con condiciones iniciales de la temperatura de la vivienda a $25^{\circ}C$ y $5^{\circ}C$ en el tanque de almacenamiento. Según el estándar de confort PMV (*Predicted Mean Vote*) mostrado en la tabla 3.9, se observa que las estrategias de control se encuentran dentro del rango de confort, ya que ninguna rebasa los 0.5 unidades del indicador PMV, como se esperaba en cuanto a control y estabilidad, el más ineficiente fue el controlador Todo-Nada, al mantenerse más tiempo fuera del punto de consigna, aunado a una serie de oscilaciones continuas entre 24° y $26^{\circ}C$, debido a los parámetros de corte de la histéresis.

El controlador por Retroalimentación Iterativa (R. Iterativa) obtuvo un buen comportamiento en las primeras 8 horas, hasta que la radiación solar aumentó y consecuentemente la carga térmica en la vivienda también lo hizo, lo que provocó que dicha estrategia en cuestión oscilara el resto del día.

El controlador por *If-Else*, se puede calificar con un comportamiento aceptable, ya que no presentó la serie de oscilaciones como en las estrategias anteriores. El controlador PID mostró el mejor comportamiento, al obtener mejor control sobre la temperatura y el confort del espacio, además de responder efectivamente ante las perturbaciones sin presentar oscilaciones que descontrolen al equipo.

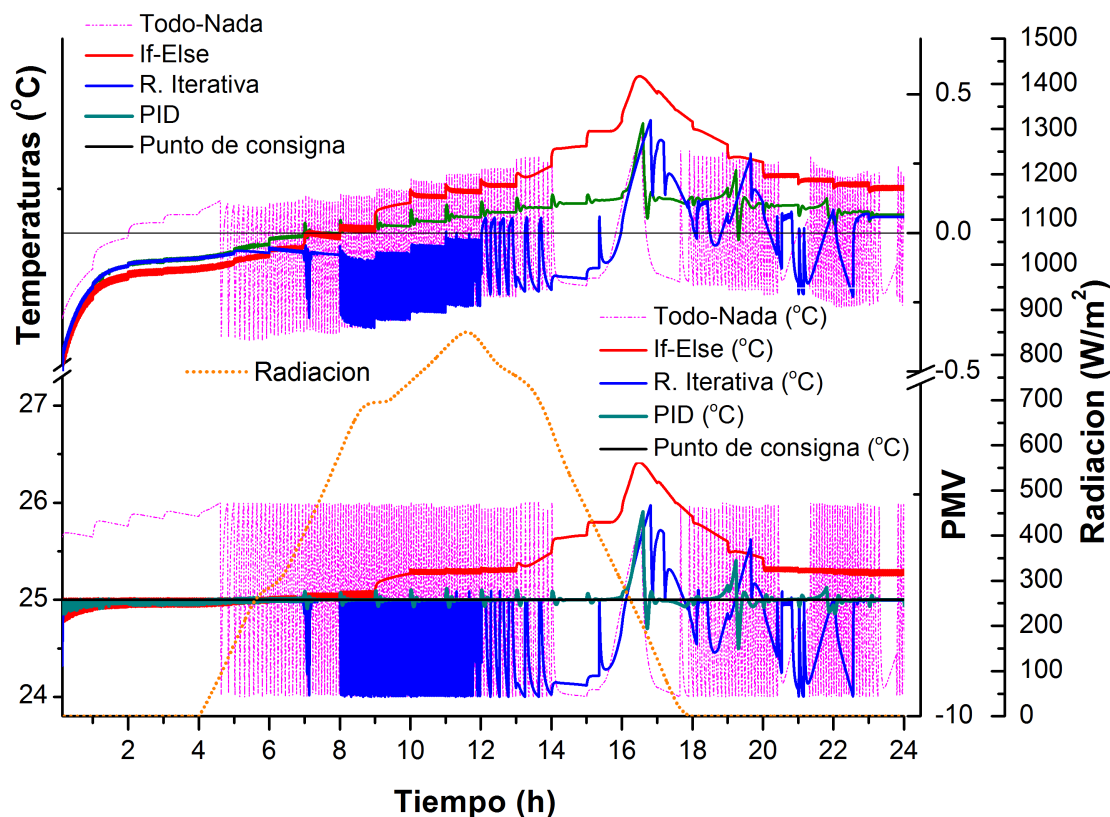


Figura 3.8: Control de la temperatura de la vivienda bajo las diferentes estrategias de control, con condición inicial de 25°C .

La segunda simulación mostrada en la figura 3.9 con condiciones iniciales de la vivienda a 35°C y 5°C en el tanque de almacenamiento. Las primeras siete horas la carga de la vivienda superará a la capacidad de la unidad de enfriamiento, esto obliga a que los controladores se encuentren en una etapa de saturación (operando el sistema a plena carga). El arranque de las estrategias al operar a máxima capacidad tienden a seguir la misma trayectoria, excepto el controlador *If-Else*, que por su algoritmo, a la 3ra hora el controlador mantiene cerca de los 26°C , y con ello obtiene el menor rendimiento.

Aunque el controlador Todo-Nada, de la hora 8 a la 18, se mantuvo aproximadamente 0.5°C por debajo de la temperatura de consigna, fue el que más cerca estuvo del confort ideal, a diferencia del control PID y Retroalimentación Iterativa, que mantuvieron un mejor comportamiento en el control de la temperatura.

A las 18.5 horas el controlador Todo-Nada empezó a oscilar entre la banda de histéresis, de igual manera lo hizo el controlador por Retroalimentación, si tomamos en cuenta que la temperatura ambiente va decreciendo junto con la ganancia de calor de la vivienda, se concluye que estos controladores presentan un comportamiento oscilatorio, cuando se trabaja con baja capacidad en la manejadora de aire.

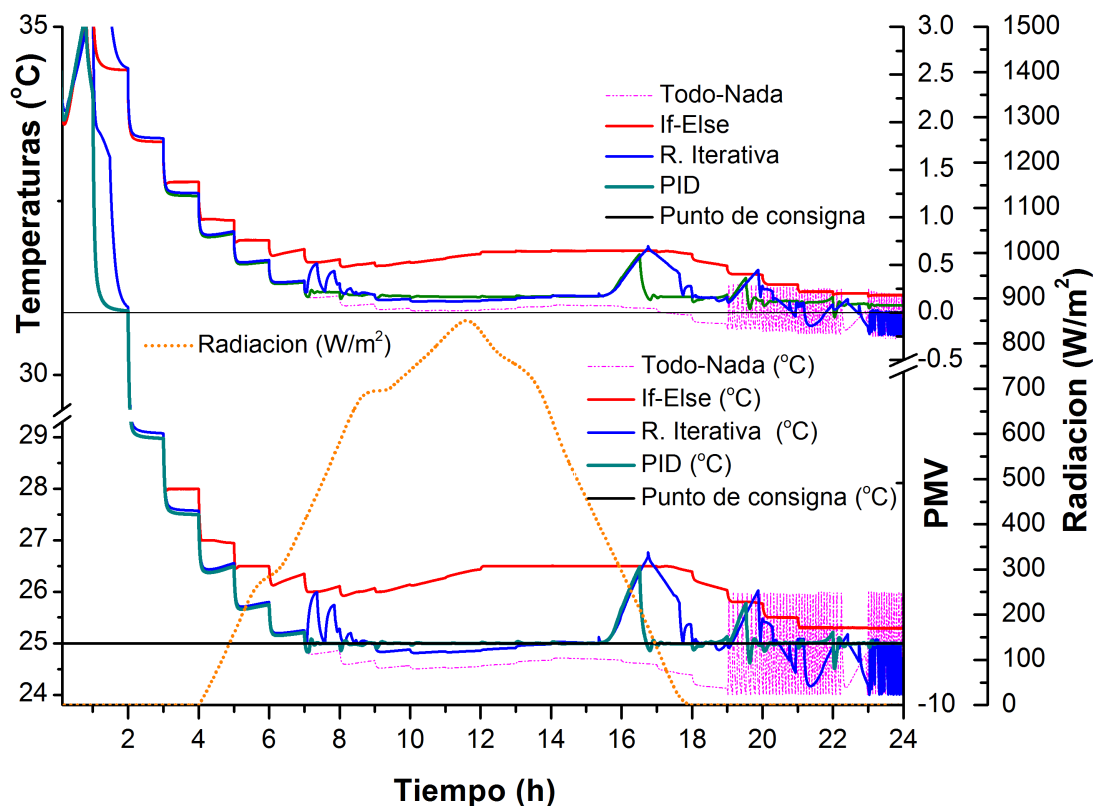


Figura 3.9: Control de la temperatura de la vivienda bajo las diferentes estrategias de control, con condición inicial de 35°C .

Una vez más, el controlador clásico PID demostró su versatilidad al obtener un buen control sobre la temperatura referencia, sin mostrar descontrol ante las perturbaciones presentadas. Desde el punto de vista energético se observa en la tabla 3.10, que el controlador PID utilizó de manera eficiente el recurso solar, al mantener trabajando por más tiempo el tanque de almacenamiento, en menor proporción la fuente de energía auxiliar biogas, lo que nos permite concluir que la unidad de enfriamiento tiende un menor consumo de energía auxiliar y por ende un menor costo de operación. A pesar que el controlador por retroalimentación permaneció muy cerca a la estrategia PID energéticamente hablando, se descarta por las oscilaciones presentadas y el número de cálculos matemáticos que se requiere para su uso, incrementando el poder de cómputo para implementarlo en hardware. Los resultados arrojan que la estrategia más adecuada para controlar la variable manipulada en la válvula de 3 vías, es el control clásico PID.

Tabla 3.10: Uso del recurso de almacenamiento frío y biogas para cada estrategia de control.

Controlador	C. Inicial 25°C		C. Inicial 35°C	
	A. de frío (%)	Biogas (%)	A. de frío (%)	Biogas (%)
If-Else	39.4	25.6	3.4	61.6
Todo-Nada	43.6	21.4	8.0	56.9
R. Iterativa	49.9	15.1	22.7	42.3
PID	50.8	14.1	23.1	41.9

3.6. Análisis e interpretación de resultados

Para obtener de manera detallada el comportamiento del sistema de automatización y control operado bajo los diferentes escenarios que puede llegar a trabajar, se realizaron simulaciones para mantener la temperatura con una consigna de 25°C a 3 diferentes condiciones iniciales en la temperatura del espacio a climatizar y 5°C en el agua del tanque de almacenamiento.

La primera simulación se realiza con una temperatura inicial de la vivienda a 15°C, con el objetivo de operar el sistema sin carga térmica durante las primeras horas, para prestar atención en el procedimiento de arranque del sistema de control.

En la figura 3.10a se observa que el controlador se encuentra inactivo en las primeras horas, debido a que la temperatura de la vivienda continúa por debajo del punto de consigna, si no hasta la 7^{ma} hora donde el sistema de control decide encender el equipo de enfriamiento, como aun no se cuenta con carga térmica en la vivienda el sistema control entra en modo 1, para almacenar energía solar por medio de agua fría.

En la figura 3.10b se muestra que a las 8:00 *hr* la vivienda empieza a ganar calor, lo que provoca el cambio de operación al modo 2 (para proveer de climatización a la vivienda y al mismo tiempo almacenar frío), en este transcurso de tiempo a medida que la carga térmica aumenta, el controlador lo hace de manera proporcional con el flujo de agua hacia la manejadora de aire, para retirar el calor ganado en la vivienda y mantener la temperatura de consigna.

Tomando como prioridad el tanque de almacenamiento de agua fría para tratar de maximizar la fracción solar, el sistema de control entra en modo 3 alrededor de las 16:00 horas, cuando el nivel de radiación se encuentra por debajo del punto de consigna (400 W/m²) para trabajar con energía solar. Para retirar la cantidad de calor necesario y mantener la temperatura de consigna, el controlador incrementa el flujo de agua gradualmente en la manejadora de aire hasta agotar por completo la reserva de agua fría contenida en el tanque de almacenamiento, en ese momento se cambia a modo 4 para operar con biogas, esto último se repite constantemente hasta contar nuevamente con recurso solar.

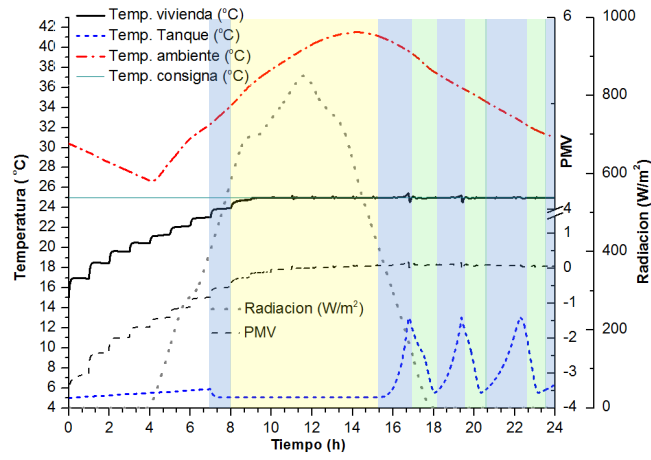
De acuerdo a la primera ley de la termodinámica, la energía que entra en la vivienda es igual a la que se acumula en ella, más la que se le retira.

$$E_e = E_a + E_s, \quad (3.3)$$

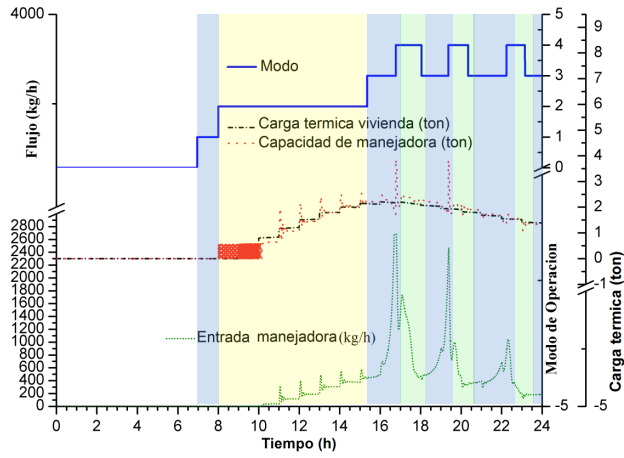
donde E_e es la energía ganada en la vivienda, E_a es la energía acumulada y E_s es la energía retirada por la manejadora, de manera que si la energía acumulada y la ganancia de calor son retiradas, la temperatura de la vivienda permanecerá constante, tal es el caso en la figura 3.10b, donde se observa como la cantidad de energía retirada por la unidad manejadora se iguala con la carga térmica de la vivienda, lo que provoca que la temperatura se mantenga alrededor de los $25^\circ C$. Al inicio de la operación con biogas, la unidad de enfriamiento recibe el agua relativamente caliente, la cual es una mezcla del agua que proviene de la salida de la manejadora y el agua contenida en la parte superior del tanque, en la figura 3.10c se observa cómo el agua caliente ocasiona un gran demanda en la producción de frío tal que se supera a la capacidad de la unidad de enfriamiento, provocando que la unidad de enfriamiento no sea capaz de alcanzar la temperatura de consigna de salida de $5^\circ C$, lo que es causa de perturbación en el sistema de control para mantener la temperatura de confort en la vivienda, es decir, el agua que proviene del sistema de enfriamiento contiene menos capacidad de intercambio de calor, lo cual afecta directamente a la capacidad de la manejadora de aire.

La simulación con una condición inicial a $25^\circ C$, se realizó para obtener el comportamiento del sistema operado continuamente de un día a otro. Debido a que la vivienda se encuentra sobre la temperatura de consigna y el tanque de almacenamiento cuenta con temperatura baja en el agua de almacenamiento, además la carencia de la radiación solar provoca que el sistema de control entre en modo 3. El diferencial de temperatura de la vivienda con respecto al ambiente, es demasiado pequeña que la carga térmica del espacio varía entre las 0 y las 0.5 toneladas, como se muestra en la figura 3.11b, lo que induce a que el controlador envíe poco flujo de agua fría hacia la manejadora, ocasionando que el tanque permanezca funcionando cerca de las 7 horas, hasta que el umbral de radiación para trabajar con energía solar es rebasado, en ese momento el modo de operación se modifica a 2, obteniendo de aquí en adelante un comportamiento similar a la simulación anterior.

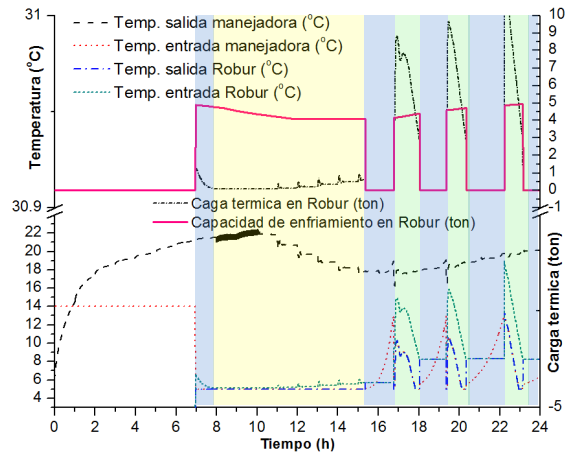
Ya se ha mostrado el arranque y operación continua de un día a otro del sistema de enfriamiento operado bajo el sistema automatización y control, en esta ocasión se presenta la estabilización de la variable controlada, cuando el sistema es operando a plena carga. En la figura 3.12a se observa que la temperatura inicial de la vivienda es de $35^\circ C$, lo que genera en las primeras horas una carga térmica arriba de 8 toneladas, de acuerdo a ello el controlador se encuentra en saturación, enviando el flujo total de agua fría a la manejadora de aire, se mantiene así mientras que la temperatura de la vivienda supera el punto de consigna y la carga térmica supera la capacidad de la unidad, cuando la capacidad de la unidad de enfriamiento sobrepasa a la carga térmica de la vivienda el sistema de control empieza a disminuir el flujo de agua fría entrante en la unidad manejadora, para retirar el calor necesario y situarse en la temperatura de referencia (ver figura 3.12b). Alrededor de las 5:30, se acumula suficiente reserva de frío, como para cambiar de modo biogas a operar con el tanque de almacenamiento



(a)

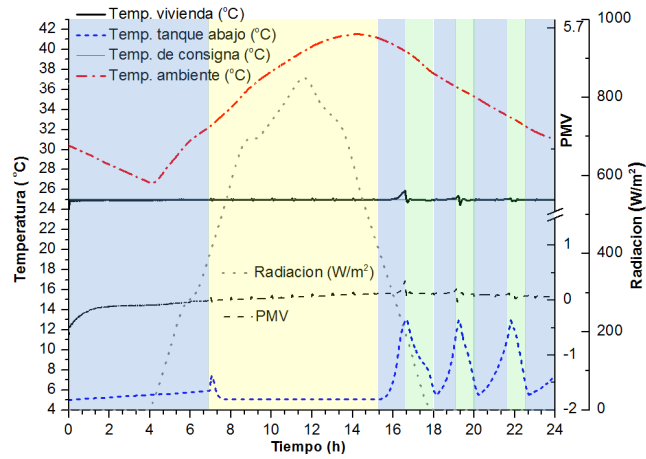


(b)

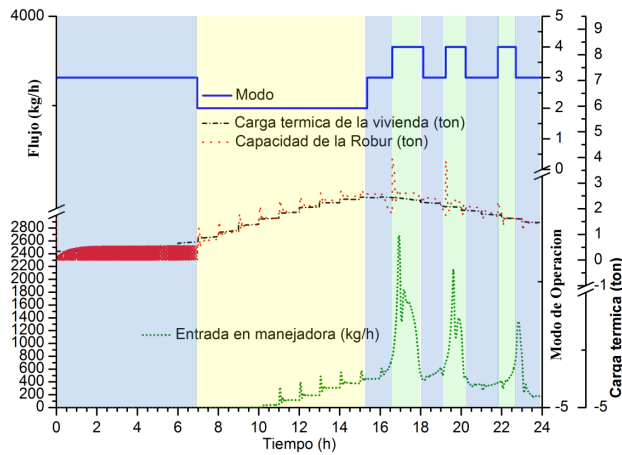


(c)

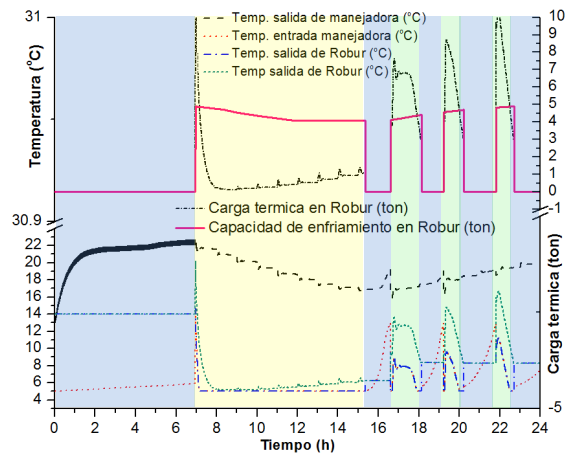
Figura 3.10: Simulación de la vivienda con condiciones iniciales de la vivienda a 15°C.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.11: Simulación de la vivienda con condiciones iniciales de la vivienda a 25°C.

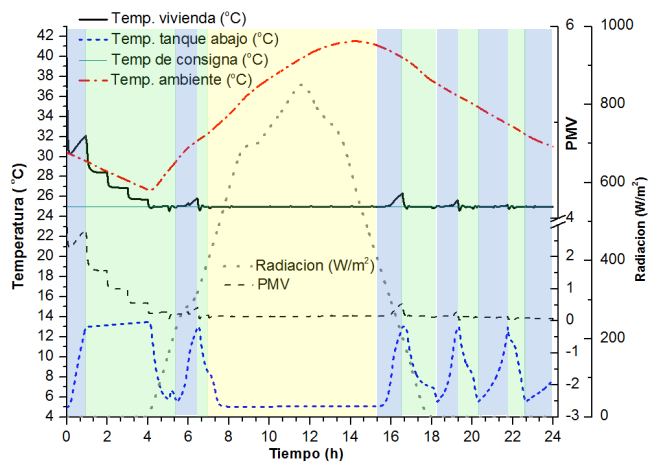
durante una hora, nuevamente el modo de operación biogas entra en acción hasta que es interrumpido, debido a que el nivel de radiación solar alcanza el umbral para trabajar en modo 2. En este punto la mayoría de la energía acumulada ya fue retirado, por ello el comportamiento de la vivienda es similar al de la simulación 1 y 2.

De acuerdo a la variable de control y la automatización de las válvulas, la unidad de enfriamiento y unidad manejadora se comportaron según lo requerido, además de obtener un buen control sobre la temperatura de la vivienda, que ayudó a mantener el indicador PMV dentro del rango confortable, se ha demostrado teóricamente que el algoritmo propuesto permite la automatización y control bajo la configuración del circuito hidráulico propuesto, para brindar al usuario seguridad, confort y ahorro de energía.

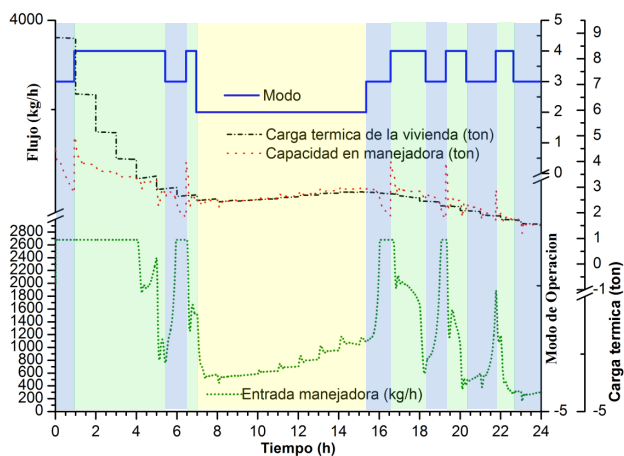
3.7. Propuesta final del sistema de control

Para implementar en hardware el controlador del sistema de aire acondicionado solar, se plantea dividir el sistema de control en subsistemas que realicen tareas específicas. Los subsistemas contarán con la capacidad de comunicarse a un controlador central, el cual es el encargado de la toma de decisiones.

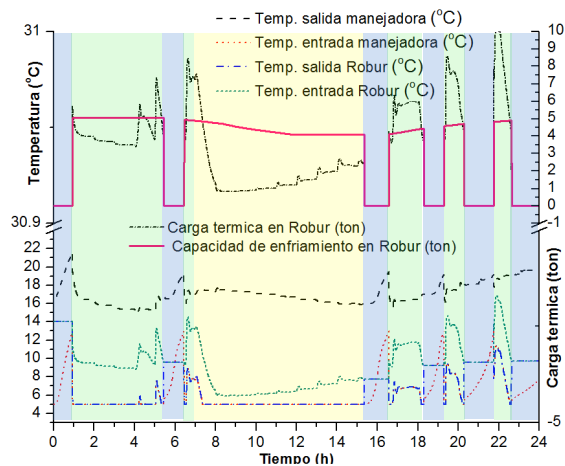
En la figura 3.13 se muestra el diagrama en bloques que conforman el sistema de control de aire acondicionado solar, como principal se tiene al CSAAS y como subsistemas: sistema de control para el seguimiento solar, el controlador para el campo de colectores y el sistema de control para la unidad de enfriamiento por absorción operado con energía solar y biogas.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.12: Simulación de la vivienda con condiciones iniciales de la vivienda a 35°C.

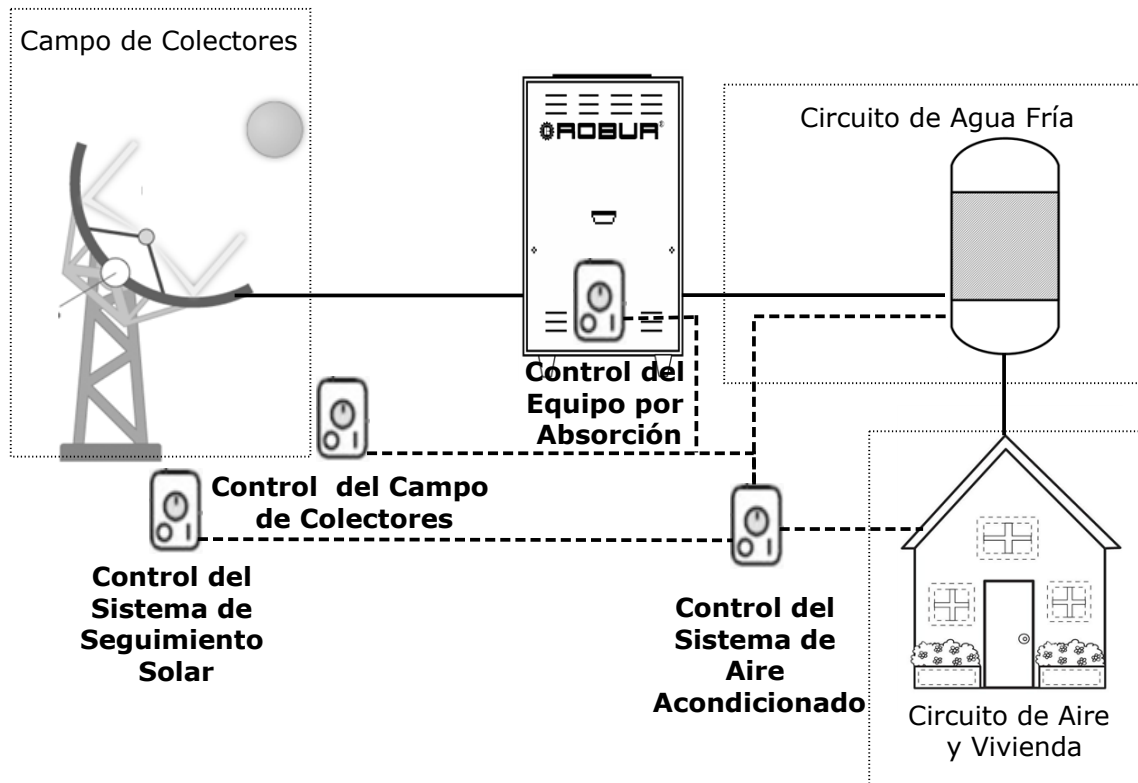


Figura 3.13: Implementación en hardware del controlador del sistema de aire acondicionado solar.

El objetivo de manejar un control en bloques, es otorgar a los subsistemas cierta libertad para operar libremente, cuando uno de estos así lo requiera, por ejemplo: el sistema de control para el seguimiento solar, pueda ser implementado en un arreglo fotovoltaico, sistema de captación solar cilindro parabólico, fresnel o disco parabólico de manera autónoma, sin la necesidad de incorporar elementos no necesarios como el CSAAS. De esta manera se obtienen controladores que pueden ser utilizados en diversos proyectos con las mismas características. Para la automatización y control del sistema propuesto es indispensable una buena instrumentación, de acuerdo a ello se propone el diagrama de tuberías e instrumentación de la figura 3.14.

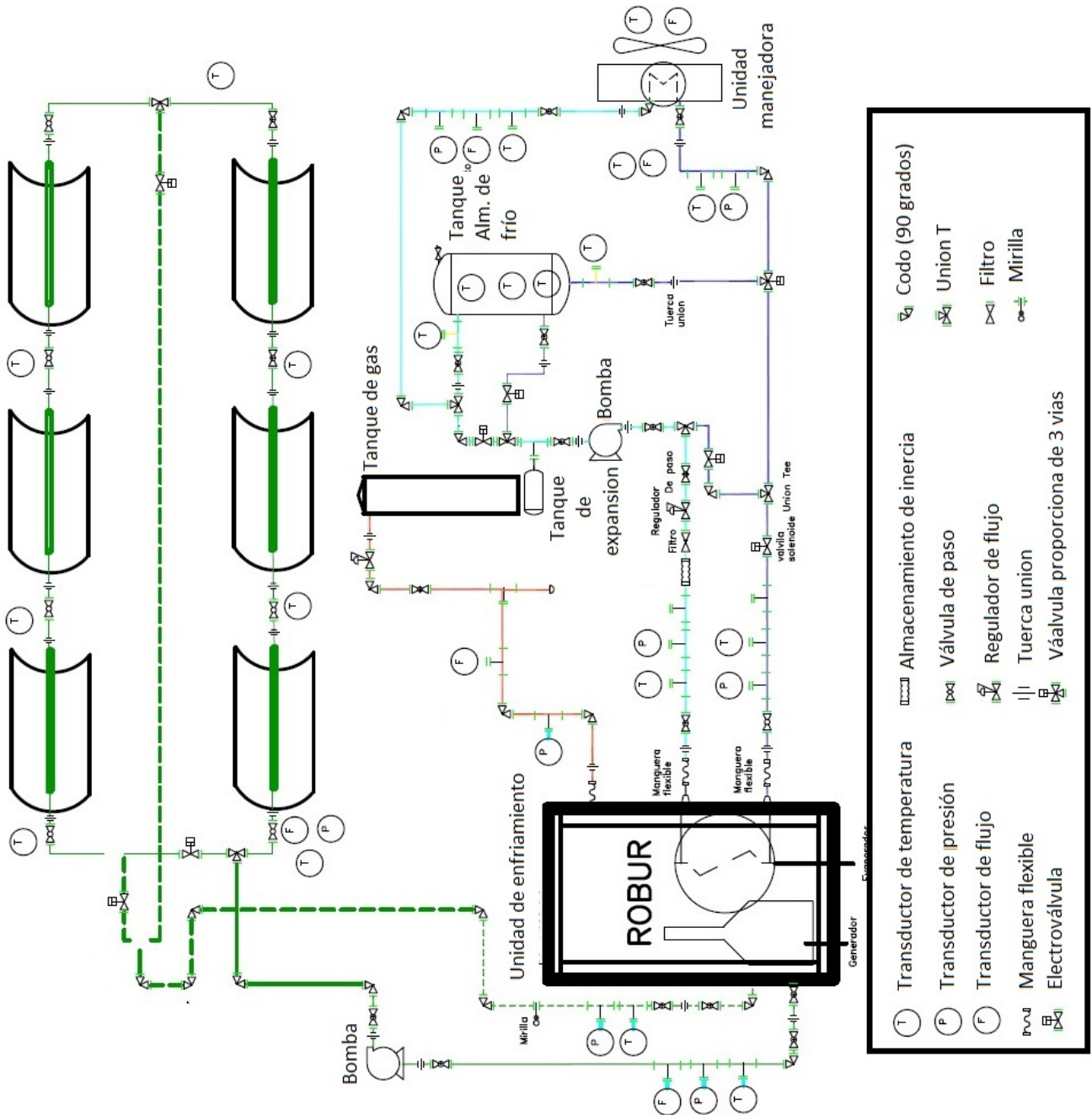


Figura 3.14: Diagrama de tubería e instrumentación del banco de pruebas del sistema de enfriamiento solar.

Capítulo 4

Construcción del prototipo experimental

4.1. Sistema de aire acondicionado

4.1.1. Selección de dispositivos e instrumentación

El trabajo realizado consistió en la búsqueda de dispositivos e instrumentación para el sistema de aire acondicionado solar. En la elección de los sensores se buscó un compromiso en cuanto a exactitud, precisión, precio, disponibilidad en el mercado, tiempo de entrega y señal de salida, debido a que el controlador captura solo señales de voltaje, este tipo de señal es tomada como prioritaria para utilizar el mínimo de acondicionamiento de señales en el diseño electrónico del CSAAS, como resultado se eligieron los siguientes componentes:

Sensor de temperatura, serie S tipo RTD PTC100 con un coeficiente de temperatura (*alpha*) de 0.00385, basado en la norma Din43760 y una precisión de $\pm 0.1\% @ 0^{\circ}C$, cuenta con un cable 182.8 cm (72 pulgadas) de longitud y un vástago de 15.2 cm (6 pulgadas) de acero inoxidable, el diseño permite instalarlo en una tubería con rosca de 1.3 cm (0.5 pulgadas), una imagen del sensor de aprecia en la figura 4.1.



Figura 4.1: Sensor de temperatura RTD PTC100.

Indicador de flujo y transmisor de flujo, el indicador y transmisor de flujo marca Dwyer modelo SFI-8013/4 con sensor A-712, el cual provee una señal lineal de salida

de 0-10 VCD proporcional al flujo de 1 a 20 GPM, con una precisión de $\pm 5\%$ de la escala total, la temperatura de trabajo máxima es de 55°C con una presión máxima de 862 kpa , el sensor puede ser utilizado en exterior y su instalación es en línea como se muestra en la en la figura 4.2. El flujo se determina por la Ecuación 4.1.



Figura 4.2: Indicador y transmisor de flujo volumétrico.

$$\text{Flujo} = \frac{\text{Voltaje}}{0.28}. \quad (4.1)$$

Válvula solenoide, marca Orbit irrigación se utiliza para controlar los direccionamientos de agua según los modos de operación, la electroválvula de 24VCD normalmente cerrada con una apertura todo o nada, permite ser instalada en línea y a 90 grados, como se puede observar en la figura 4.3, además cuenta con una manivela con la que puede regular el flujo máximo que circula en la válvula, que va desde $1 - 75.7\text{ lt/min}$ ($1 - 40\text{ gpm}$) y una presión de $103.4 - 1034.2\text{ kilopascal}$ ($15 - 150\text{ psi}$), la válvula puede ser utilizada en uso interior y exterior.



Figura 4.3: Válvula solenoide todo o nada.

Válvula proporcional de 3 vías, la válvula proporcional de 3 vías, es marca Belimo y mostrada en la figura 4.4, es controlada electrónicamente con una señal de $2-10\text{ VDC}$, puede trabajar en modo divisor y mezclador, la alimentación para la válvula es de 24 VCD , además cuenta con una señal de salida de $2-10\text{ VCD}$ equivalente a la posición

actual de la válvula. El recorrido de la válvula de 0-90 grados es equivalente a 0-100 %, tomando un tiempo de recorrido de inicio a fin de 95 *seg.*



Figura 4.4: Válvula proporcional de 3 vías.

Transductor de temperatura y humedad para ducto, el transmisor mostrado en la figura 4.5 marca Dwyer serie RHP con exactitud del 2 %, y un rango de temperatura de -40 a $140^{\circ}F$, que es equivalente a una señal de salida 0 – 10 *volts*. El tiempo de respuesta es de 15 segundos con un repetibilidad del 0.1 %, este transmisor es utilizado para medir la temperatura de la vivienda a climatizar.

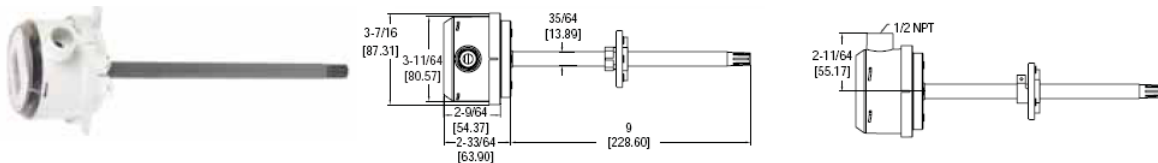


Figura 4.5: Transmisor de temperatura y humedad para ducto.

Sensor de radiación, para cuantificar el recurso solar comúnmente se utilizan dispositivos como piranómetro, sin embargo para esta aplicación no es necesario medir la cantidad de radiación con una gran exactitud. Para elaborar un dispositivo de medición solar más barato se decidió utilizar un fototransistor, ya que en compañía de algunas resistencias se obtiene un circuito que hace circular una corriente proporcional a la cantidad de radiación existente. El fototransistor mostrado en la figura 4.6 es muy comercial y barato.



Figura 4.6: Fototransistor con filtro.

El Controlador, para realizar el control del sistema de aire acondicionado solar y operarlo de forma automática, se decidió utilizar un microcontrolador (MCU, de las siglas en ingles *MicroController Unit*), ya que es una tecnología relativamente barata, además que anteriormente se ha trabajado con microcontroladores de la compañía Freescale obteniendo buenas experiencias, por ello se realizó una búsqueda en las familias de los diferentes tipos de microcontroladores del para determinar el MCU más idóneo, se tomó en cuenta la memoria, el número de terminales (*pins*) y periféricos como: Convertidor Analógico Digital (ADC, de las siglas en ingles *Analog to Digital Converter*), módulos de interrupciones por hardware, generación de señales Moduladas por Ancho de Pulso (PWM, de las siglas en ingles *Pulse Width Modulator*) y empaquetado del circuito. Sin duda este último punto, es de los más importantes, debido a que la mayoría de MCUs con amplio número de periféricos y memoria se encuentran encapsulado cuadrado plano de perfil (LQFP de las siglas en ingles *Low-profile Quad Flat Package*), que dificultan la creación de prototipos como circuitos impresos, por requerir equipo sofisticado con el cual no se cuenta. El microcontrolador que fue utilizado es el MCF51QE128, que puede ser obtenido en una tarjeta de ensamble con el número de parte DC9S08QE128, para programar y depurar el controlador construido, se utilizó el tablero de demostración DEMOQE (figura 4.7).

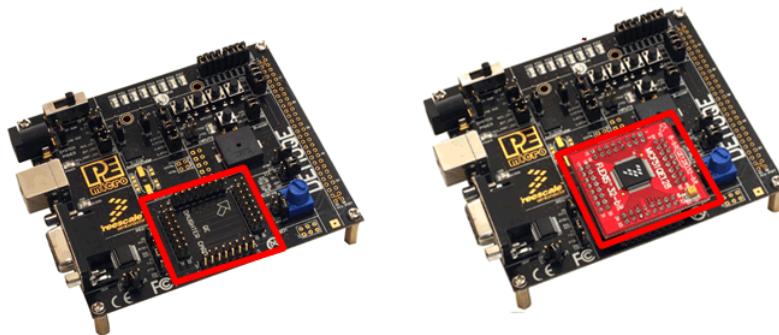


Figura 4.7: Tarjeta de demostración DEMOQE.

4.1.2. Instalación del sistema de aire acondicionado e implementación de la instrumentación

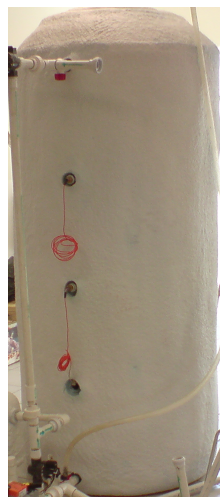
La conexión de la unidad de enfriamiento, tanque de almacenamiento de frío y circuito de aire, se realiza mediante un circuito hidráulico de agua fría que se compone por el trazado de tuberías, instrumentación y elementos finales de control. En el Capítulo anterior se realizó el estudio de diferentes configuraciones mediante la simulación de dichos subsistemas, donde la propuesta final se muestra en la figura 3.14.

La especificación del tipo de material constructivo y medidas del circuito hidráulico, se realizó de acuerdo a la especificación del distribuidor del equipo de absorción, con lo cual resultó que el material a utilizar fue: tubo de 2.54 cm (1 pulgada), válvulas solenoides, codos, accesorios, tuercas unión y adaptadores (todo de PVC).

Para el tanque de almacenamiento de frío, se eligió un contenedor de plástico para agua de 1100 litros, mostrado en la figura 4.8a, el cual fue cubierto con un espesor de 5 cm de poliuretano para ayudar con las ganancias de calor por convección, posteriormente se cubrió con una pintura elastomérica para proteger el aislamiento del sol, quedando con el acabado de la figura 4.8b, además se le agregaron conexiones con rosca para la carga y descarga de agua, los otros 3 para incorporarle sensores de temperatura.



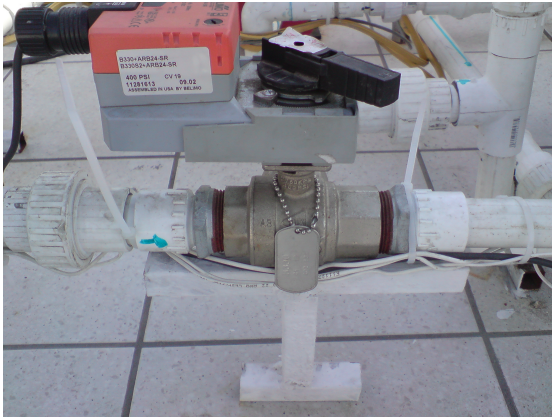
(a) Tanque sin aislamiento.



(b) Tanque con aislante térmico (Poliuretano).

Figura 4.8: Tanque de almacenamiento de frío.

Se construyeron bases de metal en forma de “T” para: sostener las tuberías, organizar y conducir los cables de sensores e instrumentación (ver figura 4.9). Para evitar mediciones erróneas en los sensores de temperatura, se aisló la parte de bastago que no entra en la tubería (ver figura 4.9b). En las Figuras 4.10 y 4.11 se muestran algunas fotografías de la instalación del sistema.



(a) Instalación de la válvula proporcional de 3 vías.



(b) Instalación sensor de temperatura RTD.

Figura 4.9: Instalación de válvula de 3 vías y sensor de temperatura.



Figura 4.10: Vista panorámica del sistema de aire acondicionado.

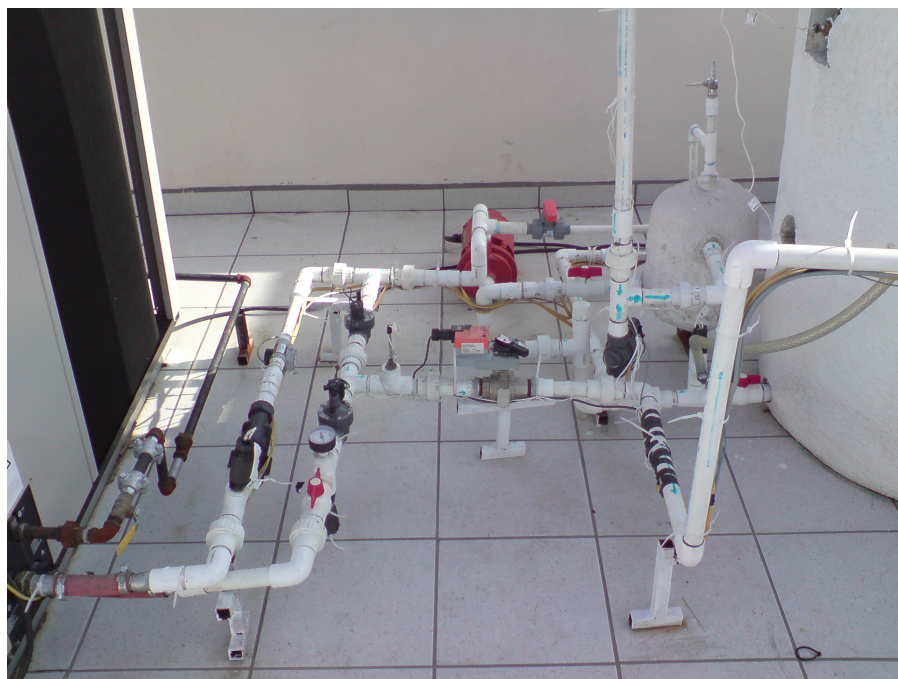


Figura 4.11: Fotografía de la construcción del circuito de agua fría.

4.1.3. Diseño e instrumentación del controlador de agua fría

Para monitorear, automatizar y controlar el sistema de aire acondicionado solar, se diseñó y construyó el CSAAS.

4.1.3.1. Desarrollo de acondicionamiento de señales

La mayoría de los sensores y actuadores no se ajustan a un estándar o por su naturaleza emiten y reciben distintas señales, como puede ser el ejemplo de resistencias, capacitancias, voltajes digitales y voltajes analógicos, con niveles de voltaje fuera del rango de operación del microcontrolador, para ello es necesario realizar etapas de acondicionamiento con el objetivo de poder capturar y emitir las destinadas señales de nuestros sensores y actuadores para realizar el control y monitoreo. De acuerdo a ello se realizaron los siguientes acondicionamientos de señales¹:

Sensor de temperatura, los sensores de temperatura tipo RTD cambian su resistencia eléctrica de acuerdo a la temperatura, es decir, para obtener la temperatura de dicho sensor es necesario obtener su resistencia, para ello se utilizó un puente de Wheatstone y un amplificador diferencial, como se observa en la figura 4.12.

¹Para detalles de los circuitos esquemáticos ver Apéndice A.

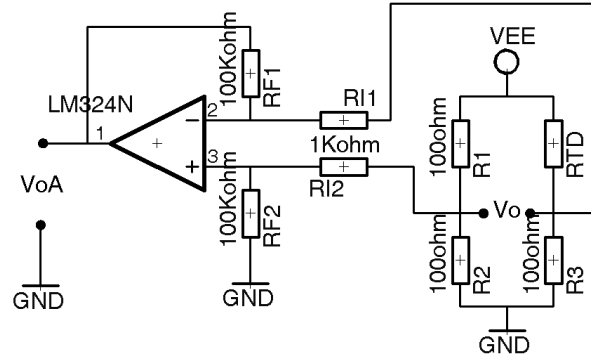


Figura 4.12: Etapa de acondicionamiento para los sensores de temperatura.

Donde el voltaje amplificado V_oA , es leído por el convertidor analógico del microcontrolador y por medio de una función que contiene las Ecuaciones 4.2 y 4.3, se calculan la resistencia del sensor (RTD), que a su vez se traduce a temperatura.

$$RTD = \frac{R_3}{\frac{R_2}{R_2+R_1} - \frac{V_oA}{V_{EE}}} - R_3, \quad (4.2)$$

donde $R_1 = R_2 = R_3 = 100\Omega$, $V_{EE} = 0.25$ volts, V_oA es el voltaje leído y RTD es la resistencia del sensor RTD.

$$T = \frac{\left(\frac{RTD}{R_0} - 1\right)}{\alpha}, \quad (4.3)$$

donde $R_0 = 100\Omega$ debido a que el sensor seleccionado es un PTC100, y su resistencia a una temperatura de referencia de $0^\circ C$ es de 100Ω , con un $\alpha = 0.00385$.

Un detalle importante que hay que considerar, es que al obtener la resistencia del RTD es necesario hacer circular una corriente eléctrica, lo que ocasiona un auto-calentamiento, por ello se decidió aplicar un voltaje mínimo para tener una corriente mínima y evitar el inconveniente del autocalentamiento, aplicando la ley de Ohm para $V_{EE} = 0.25$ volts y una resistencia de $RTD = 100\Omega$, se tiene que la corriente máxima es:

$$I_{RTD} = \frac{V_{EE}}{RTD + R_3} = \frac{0.25}{100 + 100} = 1.25ma,$$

obteniendo el valor de I_{RTD} muy pequeño, lo que disminuye el autocalentamiento en el RTD.

El voltaje V_oA es calculado a partir V_o multiplicado por una ganancia a través del amplificador, esto se debe a que, si la temperatura máxima a medir es la temperatura ambiente, se puede decir que aproximadamente el limite es de $60^\circ C$, con lo cual obtenemos RTD a través de la Ecuación 4.4.

$$RTD = R_0(1 + \alpha T), \quad (4.4)$$

sustituyendo a $60^{\circ}C$

$$RTD = 100(1 + 0.00385(60)) = 123.1\Omega,$$

el valor de V_o se obtiene por Ecuación 4.5, :

$$V_o = V_{EE} \left(\frac{R2}{R2 + R1} - \frac{R3}{R3 + Rx} \right), \quad (4.5)$$

desarrollando para obtener el valor máximo valor de V_o ,

$$V_o = 0.25 \left(\frac{100}{100 + 100} - \frac{100}{100 + 123.1} \right) = 0.0129 \text{ volts},$$

se observa que el valor de V_o es demasiado pequeño como para aprovechar la resolución del convertidor analógico digital incluido en el microcontrolador, para ello se diseñó un amplificador con una ganancia de 100, con el fin de obtener un mejor desempeño del ADC incorporado en el MCU. La Ecuación 4.6 describe el modelo de un amplificador diferencial,

$$V_{out} = \frac{R_f}{R_i} (V_{i_2} - V_{i_1}), \quad (4.6)$$

proponiendo $R_f = 100K\Omega$ y despejando R_i se obtiene que:

$$R_i = \frac{R_f}{V_{out}} (V_{i_2} - V_{i_1}) = \frac{100K}{1.29} (0.0129) = 1k\Omega,$$

de esta manera se obtiene el acondicionamiento de señal para la lectura de los sensores de temperatura.

Indicador y trasmisor de flujo, que dependiendo del flujo en el sistema emiten una señal 1 a 10 volts, la cual puede poner en peligro al controlador, ya que el máximo voltaje por el microcontrolador es de 3 volts, debido a esto la señal es acondicionada con el circuito electrónico de la figura 4.13.

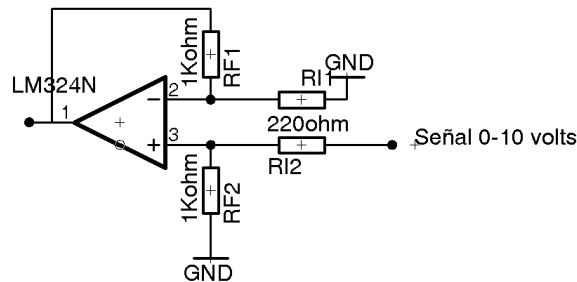


Figura 4.13: Acondicionamiento de señal para el indicador de flujo.

Que consta de un amplificador en configuración restador, donde la entrada no inversora corresponde a la señal del transmisor para darle una ganancia de 0.22, proponiendo $R_f = 220\Omega$ y despejando R_i y se obtiene

$$R_i = \frac{R_f}{V_{out}} (V_{i_2} - V_{i_1}) = \frac{220}{2.2} (10) = 1k\Omega.$$

Con este diseño electrónico se acondiciona la máxima señal generada por el transmisor que es de 10 volts y al multiplicarla por la ganancia de 0.22 corresponde a 2.2 volts, que se encuentra dentro del rango del voltaje de operación del microcontrolador. Posteriormente capturando la señal y teniéndola en memoria dentro del microcontrolador, se divide entre 0.22 para obtener el valor original, y de acuerdo a la Ecuación 4.1 obtener el flujo del transmisor.

Las Válvulas solenoides, son activadas por el microcontrolador según el algoritmo de control, esta manipulación se realiza con el circuito electrónico de la figura 4.14.

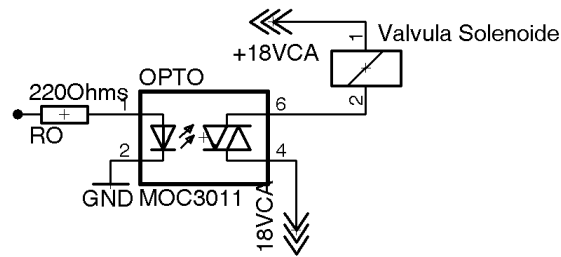


Figura 4.14: Etapa de acondicionamiento para las electroválvulas.

Donde RO es la resistencia que recibe la señal del controlador para activar un triac óptico, que es el encargado de realizar la conmutación de la válvula, además de aislar el circuito de control VCD de la tensión VCA. Al activar el triac óptico que se encuentra en serie con el solenoide de la válvula, provoca que la válvula normalmente cerrada se abra.

La manejadora, bomba y equipo de enfriamiento, se manipulan de forma similar a las válvulas solenoides, donde al activar un transistor óptico, que éste a su vez se encuentra conectado a la base de un transistor, para utilizarlo como conmutador, consecuentemente el transistor se encuentra en serie con la bobina de un contactor o relevador, el cual es el encargado de encender un actuador de alta potencia, el circuito puede observarse en la figura 4.15. En otras palabras al activar el opto-acoplador, se enciende el equipo conectado al relevador o contactor.

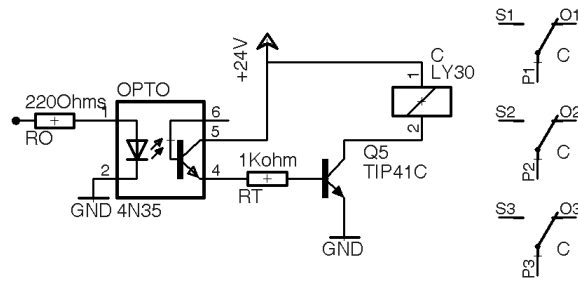


Figura 4.15: Etapa de acondicionamiento para interruptores magnéticos.

El control de la válvula proporcional de 3 vías, varía de 2 a 10 volts según la apertura de 0-100 % de la válvula, por lo cual es necesario generar dicha señal, para ello se utilizó la modulación por ancho de pulso, que produce diferentes formas de onda y puede ser usado como un convertidor digital analógico pero más sencillo y barato, esta técnica es comúnmente utilizada en los sistemas de control para variar la alimentación de un motor y consecuentemente su velocidad. En la modulación por ancho de pulso se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, en este caso un voltaje analógico constante se divide en pulsos y el voltaje de cada ancho de pulso da como resultado un valor promedio, por lo cual al variar el ancho de pulso obtendremos un valor promedio diferente. Por ejemplo, al generar una señal PWM con la mitad en alto, el ciclo de trabajo será de 50 % (ver figura 4.16a), si esto lo reducimos a una cuarta parte el ciclo de trabajo es del 25 % (ver figura 4.16b), en pocas palabras el ciclo de trabajo va de 0 a 100 %, de igual manera que el voltaje promedio.

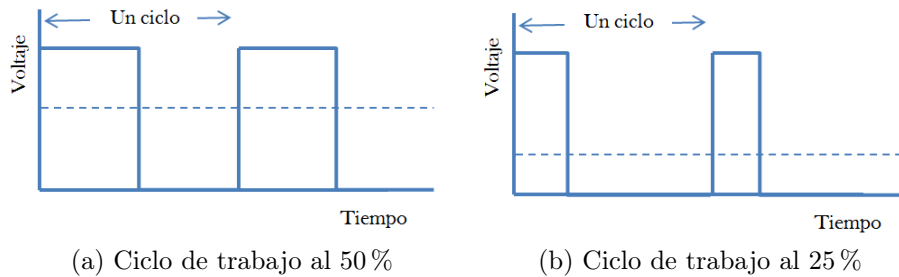


Figura 4.16: Modulación por ancho de pulso.

La señal PWM es generada mediante uno de los módulos del microcontrolador que genera una forma de onda cuadrada con la amplitud de operación del MCU (3.3 volts), de acuerdo a la amplitud máxima solicitada de la válvula es de 10 volts, para ello se utilizó la señal proveniente del PWM, que hace conmutar el transistor generando la misma forma de onda en el emisor, con la amplitud conectada en el colector del transistor. Debido a que algunos niveles de voltaje utilizados pueden poner en peligro al MCU, se decidió utilizar un opto-aislador para separar el área de bajo y alto voltaje.

En la figura 4.17 se observa que en *RO* llega la señal PWM del microcontrolador, para activar el transistor óptico y generar la forma de onda con amplitud de 0 – 10 *volts*. La segunda parte que conforma *RS1*, *RS2* y *CS*, que es una especie de filtro para obtener el valor promedio de la señal modulada, los valores de *RS1* y *RS2* son propuestos. El valor de *CS* fue determinado de forma experimental, donde puede ir de 56 μf a 1000 μf , se observa que entre más pequeño sea *CS* más rápido se determina el promedio de la señal modulada, con la desventaja que se obtiene un riso más grande, en su contra parte si el valor de *CS* es más grande, la señal modulada es un poco más lenta pero se elimina el riso en el voltaje de salida.

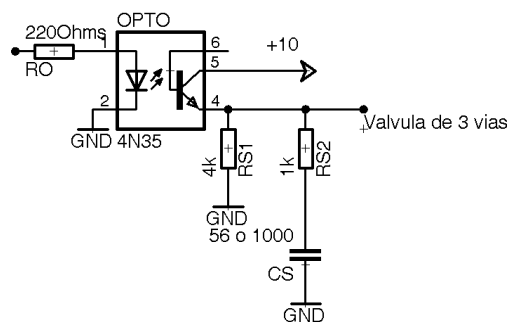


Figura 4.17: Etapa de acondicionamiento para generar señal analógica para el control de la válvula proporcional de 3 vías.

Sensor de radiación, para cuantificar la radiación solar se utilizó un fototransistor, que nos permite un flujo de corriente según la cantidad de radiación que insidie sobre él, en la figura 4.18 se muestra el acondicionamiento de señal para el sensor, donde la caída de tensión *Rad* es capturada por un puerto del convertidor analógico digital del microcontrolador, para ser convertida en radiación mediante una función incluida en la programación del sistema.

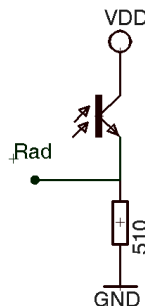


Figura 4.18: Acondicionamiento de señal para el sensor de radiación solar.

4.1.3.2. Creación de circuitos impresos

Para la implementación en hardware del sistema de control, se creó el diagrama esquemático y la plantilla del CSAAS mediante el software especializado EAGLE, consecutivamente se elaboraron circuitos impresos (ver Apéndice A). En la construcción se consideraron las etapas de acondicionamientos mostradas anteriormente, circuitos necesarios para el funcionamiento del microcontrolador y conexiones para interfaz de usuario y monitoreo.

En la figura 4.19 se muestra el diseño final del CSAAS, donde se puede apreciar que en la parte superior se cuenta con 10 conexiones para sensores de temperatura tipo RTD, por la parte derecha superior 4 conectores, 2 para flujo, uno para el sensor velocidad de viento y uno de aplicación general, en la parte derecha inferior se observan conexiones que proporcionan salidas de voltaje de corriente continua, para conmutar los relevadores encargados de controlar la bomba de circulación de agua y la unidad manejadora. En la parte inferior se cuentan con 5 conexiones de corriente alterna, para controlar las válvulas solenoides del circuito de agua fría. Como interfaz de usuario el sistema de control cuenta con una pantalla de cristal líquido y un teclado de 4 botones que sirven, para mostrar y modificar el estado del sistema.

Con el fin de monitorear las variables censadas, en la parte media se dejó el acceso a las señales acondicionadas de los sensores, siendo todas voltajes analógicos en un rango de 0-3 volts, que pueden conectarse un sistema de adquisición para almacenar la información de las variables del sistema.

4.1.3.3. Programación del algoritmo de control

El algoritmo de automatización y control, fue codificado en lenguaje C mediante el software Code Warrior v6.2, creando y utilizando funciones en modo de procesador experto.

El código fuente del firmware consta de una función principal denominada *main* y otras funciones que realizan tareas específicas, además de una serie de eventos que se activan por las interrupciones de algunos módulos configurados². El programa se puede dividir en funciones de interfaz y funciones de control.

Funciones de interfaz

void PrintSbumenu(void), esta función es la encargada de mostrar en pantalla (LCD) los diferentes menús y sus contenidos, su estructura se muestra a continuación:

- Lectura de sistema (Menú):
 - Robur (Submenú): muestra la temperatura de salida y entrada del sistema de enfriamiento.

²El código del firmware, se incluye en el disco que contiene la tesis en versión digital.

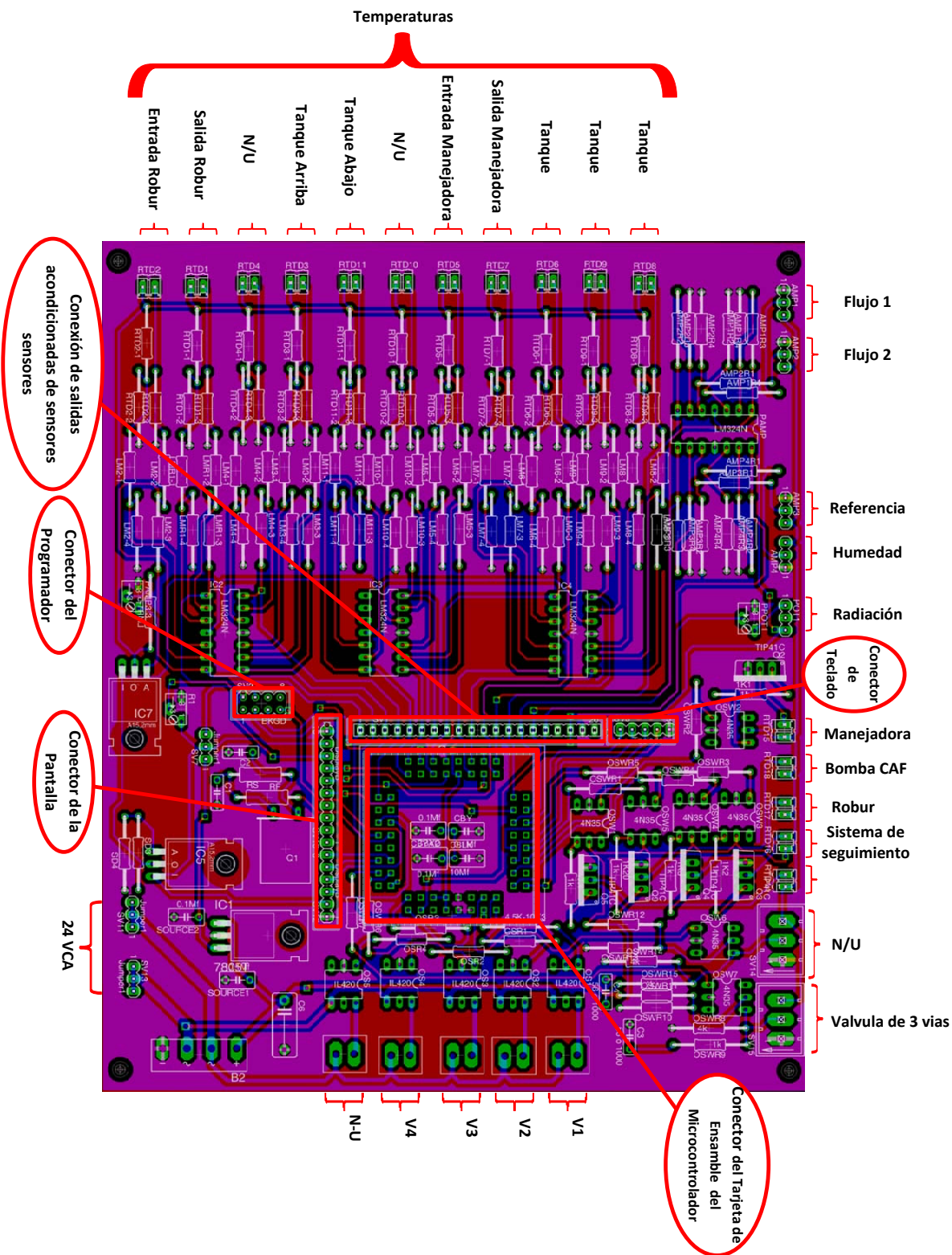


Figura 4.19: Descripción de conexiones del controlador del sistema de aire acondicionado solar.

- Temperatura de entrada °C
- Temperatura de salida °C
- Tanque (Submenú): muestra las diferentes temperaturas del tanque de almacenamiento de frío.
 - Temperatura de entrada °C
 - Temperatura de salida °C
 - Temperatura promedio °C
- Manejadora (Submenú): muestra la temperatura de entrada y salida de la manejadora de aire.
 - Temperatura de entrada °C
 - Temperatura de salida °C
- Flujo (Submenú): muestra el flujo másico emitido por la bomba de circulación.
 - Flujo *GPM*
- Punto de consigna (Indicador): se muestra la temperatura de consigna (el valor pre-establecido es de 25 °C, el cual puede cambiarse con una variación de 0.1 °C).
- Temp (Indicador): se muestra la temperatura de la vivienda en °C.
- Estado (Indicador): se muestra el estado del sistema (encendido o apagado)
El controlador inicia en el menú principal mostrando en la primera pantalla los menús: lectura del sistema, punto de consigna, la temperatura de la vivienda y el estado del sistema, donde la referencia y el estado pueden ser manipulados, la lectura del sistema es un menú, el cual contiene submenús con diferentes opciones de monitoreo.

void Contador(void), esta función se encarga de contar el tiempo determinado para actualizar las variables de los menús, por ejemplo es un cronometro el cual cuenta hasta 3 s para modificar los valores como: temperatura de la vivienda y las diferentes opciones de monitoreo.

Funciones de control

void Control(void), en esta función se codifico principalmente el algoritmo de control propuesto en la etapa de la simulación.

void PonerModoOperacion(char modo), como su nombre lo indica modifica el modo de operación del sistema de aire acondicionado según el parámetro modo, esto se realiza mediante terminales de algunos puertos configurados como salidas digitales, activando opto-aisladores que cierran el circuito de válvulas solenoides y contactores.

void DAC(int Ttrabajo), en el desarrollo del acondicionamiento del control de la válvula proporcional de 3 vías, se desarrolló el hardware para generar la señal de voltaje analógico mediante el uso de una señal PWM, para dicha forma de onda se configuró uno de los temporizadores del MCU en modo PWM. En esta función se modifica el ciclo de trabajo de la señal modulada por ancho de pulso a través del parámetro Ttrabajo, que va desde 0 a 65536 donde es equivalente a 0 y 100 % del ciclo de trabajo en alto.

bool HaySol(void), una de nuestras principales variables de control es la radiación, y fue necesario realizar una función que verificara el estado del recurso solar. Esta función compara la intensidad de radiación solar proporcionada por el sensor, con un punto de consigna prefijado por el usuario. Esta función regresando un valor positivo si la radiación está por encima del punto de consigna de lo contrario regresa un valor negativo. La condición o comparación que realiza la función, se basa en un comparador de histéresis basado en tiempo.

void ControlTempTanque_Run(void), el modo de operación 3 consiste en enfriar la vivienda con el frío almacenado en el tanque, para ello debemos saber si el tanque cuenta con suficiente reserva de frío, esta función compara si el ΔT entre el agua fría del tanque y la temperatura de la vivienda a enfriar es mayor a $10^{\circ}C$, si lo es, la función modifica el valor de una bandera a verdadero, de lo contrario será falso.

void ControlTempVivienda_Run(void) Esta función determina si el espacio solicita servicio de climatización, por ejemplo si la vivienda está por debajo del punto de consigna y se cuenta con recurso solar, el sistema de control entra en modo de almacenamiento de frío, de lo contrario entra en modo de apagado, esto depende de las diferentes variables climáticas (más detalles en el algoritmo de la figura 3.7).

Eventos

void ControlPID(void), el control de la temperatura de la vivienda se realiza enviando una cantidad de agua fría a la manejadora para retirar el calor ganado de la vivienda, y con ello mantener la temperatura de consigna que a su vez se traduce en confort al usuario. El control de la temperatura de la vivienda se realiza mediante la válvula de 3 vías donde se direcciona el flujo de agua necesario a la manejadora y el restante al tanque de almacenamiento. El controlador clásico PID en formato digital es utilizado para mantener los flujos de agua necesarios a la salida de la válvula, este evento es configurado con la máxima prioridad para ejecutarse cada 0.5 segundos, con lo que se logra un tiempo definido entre cada tiempo de integración y derivación para las constantes I y D. Para mover físicamente la apertura de la válvula de 3 vías, se envía la señal de control con un rango de 0 a 65536 como parámetro a la función DAC(int Ttrabajo) donde Ttrabajo es la señal de control.

void LeerSensores_OnInterrupt(void), en esta función se realiza la lectura de los sensores de temperatura, flujo y radiación, el sensado se realiza activando una interrupción la cual manda llamar la función LeerSensores_OnInterrupt(void), mediante los canales del Convertidor Analógico Digital se captura las señales analógicas provenientes de los sensores, una vez estando en memoria se hacen los cálculos necesarios para transformar la señal de voltaje en su correspondiente valor de origen. Para disminuir el ruido causado por interferencias, se realiza un análisis estadístico para obtener el valor más probable, esto consiste en 255 lecturas por cada sensor para calcular el promedio o el valor más probable.

void IntTeclado(void), el teclado esta compuesto por 4 interruptores de presión (conocidos como *switch buttons*) conectados a 4 terminales de un puerto del microcontrolador, asociados a los módulos de interrupción de teclado, es decir, se configuraron las 4 terminales como entrada de teclado, así al presionar un botón se genera una interrupción para ejecutar la función de IntTeclado(void), donde se identifica que botón a sido presionado.

4.1.3.4. Ajustes y calibración de componentes

Sensor de radiación, después de desarrollar la etapa de acondicionamiento del sensor fotoeléctrico, fue necesario caracterizarlo para obtener una estimación de la radiación. El procedimiento consistió en tomar la lectura de la radiación con un piranómetro de primera generación Kipp & Zonnen y el voltaje emitido por el sensor de radiación, como se ilustra en la figura 4.20.

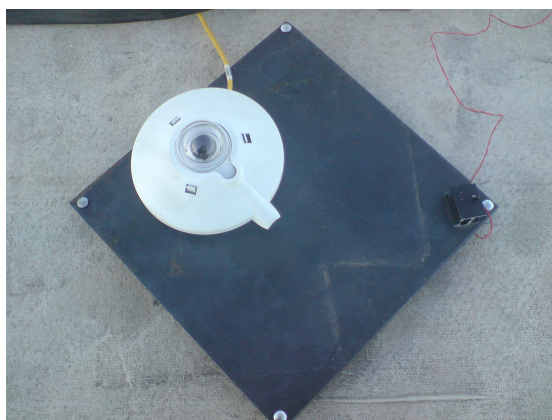


Figura 4.20: Piranómetro y sensor de radiación.

Con esta información se buscó la relación voltaje-radiación mostrada en la figura 4.21, con la que se obtuvo la regresión exponencial de la Ecuación 4.7, que determina la radiación con respecto el voltaje del sensor.

$$Radiacion = e^{(5.26437 - 0.45373V + 0.47247V^2)} \quad (4.7)$$

donde V es el voltaje emitido por el sensor de radiación.

En la figura 4.21 puede observarse que el mínimo de la radiación estimada es de $190 \frac{W}{m^2}$ por lo que el modelo no funciona por debajo de este valor, sin embargo la radiación de operación de los cilindros parabólicos esta muy por encima de los $200 \frac{W}{m^2}$.

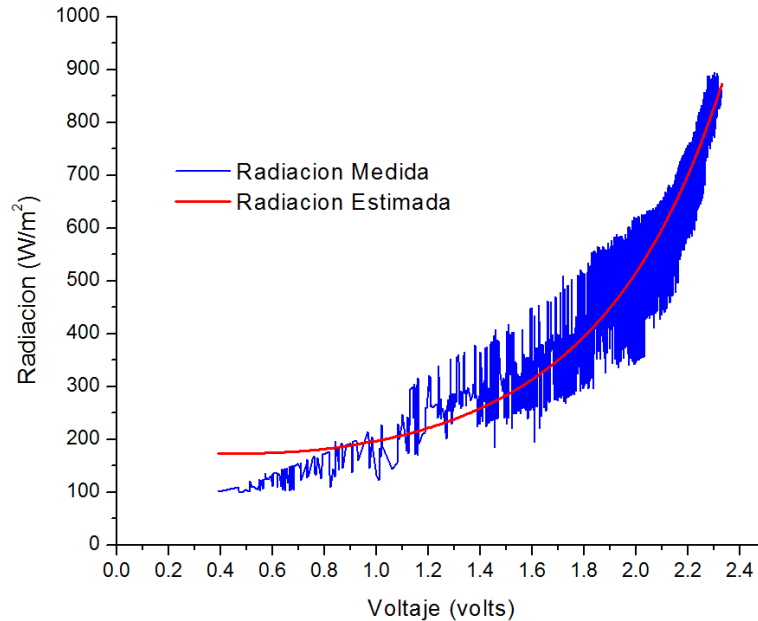


Figura 4.21: Caracterización del sensor de radiación.

Sensores de temperatura, ya se ha mencionado que los sensores de temperatura utilizados, varían su resistencia eléctrica con respecto a su temperatura. Los sensores fueron instalados estratégicamente en diferentes puntos para medir temperaturas que ayuden al análisis experimental, debido a que unos puntos se encuentran más alejados que otros con respecto al sistema de control, obligó a incorporar una extensión de cable en algunos de ellos, lo que modifica su impedancia de salida original. Debido a lo antes mencionado es necesario realizar una compensación de temperatura, para ello se realizó una calibración de los sensores de temperatura. El proceso de calibración se llevó a cabo con un instrumento para calibrar transductores de temperatura marca AMETEK, la función del equipo es mantener una cámara a una temperatura de consigna, a cada sensor se le sometió a diferentes temperaturas de referencia. En la figura 4.22, se observa la temperatura en diferentes puntos de referencia, sobresaltando que en algunos casos la desviación es de hasta $20^{\circ}C$ con respecto a la referencia, sin embargo el error se mantiene constante, corrigiéndolo con una regresión lineal que depende de la resistencia. Las correlaciones obtenidas se observan en la tabla 4.1, donde T es la temperatura del sensor y T_c es la temperatura compensada, las ecuaciones son utilizadas en la función

void LeerSensores_OnInterrupt(void) para corregir las imperfecciones del sensor, etapa de acondicionamiento y desviación de temperatura por cableado.

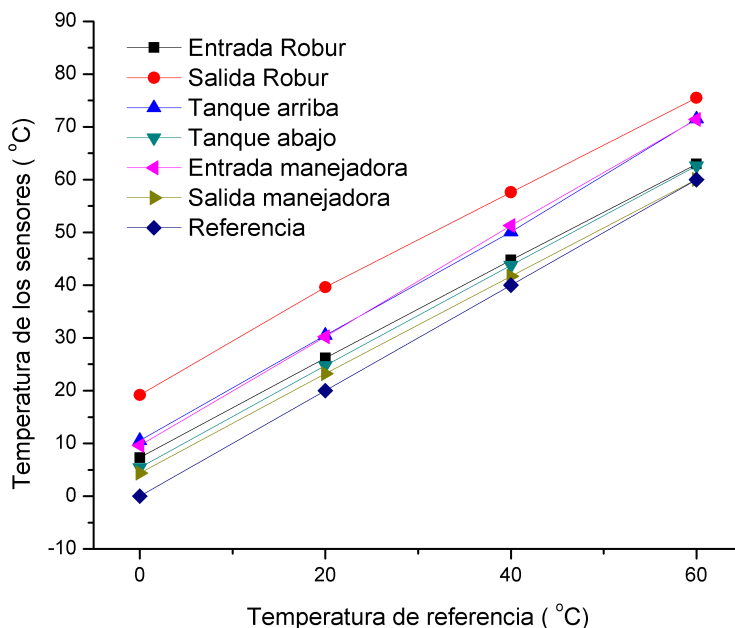


Figura 4.22: Curva de calibración de los sensores de temperatura RTD PTC100.

Sensor	Correlación
Entrada Robur	$T_c = -8.03 + 1.07T$
Salida Robur	$T_c = -21.26 + 1.06T$
Tanque arriba	$T_c = -10.15 + 0.98T$
Tanque abajo	$T_c = -5.81 + 1.04T$
Entrada manejadora	$T_c = -9.34 + 0.96T$
Salida manejadora	$T_c = -4.88 + 1.07T$

Cuadro 4.1: Correlaciones de corrección para los sensores de temperatura.

4.2. Diseño y construcción del sistema de control de seguimiento solar

En esta sección se presenta el diseño y construcción de un sistema de control electrónico para el seguimiento solar en un eje, implementado en el concentrador

parabólico descrito previamente. El sistema de seguimiento solar permite realizar un enfoque y desenfoco de forma segura, precisa y automática, con la opción de ser manipulado manualmente y a través del CSAAS. El algoritmo se encuentra basado en un controlador de lazo cerrado por sensores fotoeléctricos.

El circuito electrónico está constituido por un microcontrolador acompañado de etapas de acondicionamiento para las señales proveniente de los sensores, además de una etapa de potencia para activar al motor que proporciona movimiento al Concentrador Cilindro Parabólico (CCP). Dentro de las características del circuito electrónico, se maneja una pantalla de cristal líquido y algunos botones para navegar en el menú de opciones de funcionamiento y estado del sistema, como innovación se incluye una función que calcula el porcentaje de histéresis según la intensidad de radiación³.

Analizando el sistema de enfriamiento solar y las necesidades por parte del sistema de captación, ya sea para su funcionamiento, pruebas o mantenimiento, surgieron los siguientes puntos:

- Enfocar de forma automática.
- Modo de desenfoco.
- Modo de apagado.
- Mover motores.
- Permitir manipular el sistema de seguimiento entre el modo de enfoque y desenfoco, por medio del SCAAS.

4.2.0.5. Sensores fotoeléctricos

El fototransistor es sensible a la incidencia de la luz visible o infrarroja, es un componente electrónico cuya corriente se incrementa con el aumento de intensidad de luz incidente, al conectarlo con una resistencia en serie como se observa en la figura 4.23a, permite cuantificar la radiación y utilizar este dispositivo como transductor. El sensor de la figura 4.23b, se encuentra normal al plano de la cubierta del cilindro parabólico, las decisiones para mover el concentrador se encuentra basada en sombreados de los sensores como se ilustra en la figura 4.24, es decir, el algoritmo de posicionamiento busca mantener los dos fototransistores con la misma intensidad de radiación, y esto ocurrirá cuando ambos estén sombreados, como es el caso de la figura 4.24b, de lo contrario cuando un fototransistor reciba mayor incidencia de radiación, el cilindro girará como en la figura 4.24a o figura 4.24c. La radiación varía con respecto a la hora del día y factores climatológicos, por lo tanto, si se cuenta con un punto de consigna fijo, el error al posicionamiento también variaría, por ello se decidió realizar el cálculo de la histéresis a partir de un porcentaje de la radiación del fototransistor con más incidencia de recurso solar.

³Para detalles de los circuitos esquemáticos ver Apéndice B

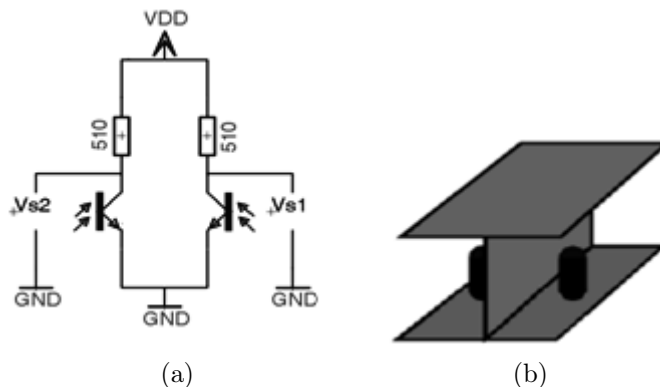


Figura 4.23: Diagrama electrónico y estructura de los sensores fotoeléctricos.

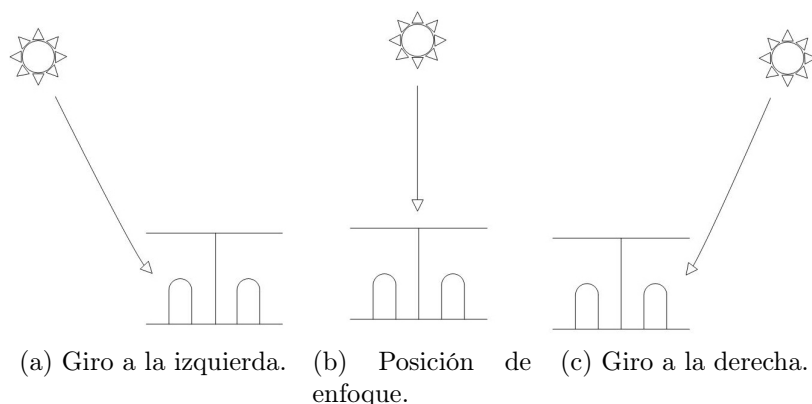


Figura 4.24: Movimiento del cilindro parabólico según la posición del sol en los sensores fotoeléctricos.

4.2.0.6. Sensores de límite

Constan de 2 contactos de presión, donde el motor es conectado en serie, entre las terminales normalmente cerradas como se muestra en la figura 4.25. Los sensores son instalados en la parte inicial y final del recorrido del cilindro parabólico, así al llegar al final el sensor es activado, y cambia de la posición normalmente cerrada a la normalmente abierta, con ello se abre el circuito, dejando sin movimiento al motor. Los diodos D1 y D2 son de gran importancia, ya que si se requiere mover el motor en la posición contraria al límite sería imposible. Con la ayuda de esos componentes nos permiten circular la corriente en la dirección indicada, es decir, el cilindro parabólico está en el tope del límite superior donde SW1 se encuentra en la posición normalmente abierto y el diodo D1 impide el flujo de corriente al encontrarse polarizado inversamente, al invertir la polarización para girar el motor al lado contrario, el diodo D1 permite el paso de la corriente haciendo un puente (*bypass*) a SW1, para que el motor pueda girar,

después de un tiempo el switch se desactiva y vuelve a la posición normalmente cerrada, hecho esto la corriente circula en operación normal a través del interruptor.

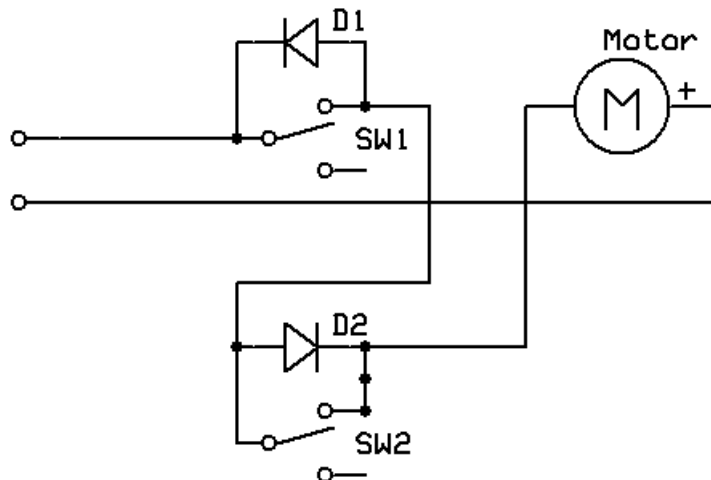


Figura 4.25: Sensores de límite.

4.2.1. Creación de circuitos impresos

Para la implementación en hardware del sistema de control, se creó el diagrama esquemático y la plantilla del sistema de seguimiento solar mediante el software especializado EAGLE, consecutivamente se elaboraron circuitos impresos (más detalles ver Apéndice B). El impreso del circuito de control mostrando en la figura 4.26 ilustra que en la parte superior hay conexiones para: (1) entradas para cuatro fotosensores y dos entradas para sensores de posicionamiento, equivalente a dos sensores para ejecutar el sistema en 2 ejes y (2) entrada para manipular remotamente el sistema de seguimiento. Por la derecha se encuentra la conexión de control y alimentación para la pantalla de cristal líquido, por la izquierda un conector de alimentación de 12VCA para proveer de corriente eléctrica al sistema de control para el seguimiento solar. En la Parte baja se muestran conexiones para el teclado y un bus de datos para interconectar el sistema de control y el puente H.

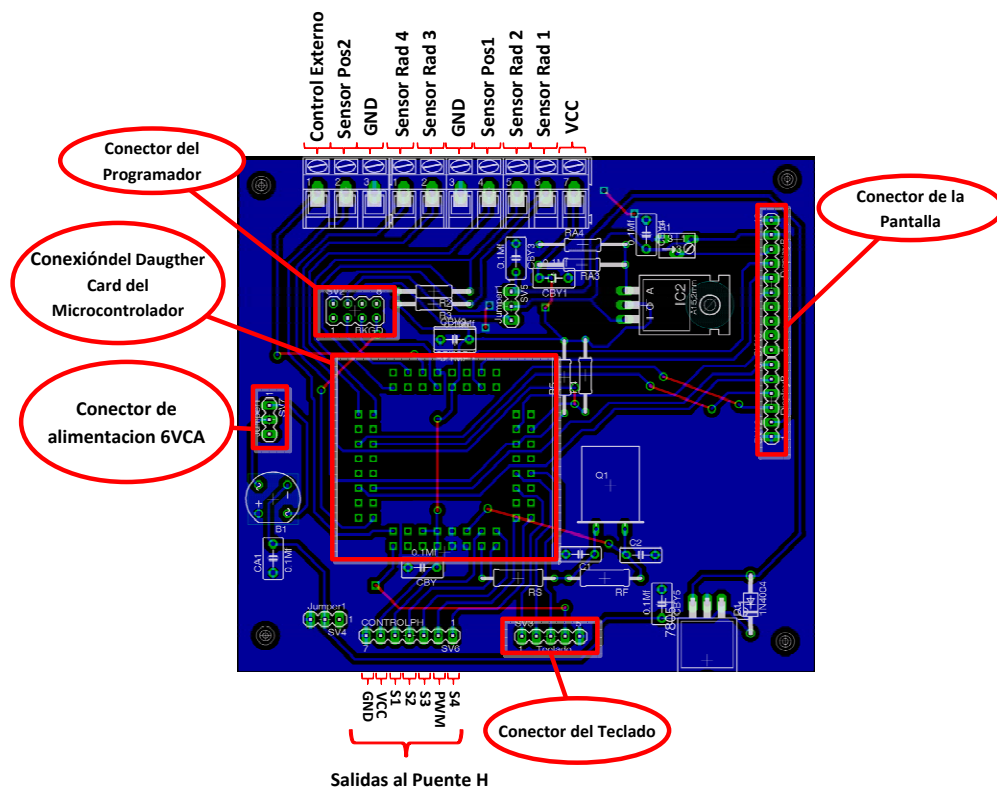


Figura 4.26: Tableta del sistema de control para el seguimiento solar.

En la figura 4.27 se muestra la tableta del puente H del sistema de seguimiento, sólo cuenta con el bus de datos ya antes mencionado, conexión del motor a controlar y la alimentación del motor 12VCA.

Los circuitos impresos elaborados se adaptaron a una caja de uso exterior para protegerlo de la radiación solar y exposición al deterioro con el medio ambiente, como lluvia, polvo, sol o viento. Dentro de la caja se incluye el impreso del circuito de control mostrando en la figura 4.26, el circuito de potencia (puente H) en la figura 4.27, fuente de alimentación del motor y la interacción con el usuario se lleva a cabo mediante la pantalla de cristal líquido y el teclado.

El prototipo final cuenta con entradas de alimentación de corriente alterna 127 volts 60 Hz, salidas de control hacia el motor de desplazamiento angular y entrada de los sensores de radiación y posicionamiento. La incorporación del sistema de seguimiento en el control de la unidad de enfriamiento se realiza mediante un bit de entrada, que activa una interrupción por hardware en el microcontrolador, donde el valor de uno en el sistema de seguimiento es modo de desenfoque, ignorando cualquier acción realizada manualmente.

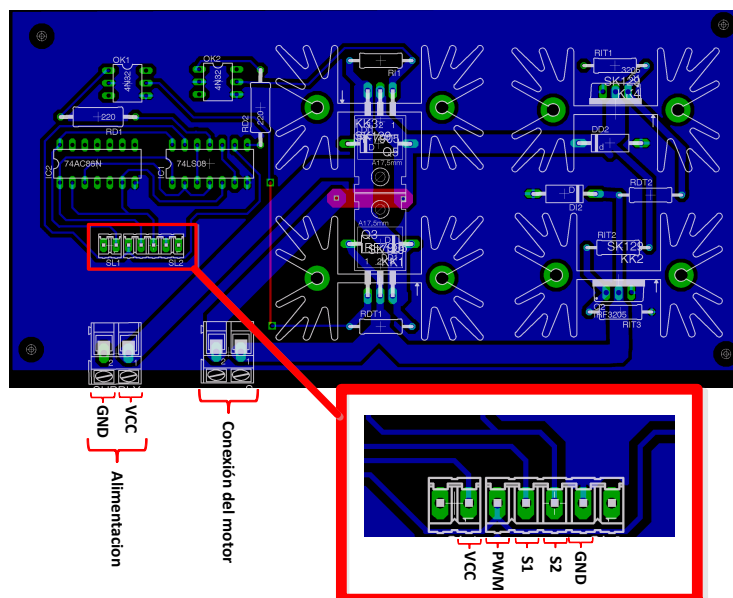


Figura 4.27: Tableta del puente H del sistema electrónico para el seguimiento solar.

4.2.2. Programación del algoritmo de control

El algoritmo de control de la figura 4.28, fue implementado en el microcontrolador programado en lenguaje C mediante el software Code Warrior v6.2, creando y utilizando funciones en modo de procesador experto.

El código para la realización del firmware consta de una función principal denominada main y funciones que realizan tareas específicas, además de una serie de eventos que son activados por interrupciones. El programa se puede dividir en funciones de interfaz y funciones de control⁴.

Funciones de interfaz

void MenuSeguimiento(void) Esta función se encarga de mostrar en pantalla los diferentes estados del sistema, que son los siguientes:

- Enfoque (submenú): al seleccionar este submenú, se ejecuta el algoritmo de posicionamiento de la figura 4.28, donde el algoritmo lee el voltaje de los sensores fotoeléctricos, para determinar cual de los fototransistores cuenta con mayor incidencia del recurso solar. La histéresis del comparador, se obtiene multiplicando el porcentaje de error (PE) por la cantidad de voltaje del fototransistor con más incidencia de radiación. El enfoque se realiza mediante el comparador de histéresis, que decide a donde mover el motor de acuerdo al sombreado en los sensores (en la figura 4.24).

⁴El código del firmware, se incluye en el disco que contiene la tesis en versión digital.

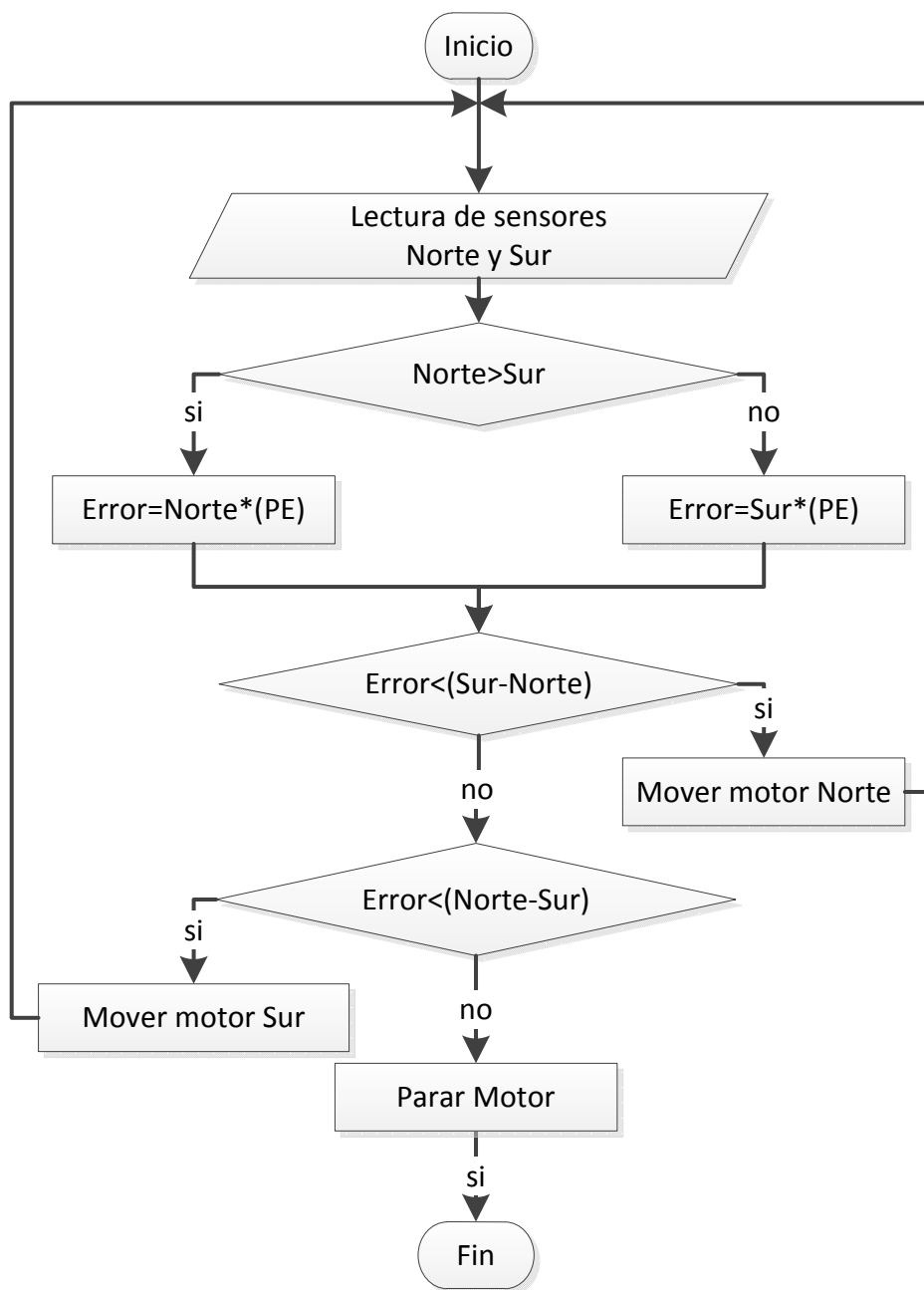


Figura 4.28: Algoritmo de control para el sistema de seguimiento solar.

- Desenfoco (submenú): este submenú manda llamar a la función void Desenfoco(void).
- Apagado(submenú): al seleccionar este submenú el sistema queda inactivo. Al seleccionar el modo enfoque, se ejecuta el algoritmo de posicionamiento, de igual manera para el modo de desenfoco. En modo de apagado el sistema permanece inactivo.

void MenuMoverMotores(void) , Esta función muestra en pantalla los diferentes movimientos que puede tomar el motor, mediante el teclado se puede seleccionar manualmente la opciones de arriba, abajo e inactivo.

void Desenfoco(void), cuando el sistema de control se activa en modo desenfoco, el controlador mueve el cilindro hacia el lado norte hasta llegar al tope donde se encuentra los sensores de limite que cortan la corriente al motor. Al desactivar la opción de desenfoco el sistema mueve el cilindro parabólico durante 20 segundos para posicionar al cilindro horizontalmente y a partir de ahí los sensores pueden comenzar a realizar el enfoque.

Funciones de Control

void moverMotor(int lado), para mover físicamente el motor se configuraron 3 terminales del MCU como salidas de señales discretas, que se envían al puente H de la figura 4.27, donde 2 bits indican la activación y sentido del motor, el tercer bit es una señal modulada por ancho de pulso (PWM), con la cual se logra variar el voltaje del motor para modificar su velocidad. El Parámetro *lado* es un valor entero que indica el sentido del motor, este puede tomar valores, *DERECHA*, *IZQUIERDA* y *PARAR*, cada una está declarada como definiciones dentro del programa, las cuales tienen asignado un valor entero. La señal PWM descrita en la sección 4.1.3.3 es generada mediante uno de los temporizadores del microcontrolador para variar la velocidad del motor, el valor del periodo y el ciclo de trabajo son asignados directamente a los registros de dicho modulo.

Eventos

void IntTeclado(void), el teclado está compuesto por cuatro botones conectados a cuatro terminales de un puerto del microcontrolador configurados como interrupción de teclado, así al presionar un botón este genera una interrupción para ejecutar la función de IntTeclado(void), donde se identifica qué botón a sido presionado.

void DesenfoqueI(void), este evento se acciona cuando la terminal de entrada usada para el desenfoque es puesto en 1 lógico, este evento inmediatamente manda llamar a la función Desenfoque(), al poner de nuevo la entrada en un 0 lógico el microcontrolador regresa al punto en donde se encontraba.

Capítulo 5

Implementación y estudio experimental

5.1. Controlador del sistema de aire acondicionado solar del CSAAS

Una vez construido el circuito impreso del controlador del sistema de aire acondicionado, se prosigue con la conexión de los sensores, actuadores, unidad de enfriamiento, manejadora de aire y la bomba del circuito de agua fría. Los elementos de potencia se conectaron a contactores que se instalaron sobre una base metálica junto con interruptores, para manipularlos de forma manual. En la parte media de la figura 5.1a se ilustran los componentes electromagnéticos ya mencionados, en la parte media alta se observa un espacio vacío para incorporar el controlador. por ultimo en la parte superior se encuentra un transformador de 120 VCA a 12VCA, para proporcionar el voltaje de alimentación de los circuitos.

La interfaz de usuario se construyó en un tablero de acrílico donde se ensamblan la pantalla de cristal líquido y botones de presión que manipulan el menú del controlador, se incluyeron 4 interruptores para controlar manualmente la apertura de las válvulas solenoides y un último interruptor que se encarga de energizar el sistema de control.

Para recaudar información del estudio experimental, fue necesario el monitoreo y almacenamiento de las variables del experimento, para ello se utilizó un sistema de adquisición de datos National Instrument modelo NI USB-6212, que se conectó al circuito CSAAS para obtener las señales acondicionadas por los sensores en magnitud de voltaje. El sistema de adquisición de datos, a su vez es interconectado a una computadora personal con el sistema operativo Windows 7 y el software de National Instrument labview 8.6, donde se programó la interfaz de monitoreo y almacenamiento de datos.

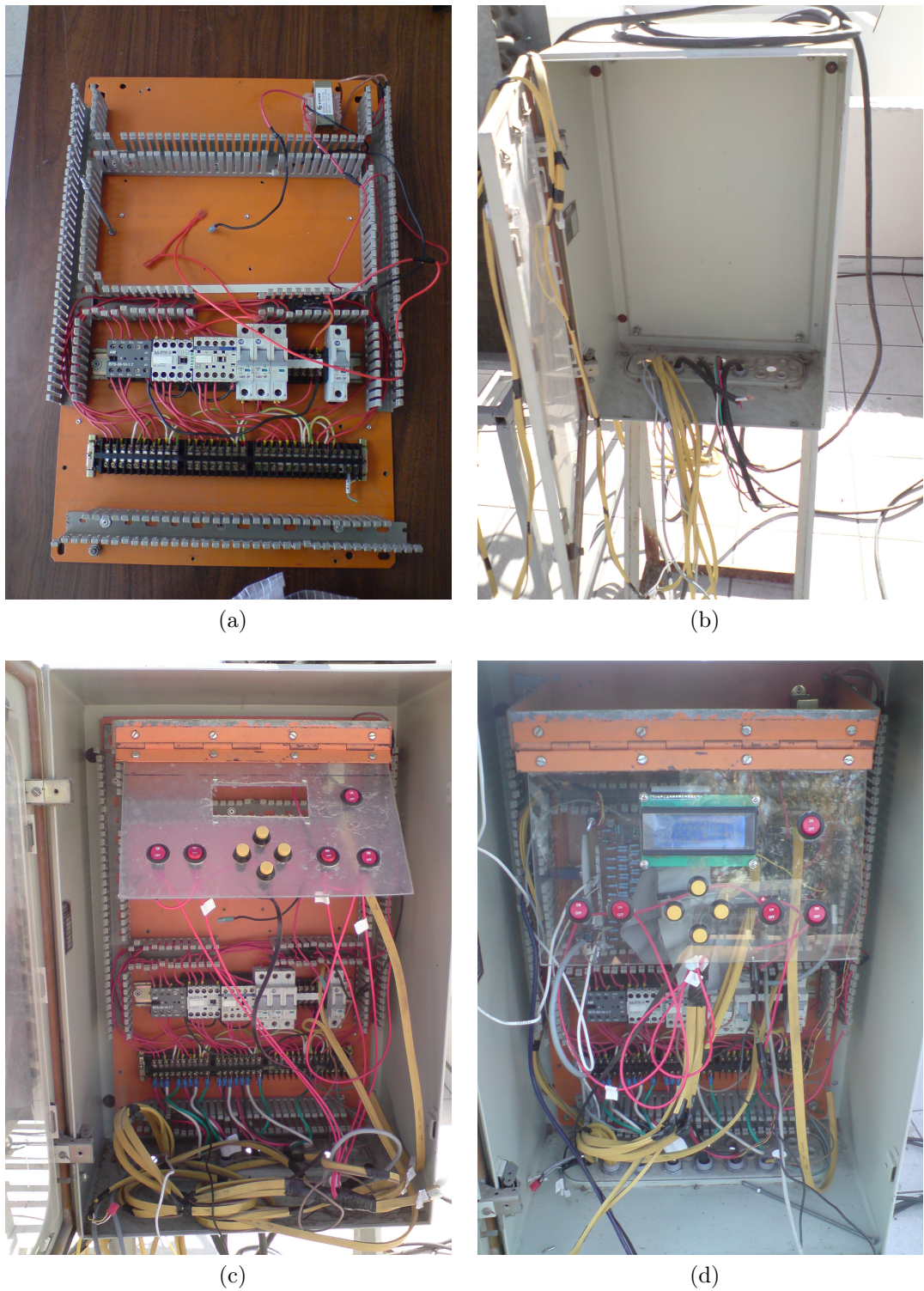


Figura 5.1: Instalación del controlador del sistema de aire acondicionado.

En el sistema de control se consideró el circuito impreso del CSAAS, un sistema de

adquisición de datos y las conexiones de los sensores y actuadores. El sistema de control terminado se muestra en la figura 5.1d, que cuenta con la interfaz de usuario y dos conexiones USB, una para conectar el sistema de adquisición de datos a la computadora y la otra para depurar y programar el microcontrolador.

Todo esto se introdujo en la caja de uso exterior de la figura 5.1b, para darle protegerlo del sol, polvo, lluvia, viento y cualquier factor climatológico que pudiera deteriorar los componentes electrónicos. Una vista preliminar y final del CSAAS pueden ilustrarse en las Figuras 5.1c y 5.1d.

5.1.1. Puesta en marcha de la unidad experimental

Una de las primeras etapas del trabajo experimental consistió en verificar el estado de los diferentes componentes y la calidad de la construcción, así como el correcto funcionamiento de sensores y el sistema de adquisición de datos. Para esto se siguieron los siguientes pasos:

- **Llenado del tanque de almacenamiento:** el tanque de almacenamiento se lleno con 1100 *lts* de agua purificada, para disminuir la corrosión y mal funcionamiento en equipos e instrumentación.
- **Localización y reparación de fugas:** con el tanque de almacenamiento de frío cargado de agua, se continuó con el chequeo de fugas, para ello se abrieron las válvulas de paso que aíslan el tanque de almacenamiento del circuito de tuberías. Mientras el agua circulaba entre las tuberías se liberaba el aire con la ayuda de las válvulas de purga, con las tuberías llenas de agua se localizaron y repararon fugas.
- **Chequeo de conexiones eléctricas y electrónicas:** en este paso se aseguraron los voltajes requeridos en en equipos, sensores y elementos finales de control, además de hacer una lectura de prueba en todos los sensores, mediante el sistema de adquisición de datos y el CSAAS.
- **Prueba de elementos finales de control:** se probó la apertura de cada válvula solenoide a través del tablero de manual, revisando la conmutación de ellas mediante el sonido que provoca el solenoide, el mismo procedimiento se realizó con el CSAAS.
- **Arranque de bomba de agua fría:** se alinearon las electroválvulas en el modo operación 3, con el flujo de agua al mínimo se puso en funcionamiento la bomba de, gradualmente hasta llegar al flujo másico de trabajo, el procedimiento se realizó para evitar golpeteos bruscos hacia la unidad de enfriamiento y unidad manejadora.
- **Purga del circuito de agua fría:** con el fin de que el agua en circulación arrastre al aire hacia los puntos de purga, las electroválvulas se alinearon en

un modo de operación especial, el cual no está asociado con los modos de funcionamiento normal, en este modo de operación se toma agua por debajo del tanque almacenamiento de frío, para ser enviada a la unidad de enfriamiento y la unidad manejadora, por último el agua llega de nuevo al tanque de almacenamiento de frío por la parte superior, mientras el agua circulaba entre las tuberías se liberaba el aire con la ayuda de las válvulas de purga en los diferentes equipos y puntos del sistema.

- **Arranque de la unidad de enfriamiento:** el equipo de enfriamiento Robur cuenta con un interruptor de maniobra, que se encarga de encender el equipo para producir frío. Con la unidad manejadora y la bomba de agua fría encendida, se activa dicho interruptor de maniobra, con lo que la unidad de enfriamiento puso en funcionamiento el quemador de gas, para activar el ciclo por absorción y empezar con la generación de frío. Durante la operación se verificó que el equipo Robur no marcará ninguna alerta, además del monitoreo para constatar el funcionamiento de los equipos instalados y las tendencias de operación.

5.1.2. Pruebas experimentales

El proyecto se conforma por la unión de trabajos multidisciplinarios con algunos de ellos en fase de desarrollo, por tal motivo el Sistema de Aire Acondicionado Solar (SAAS) aun no se encuentra terminada en su totalidad. Por el momento el sistema de climatización está instalado a la intemperie, donde el aire que absorbe la unidad manejadora se encuentra a temperatura del medio ambiente, e intercambia calor con el agua proveniente del equipo de absorción o tanque de almacenamiento de frío. Para efectos prácticos la propuesta se evaluó con el equipo operado a fuego directo, considerando que la unidad de enfriamiento trabaja con recurso solar a su máxima capacidad. Como variable controlada se tiene la temperatura del aire de salida de la unidad manejadora, para ello el sistema de control manipula el flujo de agua entrante a la manejadora de aire a través de la válvula proporcional de 3 vías. Aunque el escenario descrito no es el de aplicación real, se pueden obtener resultados y conclusiones extrapolables, como para determinar si la configuración y el circuito SCAAS cumplen con el objetivo planteado.

La primera fase del estudio experimental consistió en conocer la dinámica del equipo en cuanto al arranque, estabilización, paro e inercias producidas por el ciclo de absorción, además de verificar que los modos de operación funcionaran de acuerdo al algoritmo de control. Como el sistema simulado no coincide exactamente con el sistema real, se realizó un nuevo ajuste en las constantes del controlador, que consistió en:

- Encender el sistema de control con las constantes en 0.
- Alinear las válvulas para trabajar en modo de operación 2.
- Encender el sistema de climatización.

- La constante proporcional se incrementó de manera gradual, hasta que la variable de control se mantuvo en oscilación fija.
- La constante integral se elevó hasta disminuir la oscilación lo menos posible.
- La constante derivativa, se descartó debido que su presencia en la operación ayudaba a descontrolar el sistema cuando existían perturbaciones.

En la segunda fase se probaron diferentes temperaturas de consigna, con el fin de variar la carga térmica a la cual se somete la unidad manejadora y provocar perturbaciones hacia el sistema de control.

5.1.3. Procesamiento y análisis de la información

En la corrida de la figura 5.2, se observa que la temperatura de consigna es de $15^{\circ}C$, el sistema arranca, tardando cerca de los 10 minutos en alcanzar sus condiciones de nominales de operación, a partir de ahí con las constantes del controlador proporcional, integral y derivativa iguales a cero, la temperatura del aire de la salida de la manejadora oscila cerca de los $3^{\circ}C$, aproximadamente a las 10:00 *hr* cuando se incrementa la ganancia proporcional a $P = 130$, la variable controlada oscila con un máximo de $1^{\circ}C$, hasta a las 11:15 *hr* cuando la constante integral $I = 4$, se mantiene la temperatura sobre el punto de consigna.

Una vez ajustadas las constantes del controlador, la variable controlada aun presenta una ligera oscilación, debido a la perturbación obtenida por el equipo ROBUR, al conmutar entre prendido y apagado, de acuerdo al controlador TODO-NADA con histéresis incluido en el equipo ROBUR, el cual tiene como variable controlada la temperatura del agua de salida de la unidad de enfriamiento. Como parámetros del controlador de histéresis: $7^{\circ}C$ mínimo y $9^{\circ}C$ máximo, es decir, la unidad se apaga cuando la temperatura del agua de salida de la unidad decrece al mínimo valor de $7^{\circ}C$, y vuelve a prender cuando la temperatura se eleva hasta los $9^{\circ}C$, este comportamiento lo podemos observar a las 11 : 00 *hrs*, cuando la unidad se apaga, lo cual provoca que aumente la temperatura del agua de salida de la unidad de enfriamiento, lo que a su vez causa perdida de capacidad en la unidad manejadora, esta variación de temperatura es la que obtenemos como perturbación en el sistema de control. El fenómeno de incremento o decremento de la capacidad en la unidad Robur debido al funcionamiento intermitente, es similar al escenario que pudiese presentarse cuando la unidad trabaje con recurso solar, debido a la variación de la radiación.

Para analizar la automatización se observa que a la hora 15:00 cuando el nivel de radiación esta por debajo de los $400 \frac{w}{m^2}$ (punto de consigna para trabajar con energía solar) y al no haber tanque de almacenamiento, se cambia a modo de operación 4 (Biogas). A las 17 : 20 *hr* cuando el tanque cuenta con suficiente reserva de frío, el controlador se alinea para trabajar en modo 3 (enfriar con almacenamiento de frío). Las recomendaciones del fabricante indican que al apagar el equipo Robur debe mantenerse circulando agua en el evaporador, para retirar el frío producido por inercias térmicas

del equipo, por ello se puede observar que entre el modo de operación cuatro y dos, el sistema se apaga durante 10 minutos, por lo que la unidad pierde su capacidad frigorífica al grado de ir incrementando la temperatura de salida de la unidad y de la temperatura controlada, una vez terminada la etapa de apagado, el sistema entra en modo 3 (almacenamiento de frío), para seguir propiciando confort. A lo largo del experimento la señal de control se mantiene en un promedio de 5 volts, lo que indica que aproximadamente la mitad del frío generado fue depositado en el tanque de almacenamiento de frío, es decir, el área bajo la curva en la abertura de la válvula es la cantidad de agua que se envió a la unidad manejadora, la restante fue almacenada.

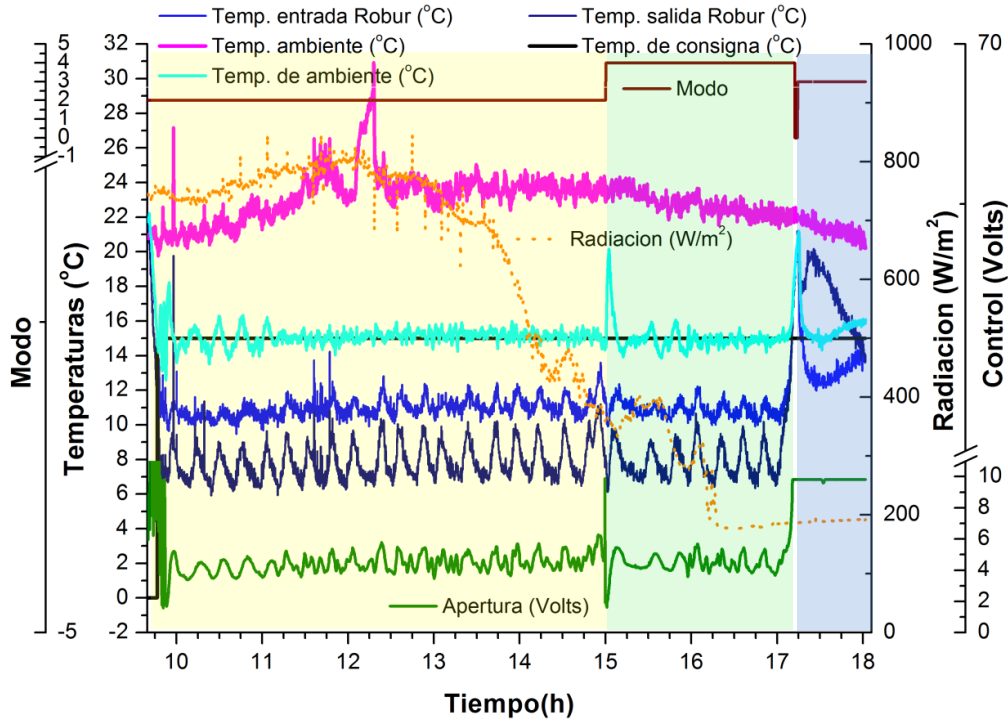


Figura 5.2: Operación del CSAAS en la planta piloto, de las 10:00 a las 18:00Hrs.

En la primera corrida de la fase dos que se muestra en la figura 5.3, el sistema de control enciende la unidad de enfriamiento en modo de operación dos. La unidad de enfriamiento nuevamente tarda aproximadamente 10 minutos para estabilizarse, con un punto de consigna de $15^{\circ}C$ y con un ΔT con respecto a la temperatura ambiente de $10^{\circ}C$, bajo éstas condiciones se observa que la temperatura controlada oscila en un promedio de $0.5^{\circ}C$. El siguiente paso fue elevar la temperatura de consigna, para ver la operación del controlador con la unidad manejadora trabajando a baja capacidad, el comportamiento fue el mismo, sin embargo la oscilación promedio aumento a $1^{\circ}C$. Para comprobar la tendencia una vez más se eleva el punto de consigna a $20^{\circ}C$, de nuevo se presentó la oscilación incrementando a un promedio de $2^{\circ}C$. Las oscilaciones presentadas a baja carga térmica, son ocasionadas debido a que la variable controlada cambia más rápido que el tiempo de respuesta del actuador, además que la variación

de la temperatura de salida de la unidad ROBUR, afecta cuando se manejan poco flujo en la manejadora de aire.

Alrededor de las 14:30 *hr* se tapó el sensor de radiación, para obligar al sistema a cambiar de modo de operación tres. Después del proceso de apagado y cambio de modo de operación, se fijó el punto de consigna a 20°C, para someter a baja carga térmica la unidad manejadora, se observa que no presenta las oscilaciones de ±2°C, a diferencia de cuando se operaba con la unidad de enfriamiento. Con la corrida 1 y 2 se demuestra que el controlador y el sistema, se ven afectados cuando existen bajas cargas térmicas en la unidad manejadora.

El sistema de control propuesto se realizó con el objetivo de implementarlo en el sistema de climatización solar, y uno de los requisitos es aprovechar al máximo el recurso solar, por lo que la unidad de enfriamiento en modo 2 permanecerá trabajando a plena carga, a diferencia de la unidad ROBUR que al ser diseñada para operar a fuego directo, presenta el problema de un funcionamiento intermitente, debido al tipo de controlador que trae implementado de fabrica dicha unidad. Para eliminar el problema de apagado por el controlador de histéresis en la unidad Robur, se propuso reconfigurar los parámetros del sistema de control contenido en dicho equipo, la configuración de fabrica indica que la histéresis tome como variable controlada la temperatura del agua de salida, la modificación consiste en cambiar la temperatura del agua de salida por la entrada, de esta manera, se amplía la ventana de histeresis hasta que se registre, que la temperatura de retorno baje a 7°C.

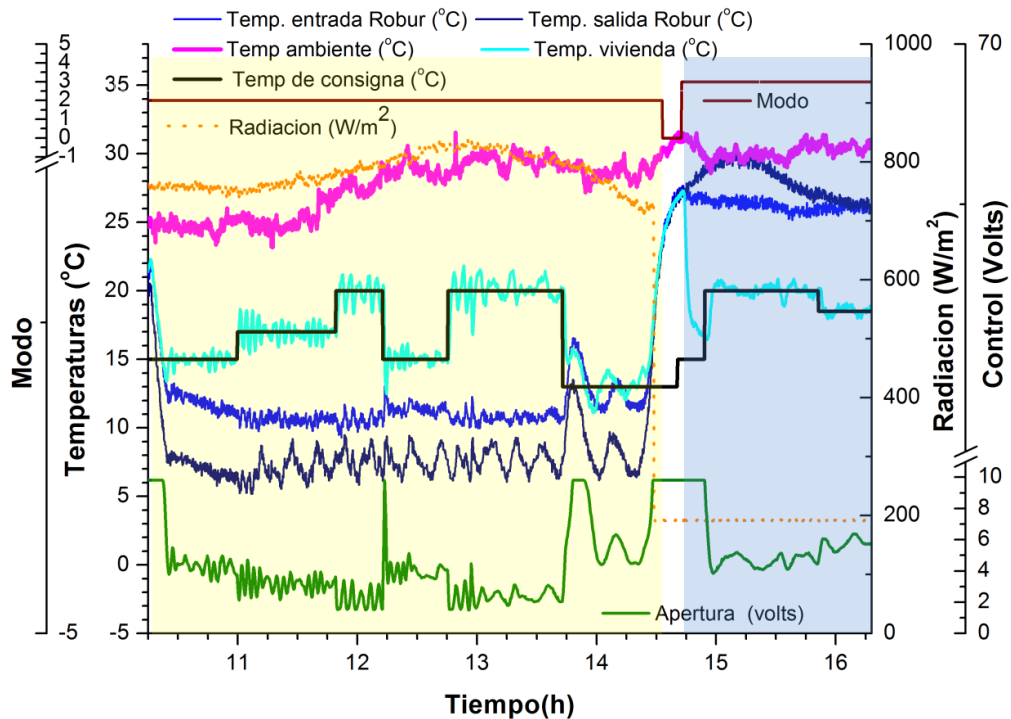


Figura 5.3: Operación del CSAAS en la planta piloto, de las 10:00 a las 16:00Hrs.

En la corrida número 3 mostrada en la figura 5.4, se puede apreciar el comportamiento del encendido de la Robur alrededor de la primera media hora, un detalle interesante surge en el momento de su estabilización, el equipo es encendido y alrededor de los 10 minutos de funcionamiento empieza a realizar el efecto frigorífico, debe notarse que a pesar de que la unidad aun no se encontraba en su temperatura, ni capacidad de operación nominal, se logró un buen control de temperatura a $20^{\circ}C$. Cuando el punto de consigna se elevó a $25^{\circ}C$, la carga térmica en la manejadora disminuye notablemente, obligando a disminuir su capacidad, cayendo de nuevo en el problema de oscilación de la variable controlada. A diferencia de la corrida 1 y 2, en esta ocasión, no se tiene el inconveniente de la conmutación de encendido y apagado de la unidad de enfriamiento, si no que la evolución de la temperatura de la variable controlada cambia demasiado rápido, por lo que la válvula de 3 vías trata de regular el flujo al mismo ritmo, afectando la temperatura de entrada del equipo ROBUR que a su vez afecta a su salida, este fenómeno perturba a la válvula de 3 vías evitando la estabilización de la variable controlada.

El sistema de enfriamiento por absorción, la configuración hidráulica y el sistema de control, están especificados y diseñados para trabajar en la climatización del espacio de una vivienda, debido que la evolución de la temperatura en una vivienda es más lenta que la temperatura controlada en el experimento, se espera que al implementar el controlador en el espacio a climatizar, ayude a disminuir la velocidad con la que se manipula la válvula de 3 vías y con ello atenuar oscilación presentada en la temperatura del agua de la salida en la unidad ROBUR.

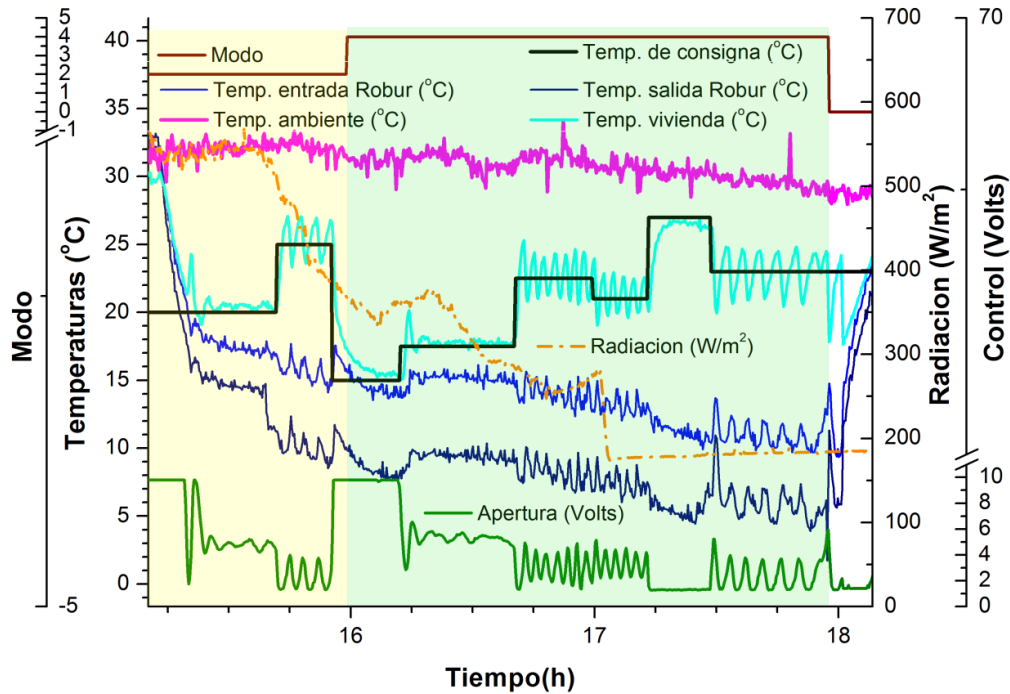


Figura 5.4: Operación del CSAAS en la planta piloto, de las 15:15 a las 18:00 hrs.

En la corrida de la figura 5.5, se observa la funcionalidad del sistema de climatización operado con el CSAAS trabajando en 2.5 horas continuas, se presenta la misma inercia de arranque y estabilización descrita, en cuanto a la funcionalidad, el sistema de control cambia de modo de operación según lo especificado en el algoritmo de automatización, además el controlador PID muestra un buen desempeño en el control de la temperatura.

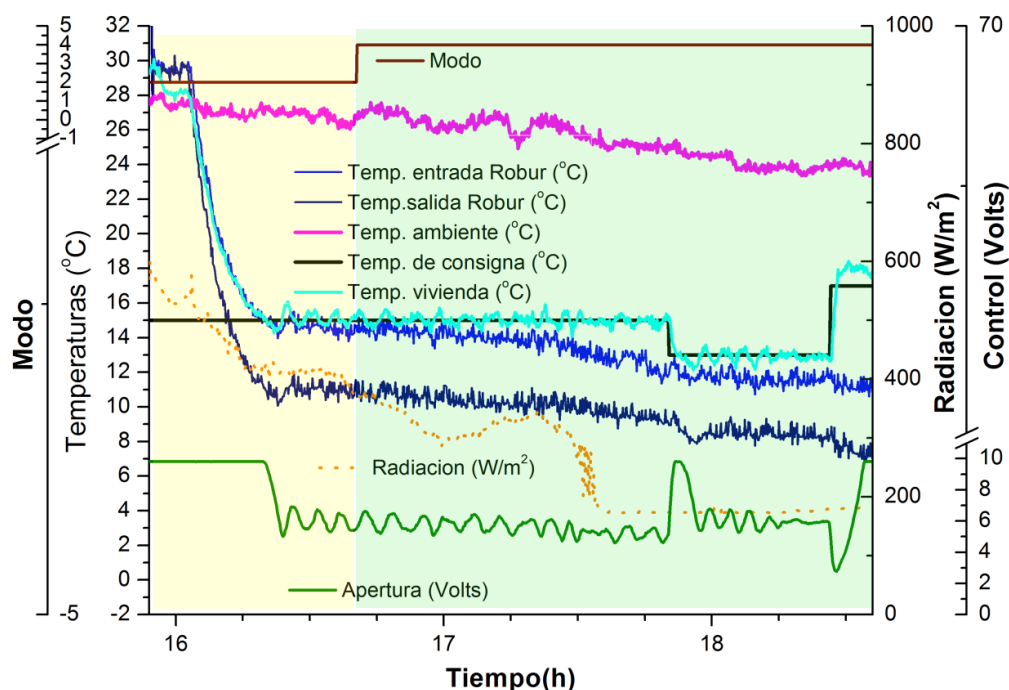


Figura 5.5: Operación del CSAAS en la planta piloto, de las 14:00 a las 18:30 Hrs.

Los resultados de la experimentación indican que el algoritmo propuesto para la automatización y control, permitió una operación segura para el sistema de climatización y/o el usuario. El buen funcionamiento del algoritmo de control en la temperatura del aire de salida de la manejadora, asegura que el sistema de climatización y el controlador, pueden extrapolarse para el uso del control de la temperatura de la vivienda.

5.2. Sistema de seguimiento

5.2.1. Arranque y ajuste

La etapa previa al arranque, consistió probar el sistema de seguimiento sin conectarlo al actuador, es decir, se checo que el voltaje en la etapa de potencia coincidía, según el sombreado en los sensores y el algoritmo de control. En la segunda fase, el motor sin estar montado en la estructura electromecánica, se conectó al sistema de seguimiento, para verificar verificando el giro y sentido del motor, además de verificar

si en la etapa de potencia del circuito de control sufría de calentamiento, se mantuvo girando el motor cerca de durante 30 minutos continuos para cada lado, sin presentar calentamientos o algún otro problema relacionado con el funcionamiento. La fase final consistió en operar el sistema de seguimiento con el motor montado en la estructura. Con ello el sistema se puso en funcionamiento para ajustar la velocidad del motor y el porcentaje de histéresis, para estos últimos ajustes se tomó en cuenta que el sistema ningún tipo de oscilación.

Cuando se operó el sistema de seguimiento fue necesario una referencia para comprobar la posición de enfoque o determinar el grado de desenfoco, para ello se construyó el instrumento mostrado en la figura 5.6, que consta de un tubo de PVC, un tornillo, papel blanco y acrílico, el orden y ensamble del dispositivo se muestra en la figura 5.6a. En la figura 5.6b, se observa que dependiendo de la posición del sol el tornillo provoca una sombra en el papel blanco, la cual puede observarse por dentro del tubo.

Suponiendo que el sol sale de este a oeste con una altura solar de 90° y el tornillo del instrumento se encuentra normal con respecto a la horizontal, la sombra proyectada en la hoja tendría una secuencia de sombreados sobre una línea, es decir, en la mañana la sombra se da al lado contrario de donde sale el sol, conforme el sol se mueve a lo largo del día, la longitud de la sombra disminuirá proporcionalmente, al punto de desaparecer al medio día solar, después la sombra se proyectará al lado contrario de donde empezó, e irá creciendo conforme el sol siga avanzando.

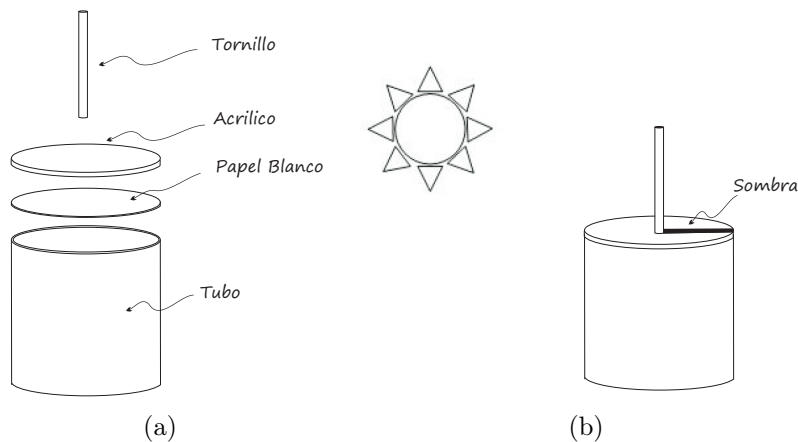


Figura 5.6: Instrumento para medir el grado de desenfoco.

Para cuantificar el grado de desenfoco, el cilindro parabólico se movió a la posición de enfoque, donde se capturó la imagen de la sombra por dentro del tubo, con la ayuda de un inclinómetro también se registro el ángulo correspondiente, el CCP se movió hasta desenfocarlo 1 grado y nuevamente se obtuvo la imagen y el ángulo, con esta información se determino la equivalencia de desplazamiento angular del cilindro parabólico, según la sombra proyectada en el instrumento de medición de desenfoco.

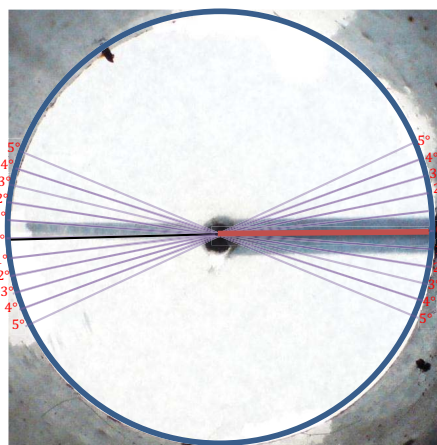
5.2.2. Resultados experimentales

Después de la instalación y los ajustes necesarios del circuito electrónico, se probó el funcionamiento del controlador de seguimiento solar conectado al sistema de captación solar en cuestión. Las pruebas para determinar el porcentaje de error, consistió en operar el sistema de forma continua durante tres días y capturar imágenes del instrumento para medición de enfoque en distintas horas.

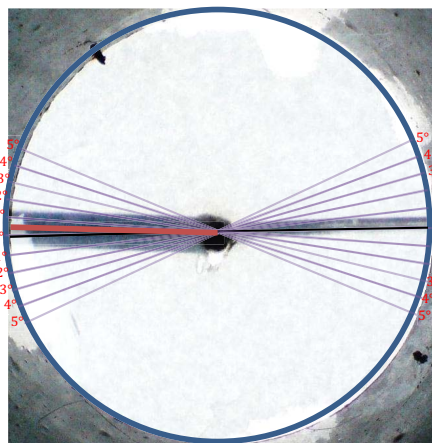
Las imágenes capturadas y procesadas, para determinar el porcentaje de desenfoque, pueden observarse en las Figuras 5.7, 5.8 y 5.9. La línea negra es el punto de referencia de 0% de error, y la línea roja es la posición del cilindro parabólico.

En las Figuras 5.10, 5.11 y 5.12, se graficó el error de enfoque de las pruebas correspondientes a las Figuras 5.7, 5.8 y 5.9. De acuerdo a los resultados obtenidos se puede decir, que el controlador permite un seguimiento solar en un eje norte-sur, con un error máximo de 12.21 miliradianes, lo cual se debe al efecto de la histéresis del algoritmo de control. El error de desenfoque se intentó corregir con la reducción de la velocidad del motor, para disminuir la ventana de histéresis sin que el sistema oscile, lo que resultó limitado por la arquitectura del motor, debido a que el motor no posee una velocidad constante en el recorrido de trabajo, es decir, el punto de equilibrio del sistema de captación, es cuando el área de apertura se encuentra paralela a la horizontal de la superficie terrestre, si tomamos como referencia esta posición, la cual es 0° . Si el cilindro se gira al lado derecho hasta los 45° , en ese instante la fuerza de gravedad tendería a mover al cilindro parabólico al equilibrio y regresar a los 0° , pero si la transmisión es lo suficientemente fuerte, el cilindro permanece en dicha posición. Si el sistema de captación se mueve hacia los 90° , el motor requiere el torque necesario para mover el colector, a diferencia de que si se gira al punto de origen, el peso del CCP beneficiaría al motor, por lo que su velocidad es mayor que en el caso de moverlo a los 90° , en general el motor no cuenta con una velocidad fija durante el movimiento de operación, debido a la experiencia con la que se cuenta en este tipo de sistemas, se propone cambiar el motor existente por uno con más torque y que contenga una transmisión del tipo tornillo sin fin y corona, la cual disminuye el efecto explicado, por lo que se tendría un control más efectivo con la velocidad del cilindro, con ello disminuir la histéresis y su porcentaje máximo de error.

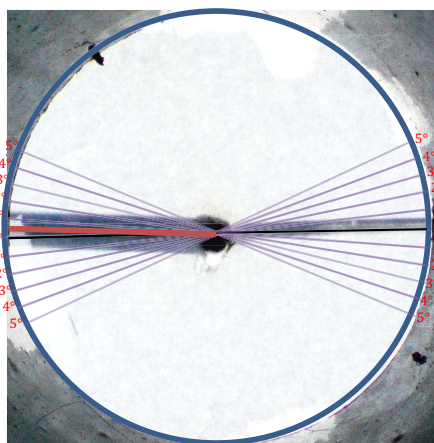
En general, el circuito de control mostró solides al trabajar de manera continua, tanto en el control de seguimiento solar como en la durabilidad del circuito electrónico. El sistema de seguimiento mostró las mismas aptitudes con radiaciones altas, bajas y nublados, por lo que la estrategia del cálculo de la histéresis a partir de la radiación existente, corrige el error producido en sistemas convencionales basados en lógica booleana.



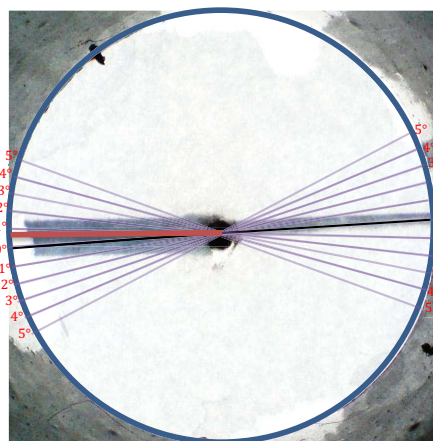
(a) 10:10



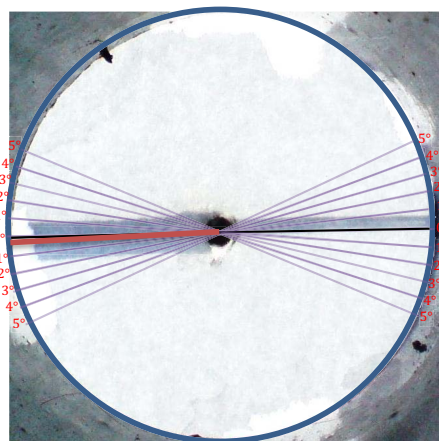
(b) 11:54



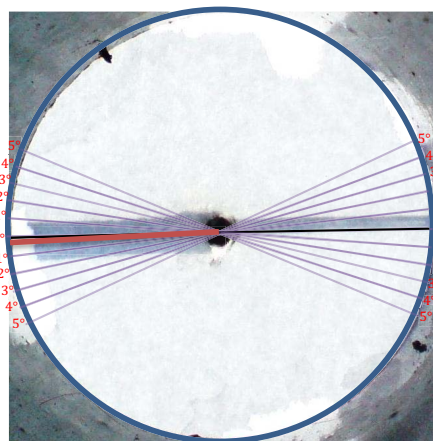
(c) 12:43



(d) 1:00.

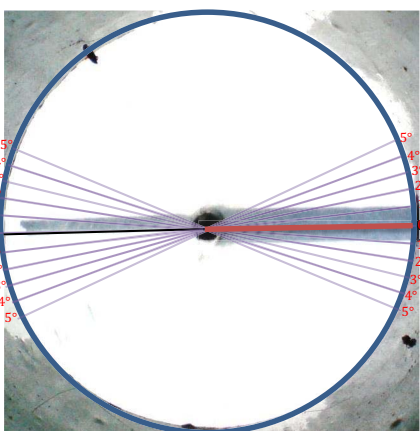


(e) 3:05

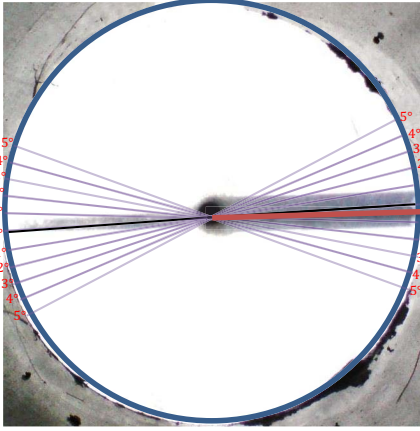


(f) 3:46

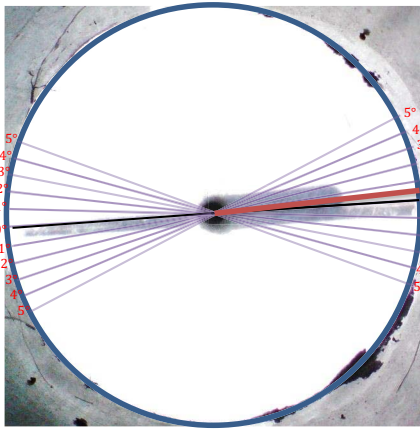
Figura 5.7: Dispositivo de medición solar, el día 10 de marzo del 2010.



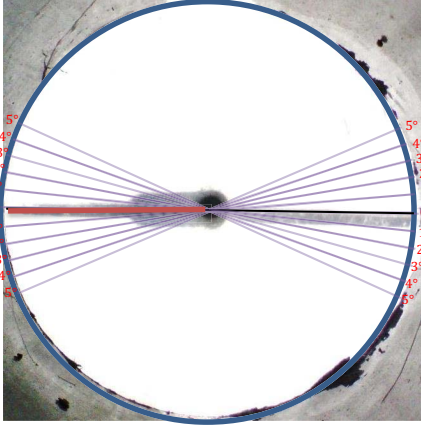
(a) 8:59



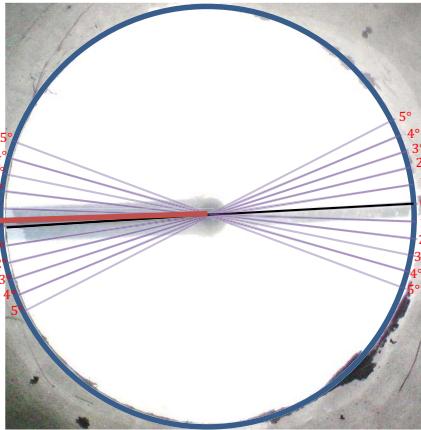
(b) 9:57



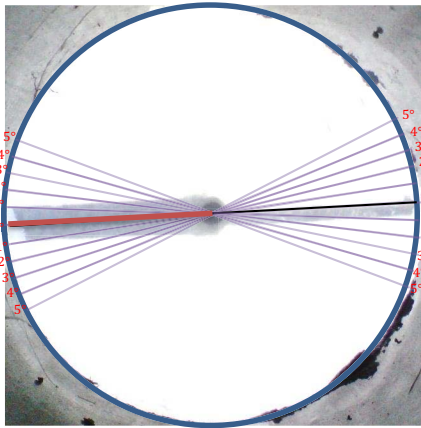
(c) 10:56



(d) 11:54.

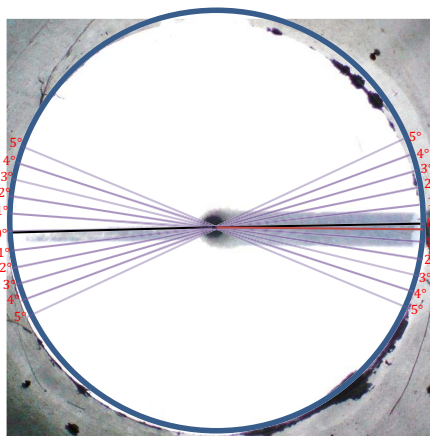


(e) 13:00

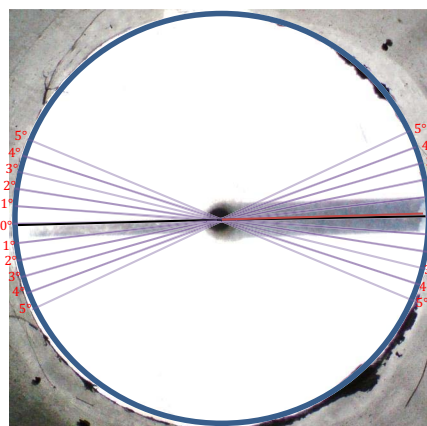


(f) 2:09

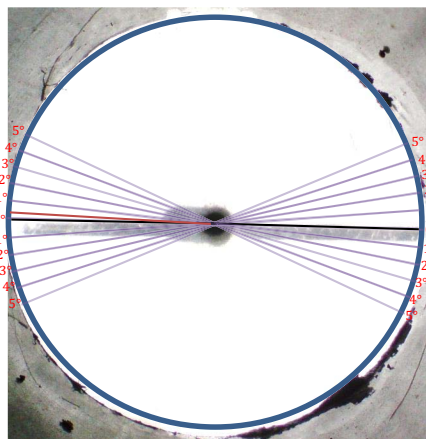
Figura 5.8: Dispositivo de medición solar, el día 11 de marzo del 2010.



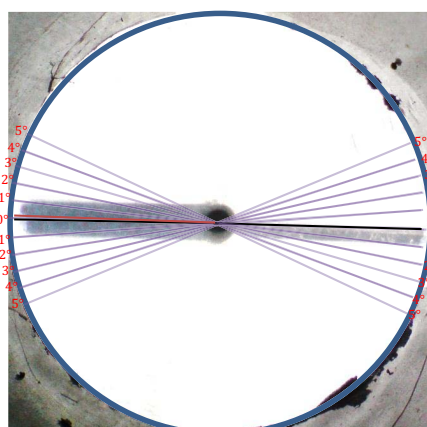
(a) 9:40



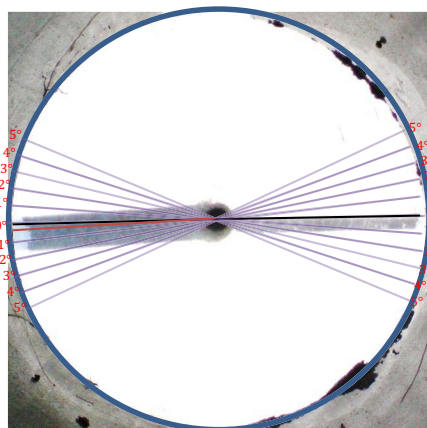
(b) 10:28



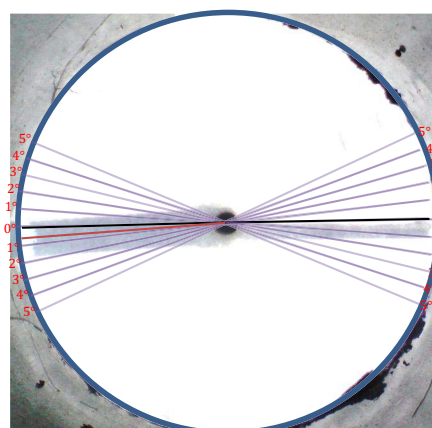
(c) 11:47



(d) 12:38.



(e) 13:05



(f) 3:08

Figura 5.9: Dispositivo de medición solar, el día 12 de marzo del 2010.

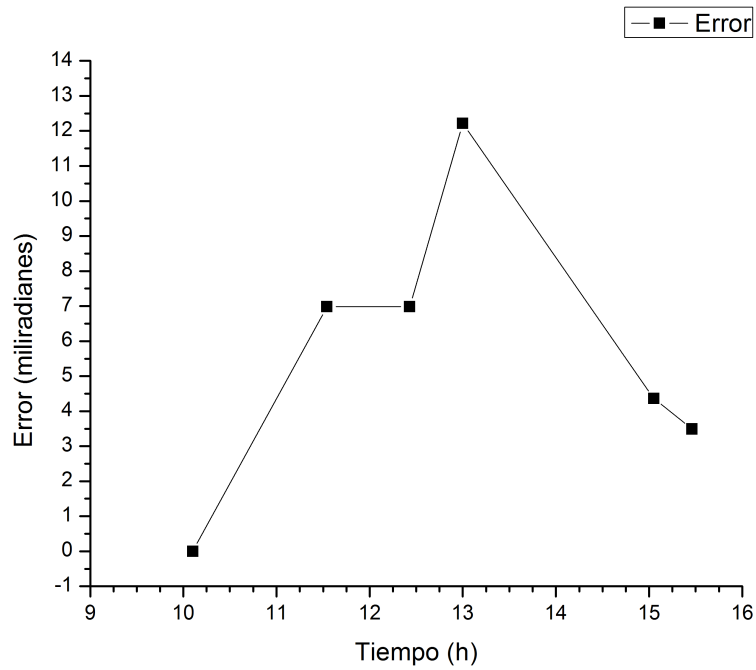


Figura 5.10: Desenfoque del sistema de seguimiento, el día 10 de Marzo del 2010.

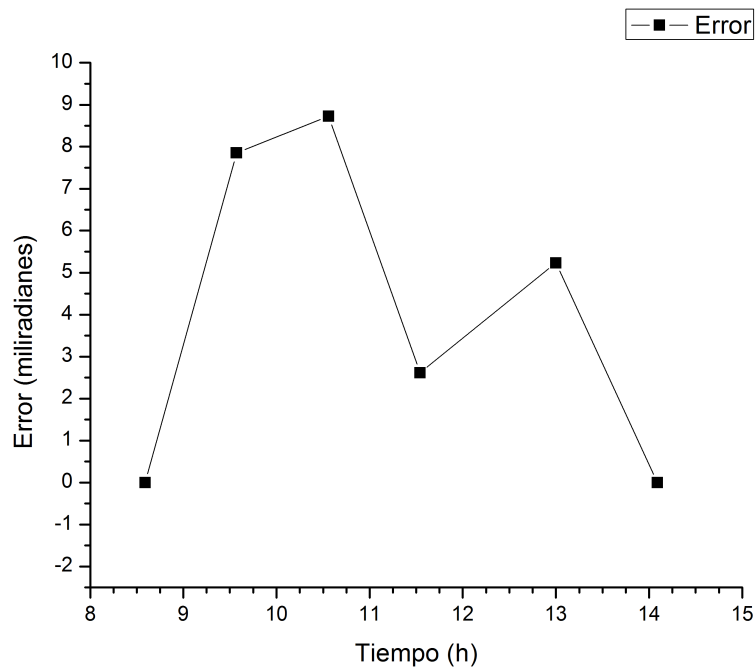


Figura 5.11: Desenfoque del sistema de seguimiento, el día 11 de Marzo del 2010.

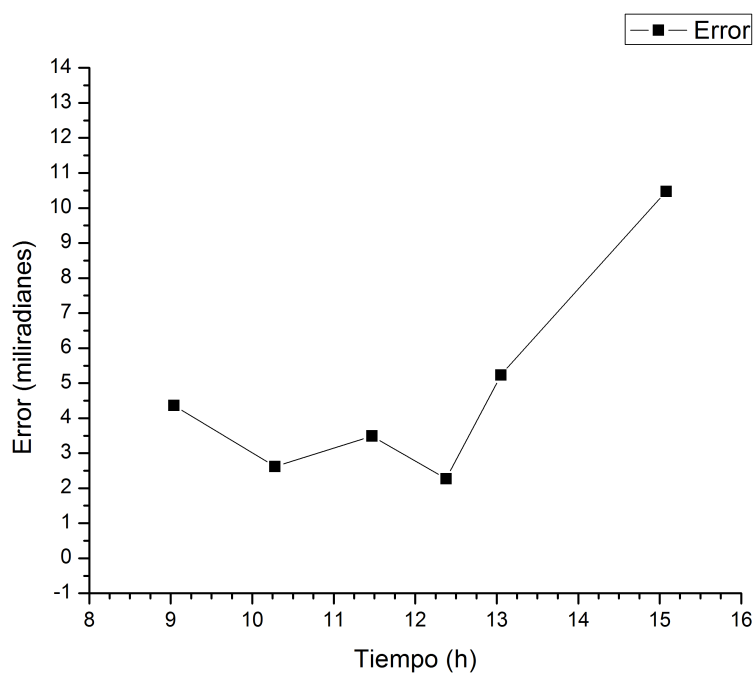


Figura 5.12: Desenfoque del sistema de seguimiento, el día 10 de Marzo del 2010.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- La simulación dinámica del sistema de climatización en el entorno de desarrollo TRNSYS v.16, demostró que el circuito hidráulico o configuración del sistema, permite operar la unidad de enfriamiento en tres diferentes formas: 1. Con energía solar, 2. Con el sistema de almacenamiento de frío y 3. Con biogas.
- La comparación de las diferentes estrategias de control Todo-Nada, If-Else, Retroalimentación Iterativa y el clásico Proporcional, Integral y Derivativo (PID), mediante la simulación dinámica del sistema de climatización en el entorno de desarrollo TRNSYS v.16, permitió demostrar que el controlador PID mostró el mejor desempeño en el control de la temperatura del espacio a climatizar, además de presentar el mejor manejo de la energía solar y tanque de almacenamiento, lo que se traduce en ahorro de energía.
- En la fase experimental el sistema de climatización fue operado con fuego directo, y se obtuvo las perturbaciones en la capacidad de la unidad de absorción, que se tendrían al variar la radiación solar si se utilizara el campo de colectores, debido a la operación intermitente ocasionada por el controlador de histéresis incluido en el equipo Robur.
- Los resultados de la experimentación indican que el algoritmo propuesto para la automatización y control, permitió una operación segura para el sistema de climatización y el usuario. El buen funcionamiento del algoritmo de control en la temperatura del aire de salida de la manejadora, asegura que el sistema de climatización y el controlador, pueden extrapolarse para el control de la temperatura de la vivienda.
- El diseño del circuito control para el seguimiento solar permite una fácil y simple construcción de bajo costo, comparando con sistemas convencionales que utilizan circuitos analógicos, computadoras, y/o PLC. Además el controlador del sistema

de seguimiento solar contiene funciones específicas requerida en el proyecto, como es la interconexión al controlador del sistema de aire acondicionado solar, para controlar el enfoque y desenfoque del sistema de seguimiento solar.

- Se creó un sistema de control para el seguimiento solar en un eje, por medio un sistema a lazo cerrado con sensores fotoeléctricos, que mediante la programación del microcontrolador, puede modificarse fácilmente para trabajar en dos ejes a lazo cerrado y uno y dos ejes a lazo abierto mediante ecuaciones astronómicas.
- El sistema de seguimiento mostró las mismas aptitudes con radiaciones altas, bajas y nublados, por lo que la estrategia del cálculo de la histéresis a partir de la radiación existente, corrige el error producido en sistemas convencionales basados en lógica booleana.

6.2. Recomendaciones y Trabajos futuros

- Utilizar motores con transmisión del tipo sin fin y corona en los sistemas de seguimiento.
- Estudiar nuevas geometrías en los sensores fotoeléctricos.
- En el trabajo actual se utilizó el equipo de absorción marca Robur, que es fabricado para trabajar a fuego directo, sin embargo el proyecto planteado por parte del CEENER, contempla un equipo de absorción avanzado operado con energía solar y biogas, por ello se recomienda el desarrollo de un controlador para que el equipo de enfriamiento por absorción avanzado, pueda trabajar por medio de energía solar y biogas.
- En el microcontrolador del CSAAS se implementó un controlador clásico PID para controlar la temperatura del espacio, de la misma manera sería conveniente implementar algoritmos de control avanzados.
- Una vez terminado el sistema de climatización solar, operar los sistemas de control interconectados.
- Reproducir el sistema de seguimiento solar, para implementarlos en el campo de colectores.
- Reprogramar el sistema de control a lazo cerrado para el seguimiento solar, e implementar un sistema de seguimiento a lazo abierto.
- Desarrollar un sensor de posición de uno y dos ejes, implementado un acelerómetro.
- Realizar una comparativa entre los sistemas de lazo cerrado y lazo abierto.

Bibliografía

- Abdallah, S. The effect of using sun tracking systems on the voltage–current characteristics and power generation of flat plate photovoltaics. *Energy Conversion and Management*, 45(11-12), pp. 1671–1679, 2004.
- Abdallah, S. y Badran, O. Sun tracking system for productivity enhancement of solar still. *Desalination*, 220(1-3), pp. 669–676, 2008.
- Abdallah, S. y Nijmeh, S. Two axes sun tracking system with plc control. *Energy conversion and management*, 45(11-12), pp. 1931–1939, 2004.
- Acevedo, S. *Instrumentación y control avanzado de procesos*. Diaz de Santos, 2006.
- Aiuchi, K., nakamura, M., Yoshida, K., Katayama, Y., y Nakamura, K. Sun tracking photo-sensor for solar thermal concentrating system. In *Proceedings of International Solar Energy Conference*, Portland, 2004.
- Akhmedyarov, K. Economic efficiency of the fv-500 solar photoelectric station with automatic tracking of the sun. *Solar energy.*, 22(4), pp. 44–47, 1986.
- Al-Mohamad, A. Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a sun-tracking system. *Applied Energy*, 79(3), pp. 345–354, 2004.
- Alata, M., Al-Nimr, M., y Qaroush, Y. Developing a multipurpose sun tracking system using fuzzy control. *Energy conversion and management*, 46(7-8), pp. 1229–1245, 2005.
- Arasu, A. y Sornakumar, T. Design, development and performance studies of embedded electronic controlled one axis solar tracking system. *Asian Journal of Control*, 9(2), pp. 163, 2007.
- Arbab, H., Jazi, B., y Rezagholizadeh, M. A computer tracking system of solar dish with two-axis degree freedoms based on picture processing of bar shadow. *Renewable Energy*, 34(4), pp. 1114–1118, 2009.
- Åström, K. J. y Hägglund, T. *Control PID Avanzado*. Madrid: Pearson Educación, 2009.

- Benford, F. y Bock, J. A time analysis of sunshine. *Trans. of American Illumination Engineering Society*, 34, pp. 200, 1939.
- Berenguel, M., Rubio, F., Valverde, A., Lara, P., Arahál, M., Camacho, E., y López, M. An artificial vision-based control system for automatic heliostat positioning offset correction in a central receiver solar power plant. *Solar Energy*, 76(5), pp. 563–575, 2004.
- Blanco-Muriel, M., Alarcón-Padilla, D., López-Moratalla, T., y Lara-Coira, M. Computing the solar vector. *Solar Energy*, 70(5), pp. 431–441, 2001.
- Bolton, B. *Mediciones Y Pruebas Eléctricas y Electrónicas*, volume 1. Alfaomega, 1996.
- Bolton, B. *Mecatrónica*. Marcombo, 2001.
- Brown, D. y Stone, K. High accuracy/low cost tracking system for solar concentrators using a neural network. *SAE, Warrendale, PA(USA)*., 2, pp. 577–584, 1993.
- Castro, U., Velázquez, N., Mora, M., Hernández, I., y Cantú, J. Development of a cheap and simple sensor-based polar tracking system. *Proceedings of ES2007 Energy Sustainability*, pp. 27–30, 2007.
- Chen, F. y Feng, J. Analogue sun sensor based on the optical nonlinear compensation measuring principle. *Measurement Science and Technology*, 18, pp. 2111–2115, 2007.
- Chen, F., Feng, J., y Hong, Z. Digital sun sensor based on the optical vernier measuring principle. *Measurement Science and Technology*, 17, pp. 2494–2498, 2006.
- Chiang, C., Lee, C., Hwang, W., y Chou, P. Solar orientation measurement systems with integrated solar cells. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 2(1), pp. 280–286, 2008.
- Chong, K. y Wong, C. General formula for on-axis sun-tracking system and its application in improving tracking accuracy of solar collector. *Solar Energy*, 83(3), pp. 298–305, 2009.
- Chong, K., Wong, C., Siaw, F., Yew, T., Ng, S., Liang, M., Lim, Y., y Lau, S. Integration of an on-axis general sun-tracking formula in the algorithm of an open-loop sun-tracking system. *Sensors*, 9(10), pp. 7849, 2009.
- Cooper, P. The absorption of radiation in solar stills. *Solar Energy*, 12(3), pp. 333–346, 1969.
- Corchero, M., Ortega, M., y Rubio, F. Aplicación de control robusto en una planta solar. *XXV Jornada de Automatica*, 2004.
- David, J. P., Floret, F., Guerin, J., Paiva, J. C., y Aiache, L. Autonomous photovoltaic converter with linear focusing concentrator. *Solar Cells*, 4, pp. 61–70, 1981.

- Delgado, J. A., Alcahud, F., Bordons, C., y Rubio, F. R. Control integral de una planta de climatización solar. *XXI Jornada de Automática*, 2000.
- Duffie, J. A. y Beckman, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*, volume third Edition. John Wiley & Sons, 2006.
- Falbel, G., Puig-Suari, J., Peczalski, A., Inc, O., y Stamford, C. Sun oriented and powered, 3 axis and spin stabilized cubesats. In *IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2002*, volume 1, 2002.
- Fernández, F., Pilatowsky, I., y Ruíz, V. Programa de ensayos de una planta de enfriamiento solar para el acondicionamiento de aire. *Red Iberoamericana de Refrigeración y Aire Acondicionado Solar*, 2006.
- García, C. X. Instalaciones de refrigeración solar por absorción: análisis y simulación dinámica. *Congreso Mediterraneo de Climatización*, 2005.
- Gerwin, H. Control system for heliostats and method. US Patent 4,519,382, 1985.
- Gonzalez, C. Temperature control of solar air conditioning systems. Master's thesis, University of Puerto Rico, Mayaguez, 2004.
- Grena, R. An algorithm for the computation of the solar position. *Solar Energy*, 82(5), pp. 462–470, 2008.
- Helfrick, A. y Cooper, W. Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición, 1991.
- Hoyos, D., Bárcena, H., Echazú, R., Cadena, C., y Farfán, R. Control inteligente de seguidor solar utilizando la técnica de lógica difusa o borrosa. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9, pp. 08.97–08.102, 2005.
- ISO:7730. Ergonomics of thermal environment-analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the pmv and ppd indices and local thermal comfort criteria, 2005.
- Kalogirou, S. Design and construction of a one-axis sun-tracking system. *Solar energy*, 57(6), pp. 465–469, 1996.
- Karimov, K., Saqib, M., Akhter, P., Ahmed, M., Chattha, J., y Yousafzai, S. A simple photo-voltaic tracking system. *Solar energy materials and solar cells*, 87(1-4), pp. 49–59, 2005.
- Khalifa, A. y Al-Mutawalli, S. Effect of two-axis sun tracking on the performance of compound parabolic concentrators. *Energy Conversion and Management*, 39(10), pp. 1073–1080, 1998.

- Khlaichom, P. y Sonthipermpon, K. Optimization of solar tracking system based on genetic algorithms. In *E-NETT 3rd Conference of the Energy Network of Thailand*, 2007.
- Lagunas, M. J., Ramos, B. C., Pérez, G. M., y Ramírez, B. R. Diseño preliminar de un control electrónico para el seguimiento de un plato parabólico. *XXVII Semana Nacional de la Energía Solar*, pp. 277–282, 2003.
- Lagunas, M. J., Ramos, B. C., Gerardo, P. M., y R., R. B. Control electrónico para el sistema de seguimiento de un canal parabólico. *XXVII Semana Nacional de la Energía Solar*, pp. 283–288, 2003.
- Lee, C., Chou, P., Chiang, C., y Lin, C. Sun tracking systems: A review. *Sensors*, 9, 2009.
- Lygouras, J., Botsaris, P., Vourvoulakis, J., y Kodogiannis, V. Fuzzy logic controller implementation for a solar air-conditioning system. *Applied Energy*, 84(12), pp. 1305–1318, 2007.
- Lygouras, J., Kodogiannis, V., Pachidis, T., Tarchanidis, K., y Koukourlis, C. Variable structure tito fuzzy-logic controller implementation for a solar air-conditioning system. *Applied Energy*, 85(4), pp. 190–203, 2008.
- Maish, A. Performance of a self-aligning solar array tracking controller. In *Photovoltaic Specialists Conference, 1990., Conference Record of the Twenty First IEEE*, pp. 864–869, 1990.
- McFee, R. Power collection reduction by mirror surface nonflatness and tracking error for a central receiver solar power system. *Applied Optics*, 14(7), pp. 1493–1502, 1975.
- Mendiburu, D. H. Instrumentación virtual industrial, 1997.
- Neale, S. Sun-tracking control system for solar collector. US Patent 4,146,785, 1979.
- Newton, G. C., Gould, L. A., y Kaiser, J. Analytical design of feedback controls. *John Wiley & Sons*,. New York, NY., 1957.
- Núñez, A., Normey, J., Bordons, C., y Camacho, E. A smith predictive based mpc in a solar air conditioning plant. *Journal of Process control*, 15(1), pp. 1–10, 2005.
- Nuwayhid, R., Mrad, F., y Abu-Said, R. The realization of a simple solar tracking concentrator for university research applications. *Renewable energy*, 24(2), pp. 207–222, 2001.
- Nyquist, H. Regeneration theory. *Bell System Technical Journal*, 11(1), pp. 126–147, 1932.
- Ogata, K. *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación, 2003.

- Pérez, D. *Instrumentación Electrónica Moderna y Tecnicas de Medicion*. Primera Edicion en Espaõl, 1991.
- Peuser, F. A., Remmers, K., y Schnauss, M. *Sistemas Solares Termicos* (Primera,2005 ed.). Number 1. Censolar, 2004.
- Pita, E. *Acondicionamiento de aire*, 2002.
- Reda, I. y Andreas, A. Solar position algorithm for solar radiation applications. *Solar Energy*, 76(5), pp. 577–589, 2004.
- Rohrs, C. E., Melsa, J. L., y Schiltznm, D. G. *Sistemas de control lineal*, volume I. McGraw-Hill, 1994.
- Roth, P., Georgiev, A., y Boudinov, H. Design and construction of a system for sun-tracking. *Renewable energy*, 29(3), pp. 393–402, 2004.
- Rubio, F., Camacho, E., y Berenguel, M. Control de campos de colectores solares. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 3(4), pp. 26–45, 2006.
- Rubio, F., Ortega, M., Gordillo, F., y López, M. Application of new control strategy for sun tracking. *Energy Conversion and Management*, 48(7), pp. 2174–2184, 2007.
- Sánchez, A. *Tecnología Fotovoltaica Aplicada al Bombeo de Agua*. Anes, 2007.
- Spencer, J. Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, 2(5), pp. 172, 1971.
- Stone, K. Automatic heliostat track alignment method. US Patent 4,564,275, 1986.
- Sukhatme, S. *Solar energy: principles of thermal collection and storage*. Tata McGraw-Hill, 1996.
- Sungur, C. Multi-axes sun-tracking system with plc control for photovoltaic panels in turkey. *Renewable Energy*, 34(4), pp. 1119–1125, 2009.
- Tiwari, G. *Solar energy: fundamentals, design, modelling and applications*. Narosa, 2002.
- Velázquez, N. y Best, R. Estudio de sistemas de absorción avanzados para operar con gas natural y asistidos por energía solar. *Red Iberoamericana de Refrigeracion y Aire Acondicionado Solar*, 2002.
- Yousef, H. Design and implementation of a fuzzy logic computer-controlled suntracking system. 3, 1999.

Zambrano, D. y Camacho, E. F. Optimización multiobjetivo aplicada al control de temperatura en una planta de refrigeración solar. *XXII Jornada de Automatica*, 2001.

Zetsche, M., Koller, T., y Miller, H. Solar cooling with an ammonia/water absorption chiller. In *EUROSUN 2008*, 2008.

Apéndice A

Circuitos impresos del controlador del sistema de aire acondicionado solar.

Un circuito impreso es el medio físico donde se ensamblan componentes electrónicos para su interconexión eléctrica, regularmente estos se realizan haciendo grabados en una capa delgada de cobre sobre un material como vaquelita. El diseño de los circuitos impresos son robustos, baratos y de buena confiabilidad. La construcción por primera ocasión puede resultar un poco tardado y más caro que otras alternativas, pero en grandes volúmenes resultan más baratos, rápidos y consistentes.

En la construcción del circuito impreso del CSAAS descrito en el Capítulo 4, se utilizó el software de Eagle 4.15, el primer paso para crear el impreso, consistió en dibujar el diagrama esquemático mostrado en las Figuras A.1 y A.2, donde a partir de estos, el programa crea un tablero, donde se ilustran las figuras de los encapsulados de cada componente y la unión de ellos mediante nodos. Los componentes se acomodaron por áreas, como lo son fuentes de alimentación, etapas de acondicionamiento, etc, posteriormente los nodos son convertidos a rutas o pistas, cuidando que estas no se traslapen. Debido a la complejidad del circuito se realizó el tablero de doble capa mostrado en la Figura A.3.

Terminado el diseño del tablero, da como resultado la plantilla de cada capa mostradas en las Figuras A.4 y A.5¹. Estas plantillas fueron fotocopiadas en un papel especial de transferencia (en inglés, *press-n-peel*), con la ayuda de una impresora con tecnología láser. Una vez impreso el diseño en la hoja, se procedió con el traslado a la lamina de cobre, mediante transferencia térmica con una plancha de prensa (en inglés, *Press-n-Peel Heat Press*), como se muestra en la Figura A.6a, donde la impresión de toner queda incrustada en la lámina de cobre con un acabado de la Figura A.6b. Para un grabado permanente de las pistas en lámina, se sumergió en una mezcla de percloruro férrico y agua, durante algunos minutos, en este proceso el área de cobre descubierta de toner es consumida por el ácido, una vez terminado el proceso el toner es retirado de la superficie de cobre, con ayuda de agua, jabón y una fibra para limpiar.

¹Las plantillas son de dimensiones reales.

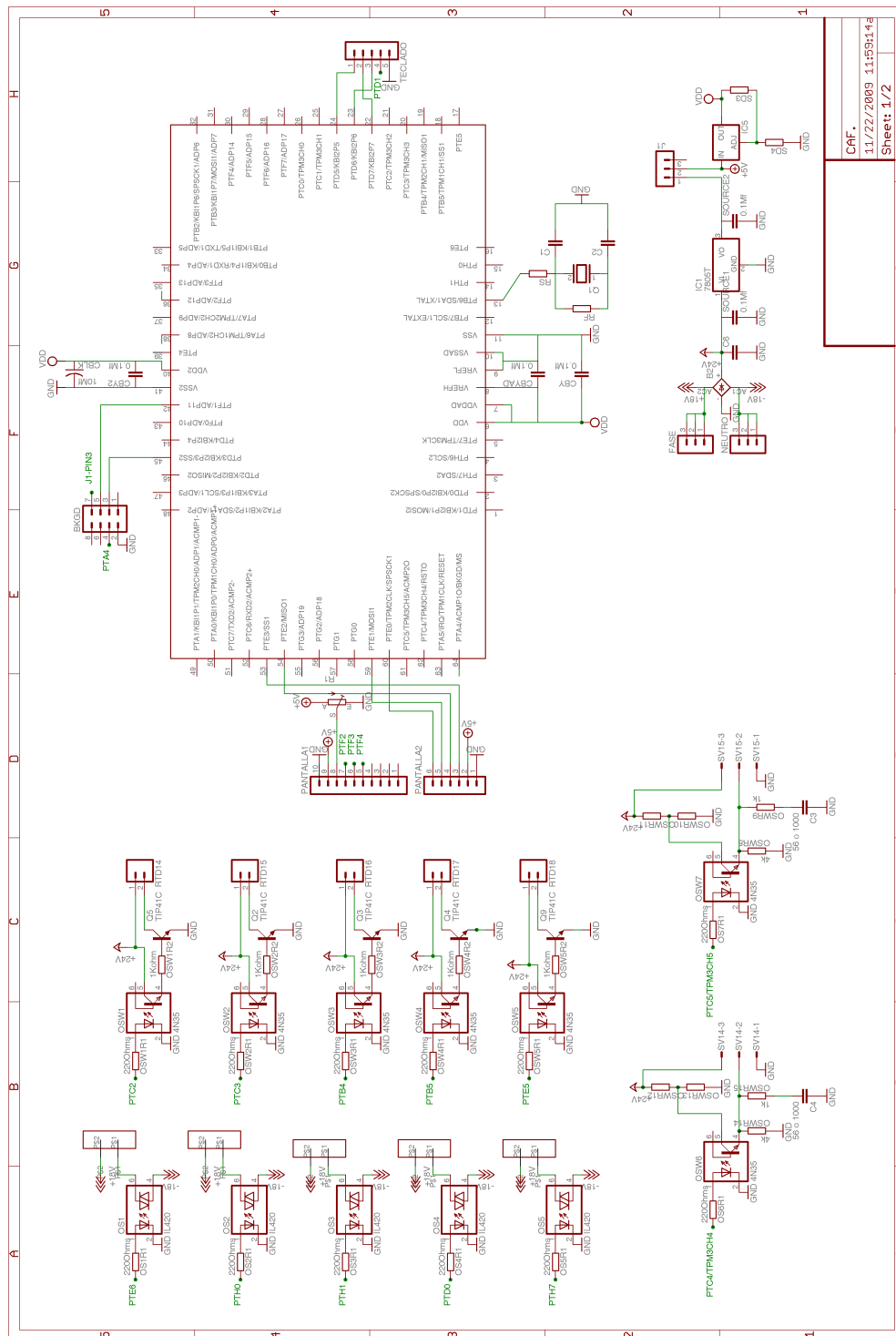


Figura A.1: Esquema del circuito de control del sistema de aire acondicionado hoja 1.

CAF.
11/22/2005 11:59:14
Sheet: 1/2

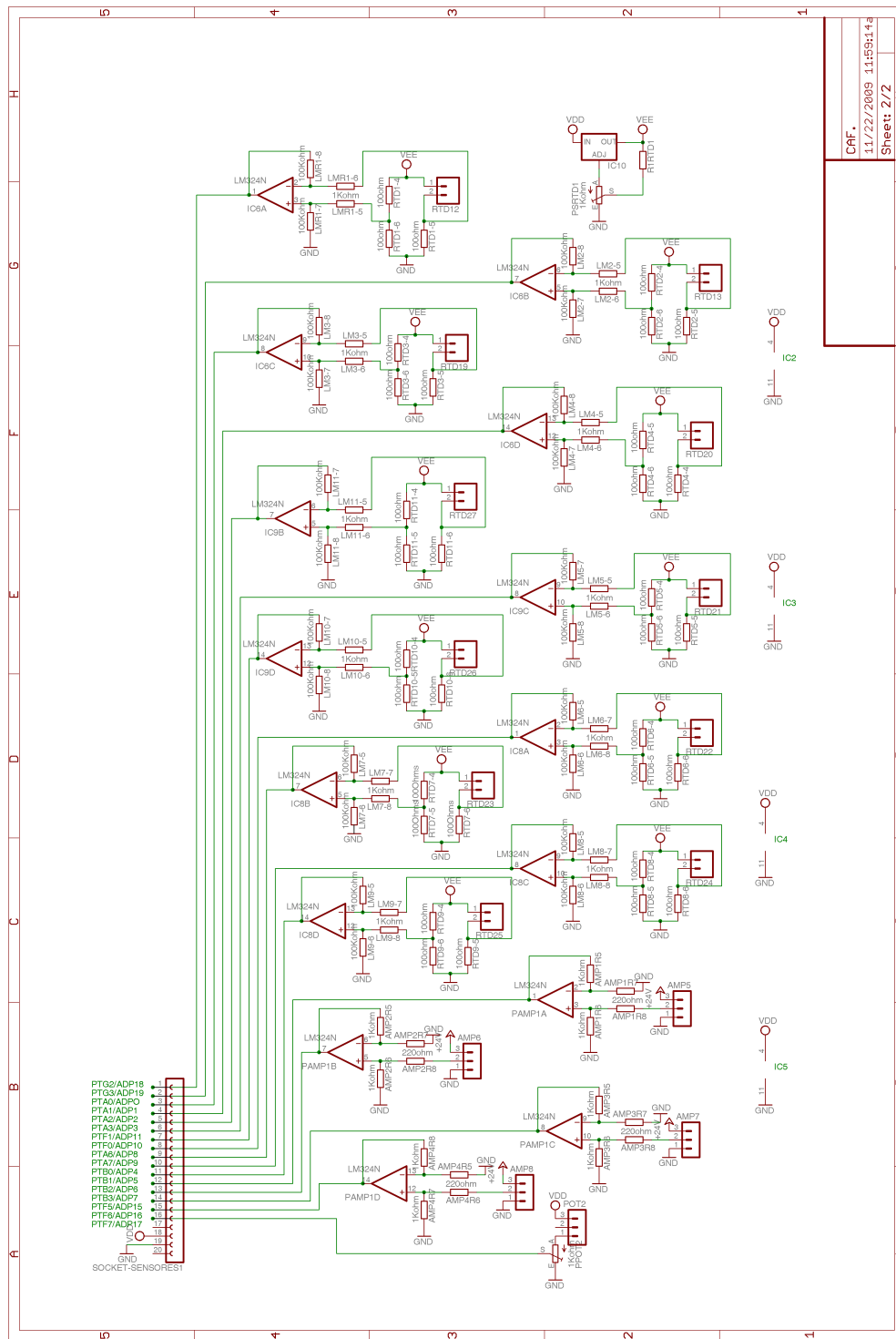


Figura A.2: Esquemático del circuito de control del sistema de aire acondicionado hoja 2.

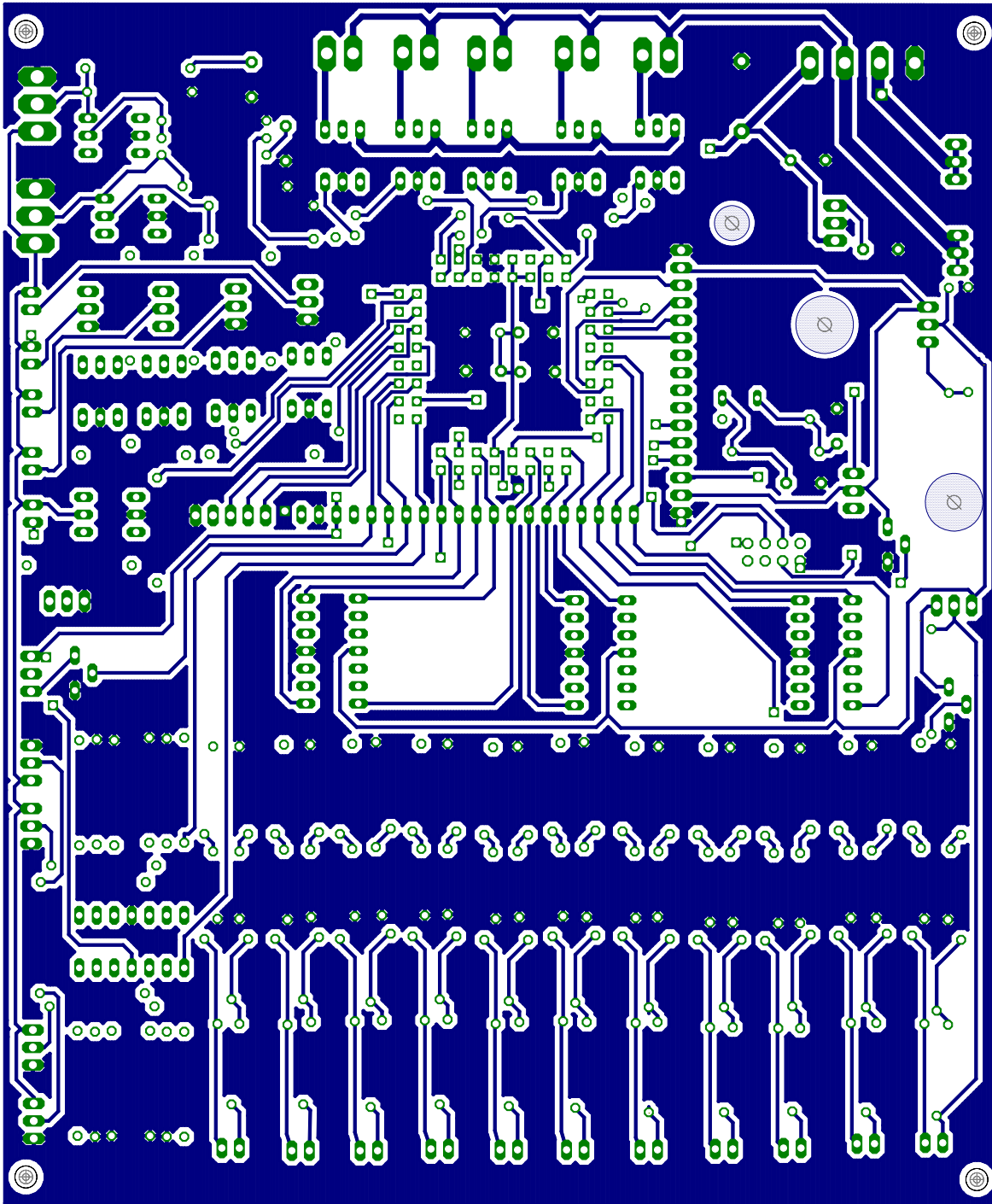


Figura A.4: Plantilla del controlador del sistema de aire acondicionado capa 1.

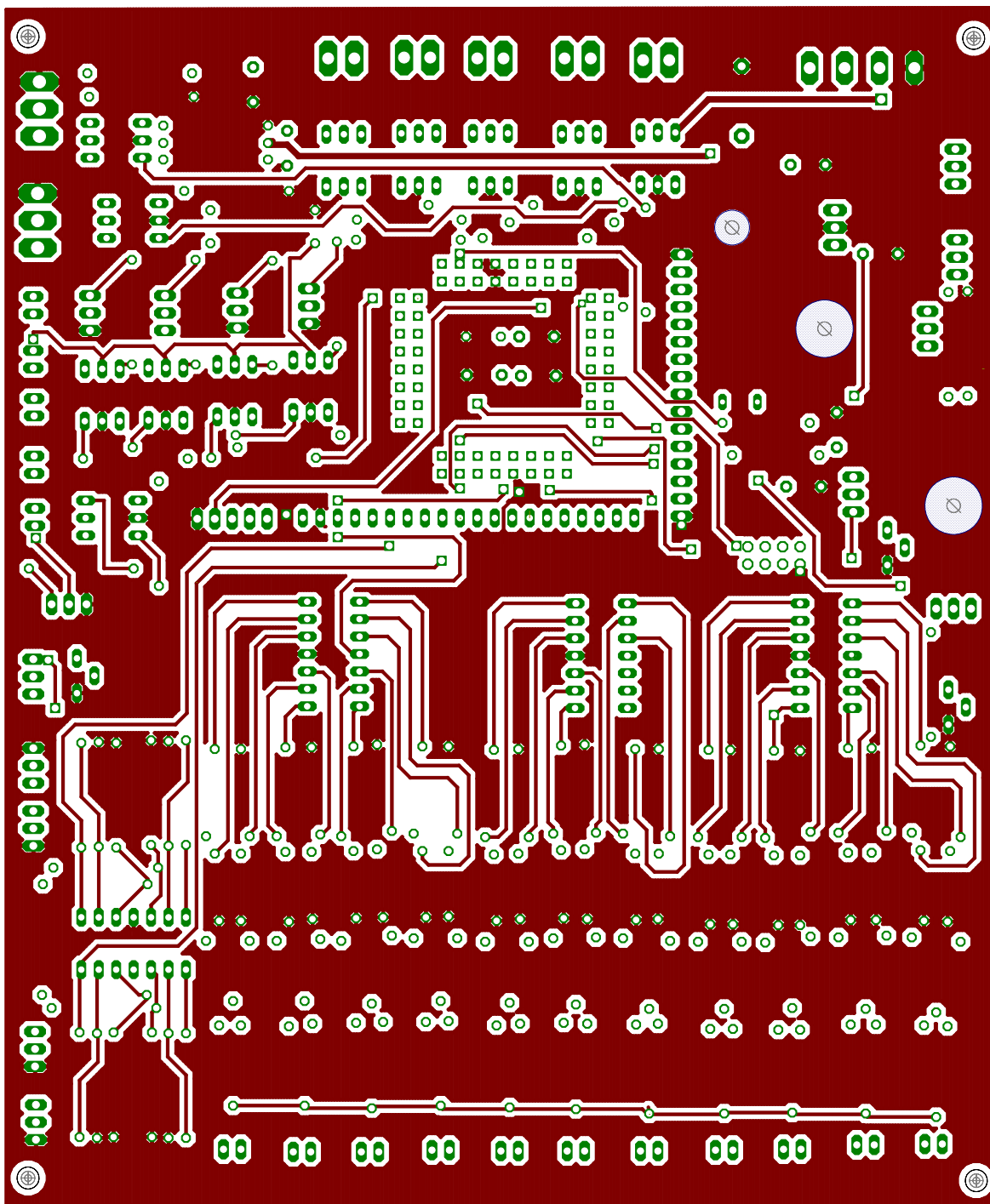


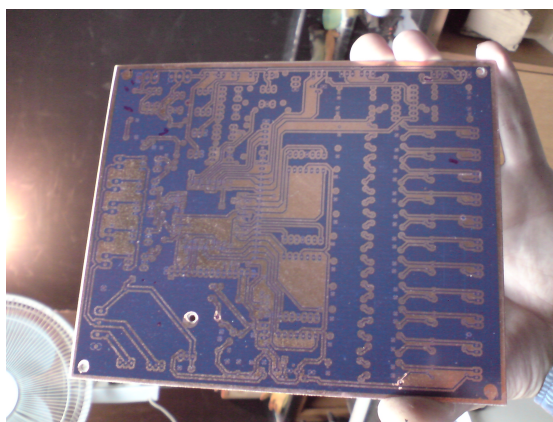
Figura A.5: Plantilla del controlador del sistema de aire acondicionado capa 2.

En la Figura A.6c se muestra el circuito impreso después del proceso químico, y listo para la fase de la perforación. El último paso es el ensamble de componentes, donde se recomienda utilizar soldadura con alma de resina y un cautín con temperatura regulable, para evitar sobrecalentar las pistas del circuito. En la Figura A.7 se muestra la secuencia de la incorporación de componentes, y una imagen final del CSAAS.

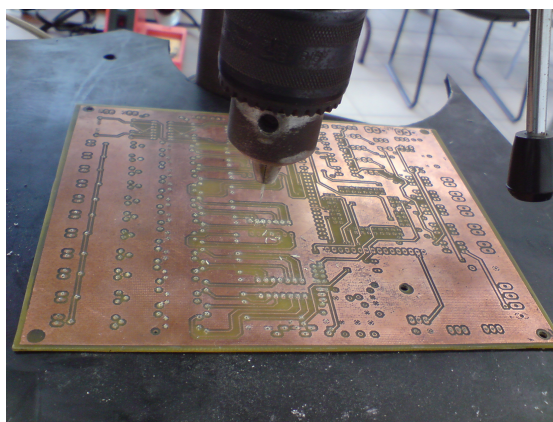
El precio final del impreso del controlador fue de aproximadamente 1297.36 pesos, los componentes pueden ilustrarse en la Tabla A.1.



(a) Proceso de planchado de la hoja de transferencia en la lámina de cobre.

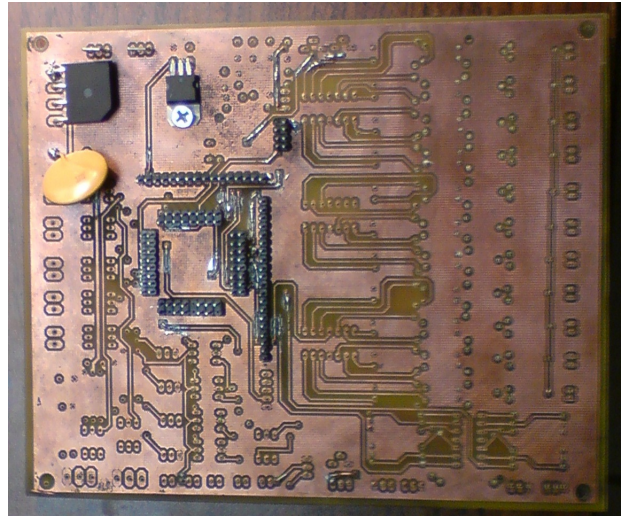


(b) Planchado de la hoja de transferencia en la lamina de cobre

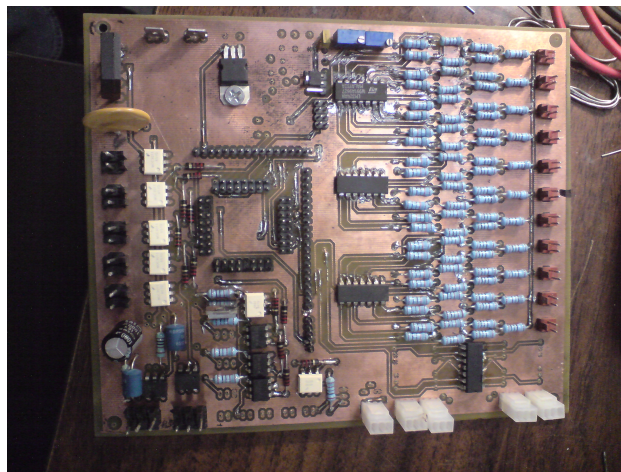


(c) Perforación de la tableta de circuito impreso.

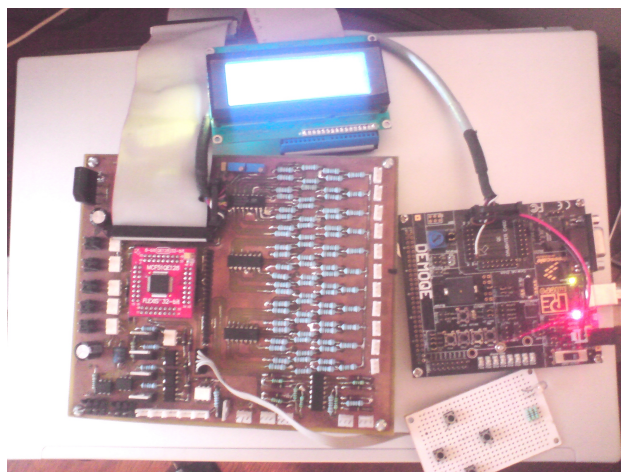
Figura A.6: Etapa de construcción del CSAAS.



(a)



(b)



(c)

Figura A.7: Ensamble de componentes y vista preliminar del circuito CSAAS.

Tabla A.1: Componentes electrónicos del CSAAS.

Nombre	Cantidad	Descripción	Precio (Pesos)
RTDx-x, O _s xRx,	1	Placa fenolica 20x20 doble cara	80
OSW _x Rx, LMR _x -x	33, 20, 37,22	Resistencias 100,220, 1k, 100k (Ohms)	112
OSW _x	7, 4	Optoacopladores 3n32, moc3011	130
R1, PSRTD	3	Potenciómetro de precisión 1kohm	114.57
(CBY, CBY2, CI2, Cx)	5, 1, 1, 1	Capacitores de 0.01,10, 1000 y 220	35.52
, CA2, C4, C6			
-	3	Tira de 36 terminales sencilla	27.42
-	3	Tira de 36 terminales doble	43.65
B2	1	Puente rectificador de 50 volts a 5 A.	10
IC1	1	Regulador de voltaje 5V/1A lm7805	7.28
IC5,IC10	1	Regulador de voltaje variable lm317	10.92
Qx	5	Transistores Tip41c	74
Teclado	2	Bus de datos IDE	40
AMPx, POT2	4	Conectores p/Abanico	15
RTDx	15	Conectores de alimentación	50
SVx	7	Conectores negros	21
Teclado	4	Botones	20
-	1	<i>DEMOQUE DAUGHTER CARD</i> MCF51QE128	140
-	1	Pantalla de cristal líquido de 16x2 compatible	200
-	2	Hoja de transferencia para circuitos	40
-	1	Tornillos con tuerca	10
-	1	Hoja de acrílico 43.1 × 27.9 cm	36
-	1	Transformador 12VCA, 1a	80
		Total	1297.36

Apéndice B

Circuitos impresos del sistema de seguimiento

La elaboración de los circuitos impresos para el sistema de control de seguimiento solar, fue el mismo que el utilizado en el CSAAS descrito en el Apéndice A. Los precios y componentes del sistema de seguimientos se muestran la Tabla B.1, B.3 y B.2, el precio total del circuito es de \$1287 pesos. Los diagramas esquemáticos del controlador se muestra en la Figura B.1 y B.2, las plantillas correspondientes en las Figuras B.3 y B.6, y sus descripciones incluyen en la Figura B.5 y B.6.

Tabla B.1: Componentes del circuito electrónico de control del sistema de seguimiento.

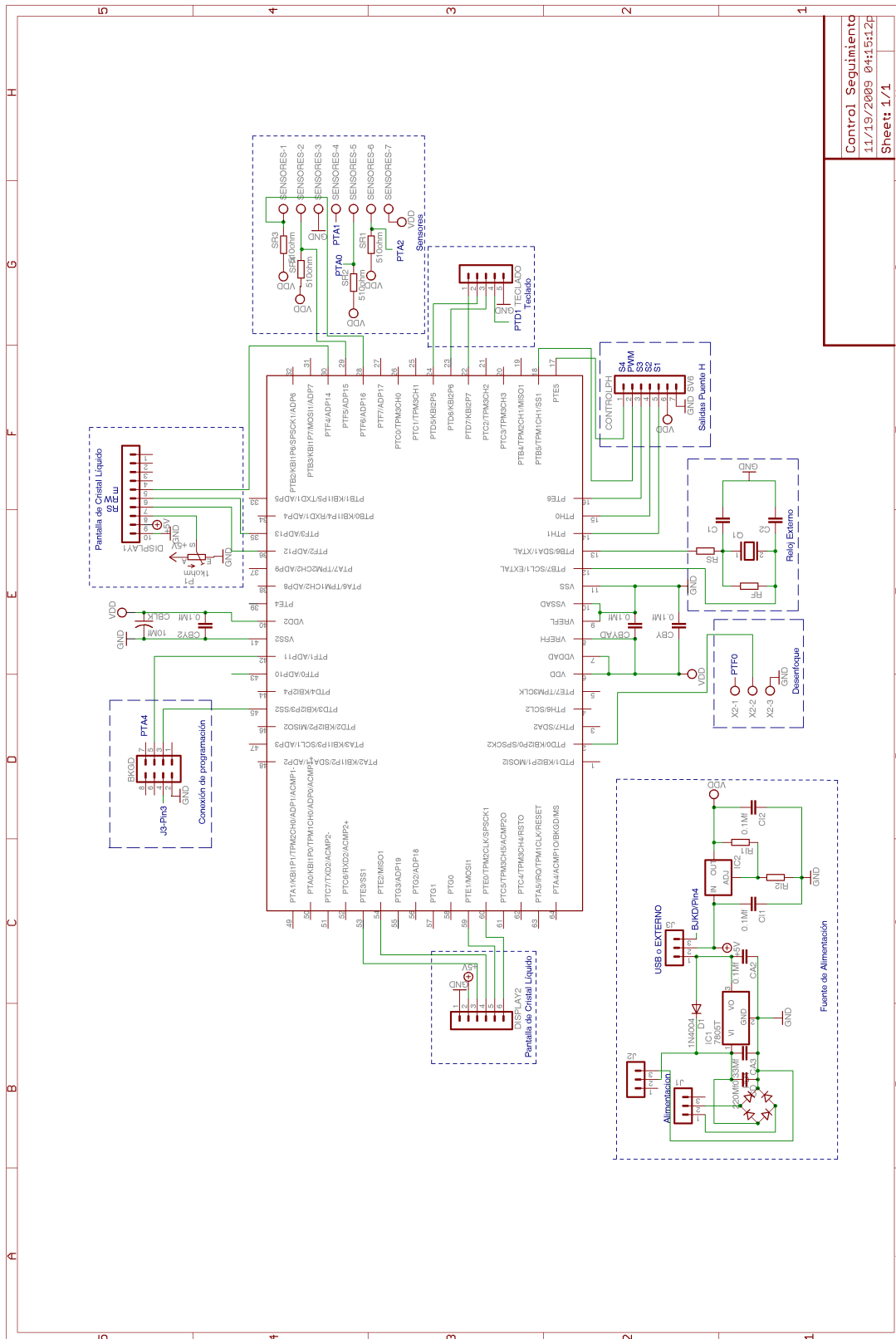
Nombre	Cantidad	Descripción	Precio (Pesos)
J1, J2	2	Conector de alimentación de 2 puntos	3
ControlPH, J3	1	Tira de 36 terminales sencilla	9.10
MCU, BKGD	1	Tira de 36 terminales dobles	14.55
Display	1	Base para C.I. 16 patas	2.73
Puente de diodos	1	Puente rectificador de 50 volts a 2 A.	7.28
7805T	1	Regulador de voltaje 5V/1A lm7805	7.28
IC2	1	Regulador de voltaje variable lm315	10.92
S1, S2	2	Photo-transistor 5mm	6.37
SR1, SR2	2	Resistencia de 510omh	2
P1	1	Potenciómetro de precisión 1kohm	38.19
CBY, CBY2, CI2 , CA2, CI1	5	Capacitor cerámico de 0.1 Mfaradios	13.65
CD	1	Capacitor electrolítico de 220Mf	5.46
CA1	1	Capacitor de .33Mf	5.46
Sensores	2	Con. ED1701-ND, ED1865-ND, ED1704 , ED1868-ND	76.96
Microcontrolador	1	DEMOQUE DAUGHTER CARD MCF51QE128	130
Placa de cobre	1	Placa de cobre de una cara 15x15 cm.	20.91
Pantalla	1	Pantalla de cristal liquido de 16x2 compatible hitachi	104
Teclado	4	Micro swich 2 posiciones	14.56
Sensor	-	Aluminio para realizar sensor	20
		Total	492.82

Tabla B.2: Componentes del circuito de potencia del sistema de seguimiento.

Nombre	Cantidad	Descripción	Precio (Pesos)
Entradas	1	Tira de 36 terminales sencilla	4.55
RD1,RD2	2	Resistencia de 220 ohms	2
RB1,RB3	2	Resistencia de 100 ohms 1w	2
RB2, RB4	2	Resistencia de 1.8 kohm 1w	2
OP1, OP2	2	Optoacoplador 4n32	23.64
IRF	2,2	Mosfet 4905,3905	120
Disipadores	4	Disipador para transistor P/TO-220	58.20
IC1	1	Circuito integrado 74LS08	7.28
IC2	1	Circuito integrado 74LS86	9.10
Socket	2	Base para C.I. de 16 patas	5.46
socket	2	Base para C.I. de 6 patas	3.64
Fuente salidas	1	Terminal con tornillos P/C. Impreso	6.37
	1	Con. ED1701-ND, ED1865-ND,	23.66
Placa de cobre	1	Placa de cobre de una cara 10x15 cm.	14.55
Total			282.45

Tabla B.3: Componentes adicionales del sistema de seguimiento.

Nombre	Cantidad	Descripción	Precio (Pesos)
	1	Caja de plástico de 15x10x6 cm	69.09
	1	Transformador de 127VCA a 24VCA volts 1.2	118.19
		Transformador 12VCA, 3a	160
	1	Abanico de 12 volts	50
	1	Tubo de soldadura de estaño	30
	1	Ácido de 220 ml	25
	1	Lija 1000	5
	1 m	Cable	10
	8	Tornillos chicos	5
	6	Remaches	10
	1	Clavija hembra	10
	1	Hoja de transferencia para circuitos	20
Total			512.28



Control Seguimiento
11/19/2009 04:15:12P
Sheet: 1 / 1

Figura B.1: Esquema del circuito electrónico de control.

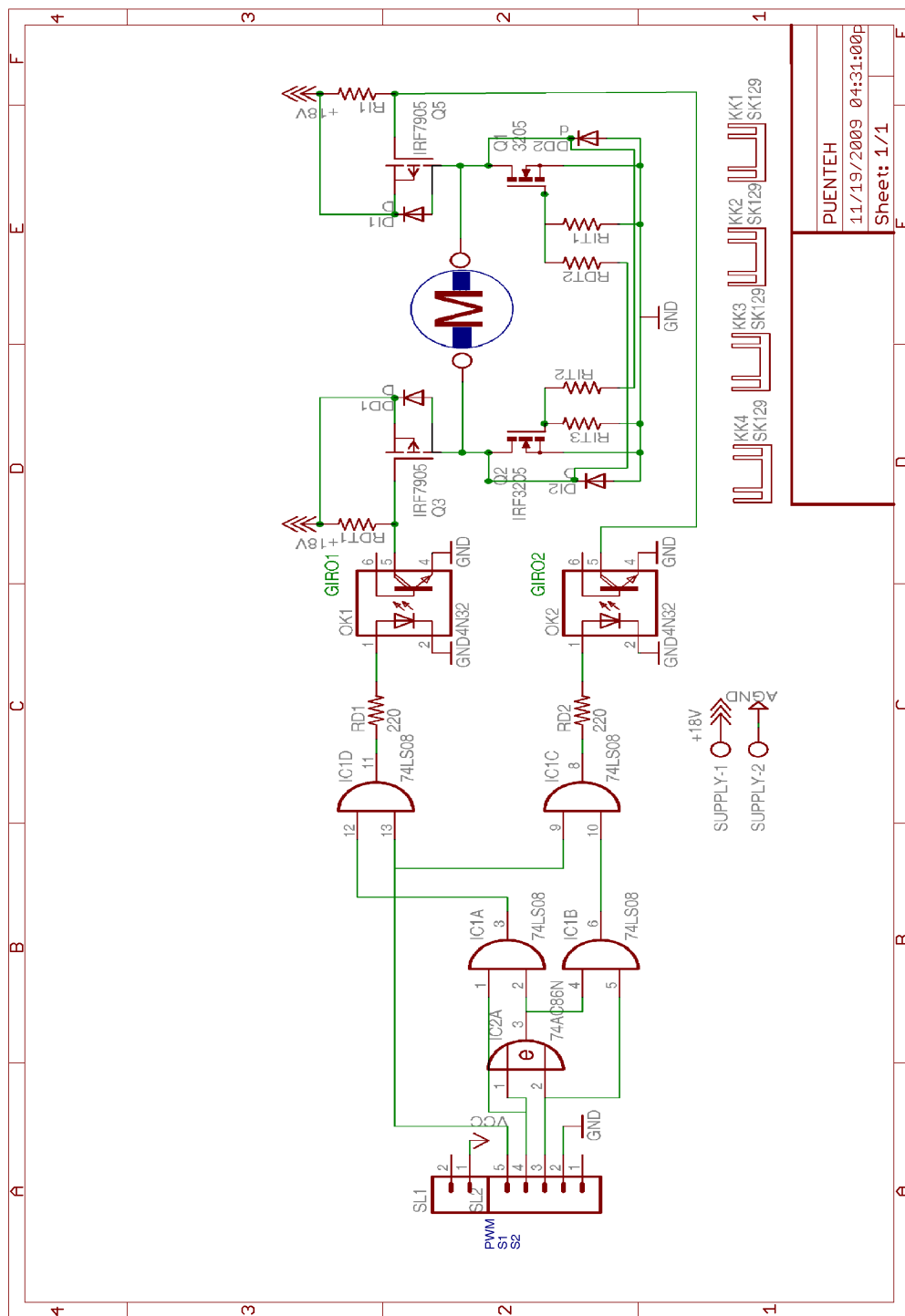


Figura B.2: Esquema del Puente H.

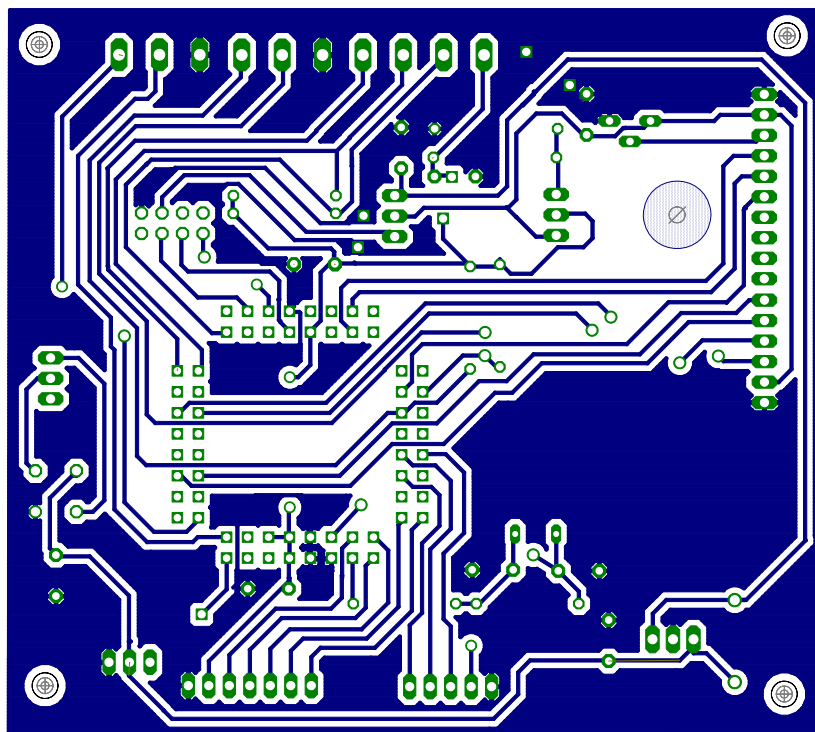


Figura B.3: Plantilla para circuito impreso del sistema de control.

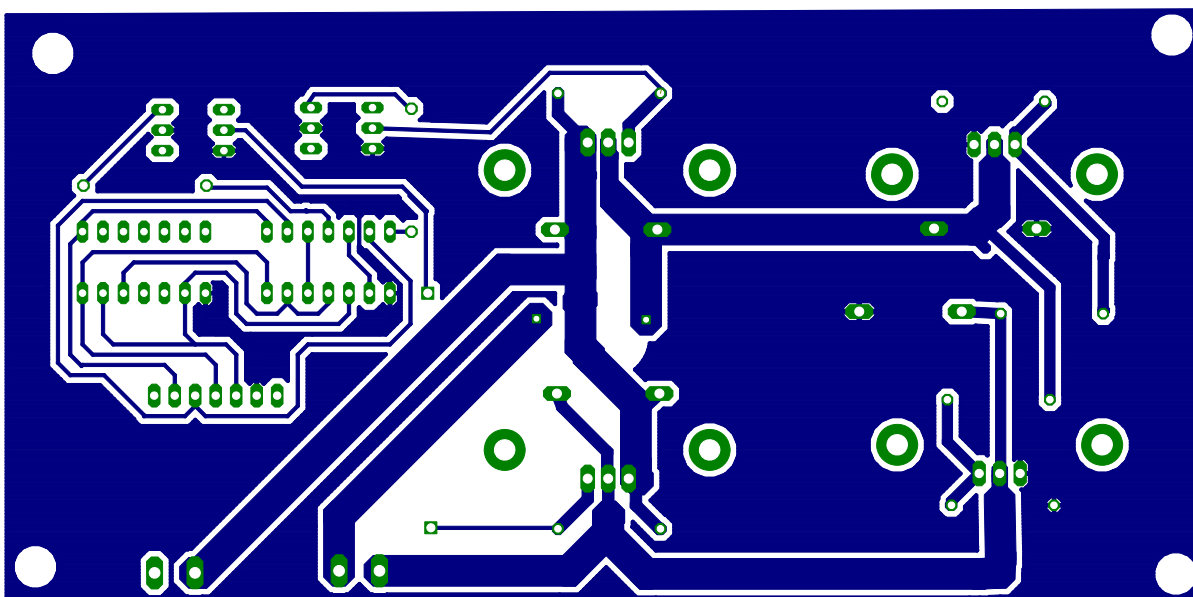


Figura B.4: Plantilla para circuito impreso del puente H.

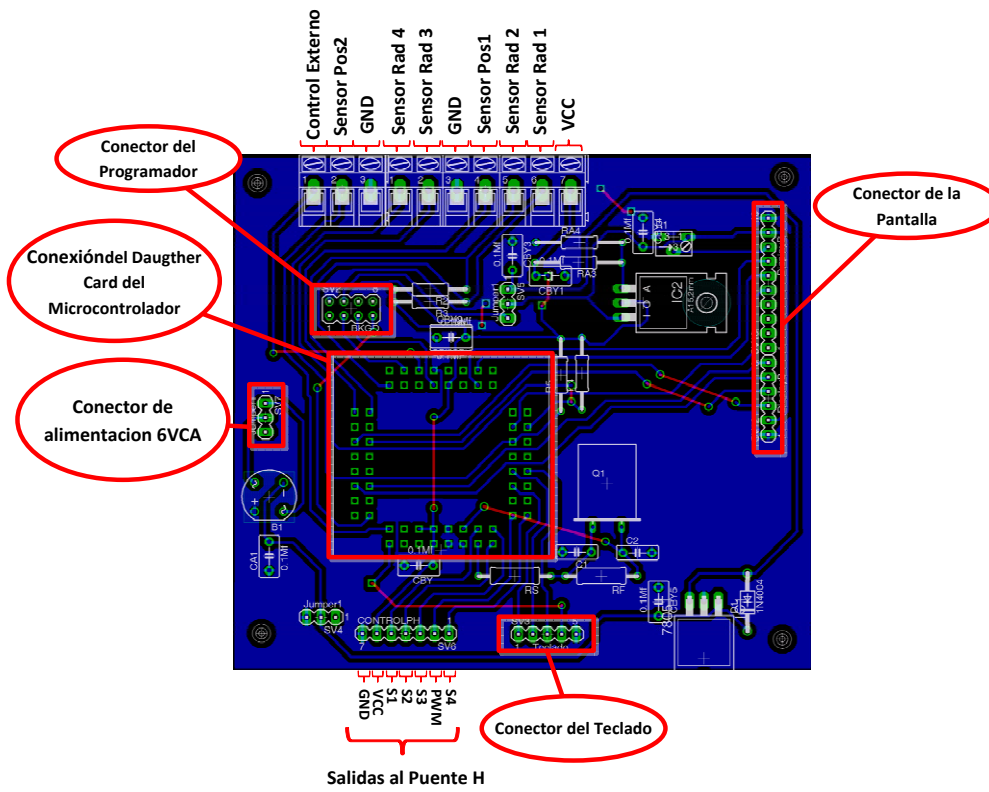


Figura B.5: Componentes del circuito de control de seguimiento solar.

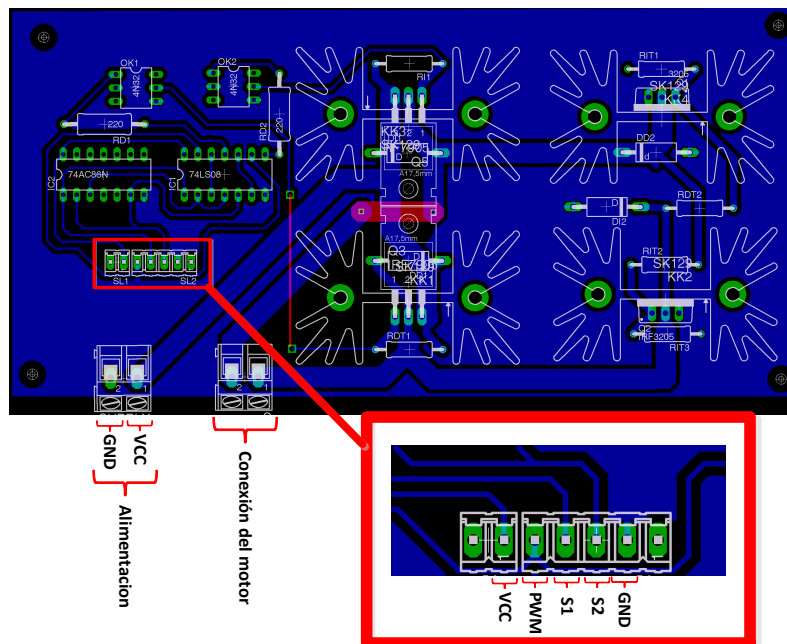


Figura B.6: Componentes del circuito del puente H.