

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

CENTRO DE ESTUDIOS DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES



MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

**Automatización y Control de un Sistema de Aire
Acondicionado Termosolar y Biomasa**

T E S I S

Que para obtener el grado de

Doctor en Ingeniería

Presenta:

Adolfo Heriberto Ruelas Puente

Dirección de tesis :

Dr. Nicolás Velázquez Limón

Dr. Carlos Villa Angulo

Mexicali, B.C. México

Junio del 2015

Dedicado

*A mi hijo Adolfo Maximiliano
por ser el Sol que ilumina mi
vida.*

Agradecimientos

A mi mujer Citlali Araceli Rodríguez Arreola y a mis padres María de Lourdes Puente Vásquez y Emelanio Ruelas Valenzuela, por apoyarme incondicionalmente hasta en los momentos más difíciles.

Al Dr. Nicolás Velázquez Limón por la dedicación, conocimiento y consejos que apoyaron mi formación, además de contagiarme de ese entusiasmo para dar más que el máximo esfuerzo, en cada cosa que hago.

Al Dr. Carlos Villa por brindarme esa experiencia y sabiduría que me ayudo a convertirme en mejor persona y profesionalista.

A mis sinodales y revisores de tesis Dr. Guillermo Galaviz Yáñez, Dr. Alexis Acuña Ramírez, Dr. Daniel Saucedo Carvajal y Dr. Rogelio Ramos Irigoyen, 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 Alexis Acuña, Fernando Lara, Pedro Rosales, Luis González, Mydory Nakasima, Gabriel Pando, Edgar Gonzales, Rodrigo Cota por la compañía y apoyo en la realización de este trabajo.

A todos y cada uno de los que de alguna forma contribuyeron en el desarrollo 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.

Automatización y Control de un Sistema de Aire Acondicionado Termosolar y Biomasa

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo teórico y experimental de la automatización y control de un sistema de aire acondicionado activado con energía solar y biogás, el objetivo es automatizar el servicio de acondicionamiento térmico de espacios de forma segura, continua y consumiendo el mínimo de energía. El estudio teórico de la unidad de aire acondicionado contempla un análisis de los requerimientos de automatización y control y una simulación en estado estable en Aspen Plus, en el cual se realizó un estudio paramétrico para detectar variables críticas y lazos de control, además se obtuvo información de las condiciones de operación de la unidad de absorción lo que permitió su integración en un entorno dinámico (TRNSYS), en el cual se probaron diferentes configuraciones y lazos de control para seleccionar una propuesta que cumpla con los requerimientos establecidos.

El diseño e implementación en hardware del Sistema de Automatización, Control, Monitoreo y Adquisición de Datos, esta basado en la programación de los algoritmos de automatización en un microcontrolador con un paradigma orientado a objetos, junto con las etapas de acondicionamiento de la instrumentación, elementos de potencia e interfaces. El diseño y construcción de la planta piloto consistió en realizar la ingeniería básica, selección y calibración de instrumentación y elementos finales de control, así como la caracterización de componentes y la puesta a punto de la planta piloto, finalizando con la instalación del adquirente de datos y prueba preliminar de arranque, estabilización y paro.

El estudio experimental consistió en operar el equipo para obtener la respuesta dinámica de la capacidad de enfriamiento, con el objetivo obtener su función de transferencia, y posteriormente realizar un análisis de sintonización teórico para las constantes del algoritmo de control.

Los resultados de la simulación mostraron que el flujo del circuito solución debe ajustarse dependiendo de la energía térmica de activación, para mantener operando en todo momento al equipo en las mejores condiciones de operación. El estudio dinámico operativo del sistema estableció tres diferentes formas de operación: con energía solar, con almacenamiento de frío y con biogás.

La identificación de sistemas arrojó que el comportamiento dinámico de la unidad, puede representarse con una función de transferencia de primer orden, con la cual se pudo evaluar diferentes estrategias de control. Se concluye que un Proporcional e Integral fue el idóneo para controlar la capacidad de la unidad de absorción, ya que mostró mejor desempeño sobre control de la temperatura de salida del agua refrigerada, obteniendo ahorro energético de hasta un 4% en comparación con un controlador tradicional todo o nada. La evaluación del sistema de seguimiento solar en dos ejes determina que se puede obtener un error de desenfoque promedio de hasta 0.0269° , lo que permite implementarlo en tecnologías como cilindro parabólico.

Automation & Control for Solar Thermal and Biomass Air Conditioning System

Abstract

This work presents the theoretical and experimental development of automation and control of an air conditioning system activated by solar energy and biogas. The objective of this work is to automate the thermal conditioning service spaces safely, continuously and consuming minimal power. The theoretical study of the air conditioning unit includes an analysis of the requirements of automation, control and steady state simulation in Aspen Plus, in which a parametric study to identify critical variables and control loops are performed, furthermore information was obtained of the operating conditions of the absorption unit allowing their integration in a dynamic environment (TRNSYS), in which different configurations and control loops were tested to select a proposal that meets the established requirements.

The design and implementation in hardware Automation System, Control, Monitoring and Data Acquisition, is based on the programming of automation algorithms in a microcontroller with an object-oriented paradigm, along with the stages of preparation of the instrumentation, elements power and interfaces. The design and construction of the plant was to conduct basic engineering, selection and calibration of instrumentation and final control elements as well as the characterization of components and tuning the pilot plant, ending with installation and data acquisition system Preliminary test starting, stabilizing and unemployment.

The experimental study was to operate the equipment for the dynamic response of the cooling capacity, in order to obtain its transfer function, and subsequently an analysis of theoretical tuning for constant of control algorithm.

The simulation results showed that the solution flow circuit must be adjusted depending on the thermal activation energy, to maintain at all times operate the system in the best operating conditions. The dynamic operating system study identified three different forms: solar energy, cold storage and biogas.

System identification showed that the dynamic behavior of the unit can be represented by a transfer function of first order, which could evaluate different control strategies. We conclude that a Proportional and Integral was the perfect place to control the capacity of the absorber, as it showed better performance on temperature control output chilled water, obtaining energy savings of up to 4 % compared to a traditional controller on-off. The evaluation of the solar tracking system in two axes determines that it can obtain an average error of blur 0.0269° , , allowing implement technologies such as parabolic trough.

Índice

Resumen	IV
Lista de Figuras	XI
Lista de Tablas	XVI
Nomenclatura	XVII
1. Introducción	1
1.1. Problemática y justificación	2
1.2. Antecedentes	3
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo general	6
1.3.2. Objetivos específicos	7
1.4. Metodología	7
1.5. Organización de la tesis	8
2. Generalidades	9
2.1. Fundamentos de la energía solar	9
2.1.1. El Sol	9
2.1.2. Radiación en la superficie de la Tierra.	10
2.1.3. Geometría solar	11
2.2. Enfriamiento termosolar	13
2.2.1. Tecnologías de climatización solar.	14
2.3. Técnicas de modelado de sistemas	16
2.3.1. Modelo físico o matemático	16
2.3.2. Transformada de Laplace	16
2.3.3. Función de transferencia.	17
2.3.4. Respuesta transitoria	20
2.3.5. Respuesta en frecuencia	22
2.3.6. Respuesta en tiempo discreto	25
2.3.6.1. Transformada z	27
2.4. Introducción a los sistemas de control	30
2.4.1. Historia del control automático	30

2.4.2.	Sistemas de control realimentado	31
2.4.3.	Sistemas de control en lazo cerrado	31
2.4.4.	Sistemas de control en lazo abierto	32
2.4.5.	Sistemas de control en lazo cerrado en comparación con los sistemas en lazo abierto	32
2.4.6.	Algoritmos de control clásico	33
2.4.6.1.	Control Todo o Nada	33
2.4.6.2.	Control proporcional	33
2.4.6.3.	Control integral	34
2.4.6.4.	Control PID	35
2.5.	Consideraciones para la instrumentación	35
2.5.1.	Medición y error	35
2.5.1.1.	Sistemas de medición	36
2.5.1.2.	Tipos de error	36
2.5.2.	Reducción de errores	37
2.5.3.	Transductores	38
2.5.3.1.	Transductor de temperatura	39
2.5.4.	Instrumentos de medición solar	40
3.	Descripción y estudio teórico del sistema propuesto	43
3.1.	Descripción del sistema y estrategia de control	43
3.1.1.	Campo de colectores	44
3.1.1.1.	Las necesidades de control y propuesta de solución	45
3.1.1.2.	Algoritmo de automatización y control	46
3.1.2.	Unidad de enfriamiento por absorción	48
3.1.2.1.	Lazos de control	49
3.1.2.2.	Algoritmo de automatización del módulo de encendido de fuego directo	50
3.1.2.3.	Algoritmo de automatización y control de la unidad de absorción	51
3.1.3.	Circuito hidráulico y espacio a climatizar	54
3.1.3.1.	Modos de operación	54
3.1.3.2.	Algoritmo de automatización y control	56
3.2.	Simulación en Aspen plus	58
3.2.1.	Modelo del sistema de absorción en el entorno Aspen Plus	58
3.2.2.	Consideraciones para la simulación	59
3.2.3.	Resultados y validación	60
3.3.	Estudio paramétrico para detecciones de lazos de control	64
4.	Diseño y construcción del sistema de monitoreo y control	68
4.1.	Propuesta y arquitectura	68
4.2.	Diseño y fabricación del SACMAD	70
4.2.1.	Diseño del sistema de adquisición de datos	71

4.2.1.1.	Protocolo de comunicación	71
4.2.1.2.	Utilidad de configuración, monitoreo y control	72
4.2.2.	Diseño electrónico	73
4.2.3.	Acondicionamiento de señales e instrumentación	75
4.2.3.1.	Sensor de temperatura	76
4.2.3.2.	Transmisor de flujo	79
4.2.3.3.	Indicador y transmisor de flujo	82
4.2.3.4.	Transmisor de presión	83
4.2.3.5.	Bomba de solución	86
4.2.3.6.	Elementos de potencia	86
4.2.3.7.	El controlador	87
4.2.4.	Firmware	88
4.2.5.	Fabricación de los circuitos impresos	91
4.3.	Sistema de seguimiento solar	93
4.3.1.	Interfaz de usuario	94
4.3.2.	Etapas de potencia	95
4.3.3.	Sensor de seguimiento solar	95
4.3.4.	Algoritmo de posicionamiento	98
4.3.5.	Fabricación	99
5.	Construcción e instrumentación de la planta piloto	101
5.1.	Diagrama de tuberías e instrumentación	101
5.2.	Unidad de absorción	103
5.2.1.	Ubicación de equipos	106
5.2.2.	Mejoramiento y adaptaciones de equipos	106
5.2.3.	Instalación de instrumentación	108
5.2.4.	Instalación del SACMAD	110
5.2.5.	Acoplamiento con campo solar	112
5.3.	Circuito hidráulico y de aire	113
5.3.1.	Circuito de agua fría	113
5.3.2.	Cuarto de control	113
5.4.	Puesta a punto de la planta piloto	114
5.4.1.	Localización y reparación de fugas	114
5.4.2.	Verificación de conexiones eléctricas y electrónicas	115
5.4.3.	Prueba de elementos finales de control	115
5.5.	Mecanismo de seguimiento solar	116
5.5.1.	Banco de pruebas	116
5.6.	Limpieza, presentación y acabado final	117
6.	Estudio experimental	119
6.1.	Carga de refrigerante y solución en la unidad de absorción	119
6.1.1.	Preparación de solución	119
6.1.2.	Método de carga de solución	120

6.1.3.	Ajuste de concentración	122
6.1.4.	Purga de aire	124
6.2.	Pruebas realizadas en la planta piloto.	124
6.2.1.	Arranque, estabilización y paro	125
6.2.2.	Control de temperatura de la vivienda	127
6.2.3.	Operación continua con encendido y apagado	129
6.2.4.	Variación de flujo en el circuito solución	130
6.3.	Evaluación del sistema de seguimiento solar	131
7.	Diseño del sistema de control	135
7.1.	Análisis de respuesta transitoria de la unidad de absorción	135
7.1.1.	Modelo de primer orden	136
7.1.2.	Modelo de Segundo orden	139
7.1.3.	Identificación de sistemas con Matlab	143
7.1.4.	Respuesta transitoria del modelo ante datos experimentales	144
7.1.4.1.	Arranque y paro	144
7.1.4.2.	Operación continua con encendido y apagado	145
7.2.	Acciones de control	146
7.2.1.	Todo o nada	146
7.2.1.1.	Variación en la temperatura de entrada	147
7.2.1.2.	Variación en el punto de consigna	148
7.2.2.	Proporcional integral y derivativo	150
7.2.2.1.	Sintonización de constantes	150
7.2.2.2.	Variación en la temperatura de entrada	151
7.2.2.3.	Variación en el punto de consigna	152
7.2.3.	Análisis comparativo de acciones de control	153
7.2.4.	Consideraciones y ajuste final del controlador	154
8.	Conclusiones y recomendaciones	155
8.1.	Conclusiones	155
8.2.	Recomendaciones y trabajos futuros	158
	Bibliografía	159
	Apéndices	163
A.	Tablas de conversión de Laplace	164
B.	Manual de la aplicación de monitoreo y control	167
B.1.	Pantalla de inicio y tipos de comunicación.	167
B.1.1.	Conexión utilizado el Puerto Serial USB.	167
B.1.2.	Conexión utilizando el Puerto Ethernet	168
B.2.	Configuración del dispositivo electrónico	169
B.2.1.	Configuración	170

B.2.1.1.	Parámetros	170
B.2.1.2.	Entradas analógicas	173
B.2.1.3.	Entradas digitales	173
B.2.1.4.	Salidas digitales y PWM	174
B.2.2.	Historial	175
B.2.3.	Monitoreo	175
B.2.4.	Control	177

Lista de figuras

2.1. Fenómenos de reflexión y dispersión de la radiación solar.	11
2.2. Ángulo cenital, ángulo acimutal y ángulo acimutal de la superficie inclinada.	12
2.3. Esquema de un ciclo de absorción de simple efecto	15
2.4. Sistema de termómetro de mercurio de pared delgada de vidrio.	19
2.5. Modelo de primer orden para diferentes constantes de tiempo.	22
2.6. Trazas de Bode de un sistema. (Las curvas sólidas se obtuvieron experimentalmente).	26
2.7. Curva $x(t)$	29
2.8. Diagrama a bloques de un sistema a lazo cerrado.	32
2.9. Diagrama a bloques de un sistema a lazo abierto.	32
2.10. Características del controlador Todo-Nada.	34
2.11. Acción de control PID basándose en los errores de control pasados, presentes y futuros.	35
2.12. Sistema de medición y elementos que lo conforman.	36
2.13. Heliógrafo común.	41
2.14. Piranómetro con aro de sombra.	41
2.15. Piranómetro de uso común.	42
2.16. Pirheliómetro de uso común.	42
3.1. Configuración propuesta para el circuito hidráulico de agua fría.	44
3.2. Estructura y mecanismo de campo de colectores.	45
3.3. Algoritmo de automatización y control del campo de colectores.	48
3.4. Algoritmo de operación del módulo de chispa.	51
3.5. Algoritmo de automatización y control de la unidad de absorción.	53
3.6. Algoritmo de automatización y control del circuito hidráulico y aire.	57
3.7. Ciclo de enfriamiento de la unidad de absorción en el entorno de Aspen Plus.	59
3.8. Flujo de calor en el absorbedor y condensador en función de la temperatura del agua refrigerada.	60
3.9. Capacidad y COP en función de la temperatura del agua refrigerada.	61
3.10. Flujos y concentración en función de la temperatura del agua refrigerada.	62

3.11. Comparación de los datos experimentales Lazzarin et al (2009), simulación de Darwish et al. (2008) y Aspen Plus.	64
3.12. Flujo de vapor y flujo del vapor de amoníaco en función del calor transferido en el generador.	65
3.13. Concentración del flujo de vapor y capacidad en el evaporador en función del calor transferido en el generador.	66
3.14. COP y temperatura de generación en función del calor transferido. . . .	67
4.1. Arquitectura en hardware del controlador del sistema de aire acondicionado solar.	69
4.2. Módulo genérico para adquisición, automatización y control.	70
4.3. Arquitectura entre dispositivo y utilidad de monitoreo.	71
4.4. Pantalla de conexión y configuración de parámetros de la utilidad de monitoreo y control.	72
4.5. Pantalla de configuración de entradas analógicas y gráficas de la utilidad de monitoreo y control.	73
4.6. Esquema del circuito modular para automatización y control.	74
4.7. Tablero del controlador del sistema de aire acondicionado.	75
4.8. Sensor de temperatura RTD PTC100.	76
4.9. Etapa de acondicionamiento del sensor de temperatura.	76
4.10. Respuesta de los sensores de temperatura RTD comparados con la del patrón.	78
4.11. Indicador y transmisor de flujo volumétrico.	79
4.12. Acondicionamiento para convertir de corriente a voltaje.	80
4.13. Banco de calibración de flujo, presión, temperatura y concentración. . .	81
4.14. Lectura del barrido de flujo en la utilidad de monitoreo.	82
4.15. Indicador y transmisor de flujo volumétrico.	82
4.16. Acondicionamiento de señal para el indicador de flujo.	83
4.17. Transmisor de presión Dwyer.	84
4.18. Lectura del barrido de presión de los sensores de flujo en la utilidad de monitoreo.	84
4.19. Válvula proporcional de 3 vías.	85
4.20. Válvula proporcional de 3 vías.	86
4.21. Conexiones de potencia y control del variador de frecuencia.	86
4.22. Etapa de acondicionamiento para interruptores magnéticos.	87
4.23. Tablero de demostración PIC32 Ethernet Starter Board y expansión. . .	88
4.24. Diagrama de clases de los diferentes dispositivos que componen la automatización y control.	89
4.25. Respuesta de salida con diferentes filtros de un sensor de temperatura tipo RTD.	90
4.26. Respuesta de salida de un sensor de temperatura tipo RTD y su respuesta con filtro Chebyshev.	90
4.27. Software y hardware en mesa de maquinado de PCBs.	91

4.28. Grabado de las placas de las etapas de acondicionamiento y módulo genérico de monitoreo y control.	92
4.29. Soldado y ensamble de componentes del módulo genérico de monitoreo y control.	93
4.30. Etapas de acondicionamiento y módulo genérico de monitoreo y control terminados.	93
4.31. Arquitectura del sistema de seguimiento.	94
4.32. Diagrama esquemático de la etapa de potencia del SSS.	95
4.33. Circuito esquemático del sensor basado en procesamiento de imagen.	96
4.34. Circuito esquemático del sensor basado en procesamiento de imagen.	96
4.35. Descripción física del sensor	97
4.36. Diagrama de flujo de la operación del sensor basado en procesamiento de video.	97
4.37. Algoritmo de posicionamiento solar.	98
4.38. Inserción de componentes y aplicación de soldadura	99
4.39. Vista isométrica y de planta del sensor del SSS.	99
4.40. Dispositivo de control e interfaz de usuario del SSS.	100
5.1. Diagrama de tubería e instrumentación del SAAS.	102
5.2. Diagrama de tuberías e instrumentacion de la unidad de absorción.	105
5.3. Instalación de tomas para la instrumentación en la unidad de enfriamiento.	106
5.4. Instalación del generador y rectificador de la unidad de absorción.	107
5.5. Evaporador y bomba de solución de la unidad de absorción.	107
5.6. Aislamiento de aire de la succión y emisión del condensador.	108
5.7. Instalación de los sensores de temperatura, manómetro y transmisores de presión.	109
5.8. Instalación de los transmisores de flujo a) efecto coriolis y b) magnéticos.	109
5.9. Instalación de instrumentación en la planta piloto	110
5.10. Instalación SACMAD en la unidad de absorción.	111
5.11. Controlador para el encendido en el quemador de la máquina de absorción.	111
5.12. Instalación de bomba hidráulica y variador de frecuencia.	112
5.13. Separador de vapor de amoniaco proveniente del campo de colectores.	112
5.14. Construcción de circuito hidráulico de agua fría.	113
5.15. Instalación de componentes, manejadora de aire y circuito de potencia	114
5.16. Prueba de fugas en las tuberías de la unidad de absorción.	115
5.17. Componentes del quemador de gas de la unidad Robur.	116
5.18. Banco de pruebas del sistema de seguimiento solar.	117
5.19. Vista final de la unidad de absorción.	118
5.20. Instalación del sistema de aire acondicionado	118
6.1. Preparando solución a) Esquema de conexión, b) Preparación en campo.	120
6.2. Esquema de la carga de refrigerante.	121

6.3. Carga de solución a la máquina de absorción, a) Esquema de conexión, b) Carga de solución en campo.	122
6.4. Temperaturas de la unidad de absorción durante el ajuste de concentración.	123
6.5. Temperaturas de la unidad de absorción durante el ajuste de concentración.	123
6.6. Purga de fluidos no condensables en la máquina de absorción.	124
6.7. Temperaturas del arranque estabilización y paro.	126
6.8. Presiones del arranque estabilización y paro.	126
6.9. Control de la temperatura de la vivienda a través de la válvula de 3 vías, en modo solar y almacenamiento.	128
6.10. Control de la temperatura de la vivienda a través de la válvula de 3 vías en modo solar y fuego directo.	129
6.11. Control de la capacidad de la unidad de absorción con controlador On-Off	130
6.12. Variación de flujo del circuito solución de la unidad de absorción	131
6.13. Procesamiento de imagen por pasos. a) Imagen real. b) Imagen desde el sensor. c) Imagen desde la memoria del microcontrolador.	132
6.14. Resultados de la medición del sistema de seguimiento.	133
7.1. Promedio de la respuesta al escalón real de la unidad de absorción. . .	138
7.2. Respuesta al escalón de la unidad de absorción con una función de transferencia de primer orden.	139
7.3. Especificaciones de la respuesta transitoria de un sistema de segundo orden.	141
7.4. Respuesta al escalón de la unidad de absorción con una función de transferencia de segundo orden.	143
7.5. Interfaz gráfica de la herramienta “ident” de Matlab.	143
7.6. Respuesta de la función de transferencia ante datos experimentales de arranque estabilización y paro.	145
7.7. Respuesta de la función de transferencia ante datos experimentales de operación continua con encendido y apagado.	146
7.8. Simulación del controlador On-Off del sistema de absorción en el entorno Simulink.	147
7.9. Respuesta de la función con perturbación en la temperatura de entrada.	148
7.10. Respuesta de la función con cambios en en el punto de consigna.	149
7.11. Simulación del controlador On-Off del sistema de absorción en el entorno Simulink.	150
7.12. Respuesta de la función con perturbación en la temperatura de entrada.	152
7.14. Consumo de energía por cada estrategia de control.	153
7.13. Respuesta de la función con cambios en en el punto de consigna.	153
7.15. Respuesta de la temperatura de salida y acción de control, con diferentes sintonizaciones.	154
B.1. Pantalla de inicio y conexión de la aplicación de monitoreo y control. .	167
B.2. Selección de conexión USB con el dispositivo electrónico de monitoreo, adquisición de datos y control.	168

B.3. Configuración y selección del puerto serial a utilizar.	168
B.4. Selección de conexión TCP/IP con el dispositivo electrónico de monitoreo, adquisición de datos y control.	169
B.5. Configuración de la dirección IP y puerto de conexión de red ethernet. .	169
B.6. Menú de la aplicación de monitoreo y control.	170
B.7. Pantalla de configuración de la aplicación de monitoreo y control. . . .	170
B.8. Descripción de los parámetros de configuración.	171
B.9. Descripción del menú inferior de parámetros.	172
B.10. Descripción de la configuración de las entradas analógicas.	173
B.11. Descripción de la configuración de las entradas digitales	174
B.12. Descripción de la configuración de las salidas digitales y PWM.	174
B.13. Búsqueda del archivo de información para visualizar los datos en historial.	175
B.14. Descripción de la ventana de monitoreo.	176
B.15. Descripción de la configuración y creación de gráficas en tiempo real . .	176
B.16. Descripción de las gráficas de monitoreo en tiempo real.	177
B.17. Descripción las salidas de control digitales y PWM	178

Lista de tablas

2.1.	Rangos de longitud de onda expresado en micras y clasificados por color.	9
2.2.	Información experimental	29
2.3.	Descripción de diferentes metales usados en RTD's.	39
3.1.	Tabla de verdad de las válvulas solenoides del campo solar.	46
3.2.	Información técnica del equipo ACF60-00 HT.	49
3.3.	tabla de verdad de las válvulas solenoides del circuito hidráulico.	56
3.4.	Parámetros y consideraciones utilizados en la simulación	60
3.5.	Parámetros y variables en función de la temperatura del agua refrigerada	62
3.6.	Resultados de la simulación en Aspen Plus, izquierda Darwish et al. (2008), derecha este trabajo.	63
4.1.	Estructura de la cadena de petición.	71
4.2.	Estructura de la cadena de comando.	72
4.3.	Constates de ecuación de corrección para cada sensor de temperatura RTD.	79
4.4.	Constates de ecuación de corrección para cada sensor de presión.	85
6.1.	Resumen de los resultados experimentales del error para el ángulo acimutal, cenital y vector solar, expresado en grados.	134
A.1.	Pares de transformada de Laplace	164

Nomenclatura

α	Coeficiente de temperatura [adimensional].
α_s	Altura solar [grados].
β	Inclinación [grados].
δ	Declinación de la tierra [grados].
γ	Ángulo acimutal de la superficie [grados].
γ_s	Ángulo acimutal [grados].
λ	Longitud de onda [micras].
ω	Ángulo horario [grados].
$\bar{x}$	Media aritmética [adimensional].
ϕ	Latitud [grados].
τ	Constante de tiempo.
θ	Ángulo de incidencia [grados].
θ_z	Ángulo cenital [grados].
COP	Coeficiente de operación [adimensional].
G_{on}	Radiación extraterrestre por día [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 estándar [grados].

n	Día el año. [adimensional].
R	Resistencia del material [ohm].
T	Temperatura [$^{\circ}C$].
T_c	Tiempo civil [horas].
t_d	Tiempo derivativo [s].
T_i	Tiempo integral [s].
T_s	Tiempo solar [horas].
u	Variable de control o manipulad [adimensional].
y	Variable de salida o de proceso [adimencional].
y_{sp}	Punto de consigna [adimensional].

Capítulo 1

Introducción

En el verano debido al uso de equipos de aire acondicionado, el consumo de energía esta creciendo en todo el mundo. Entre las causas que generan un incremento en el consumo de energía por la utilización de equipos de aire acondicionado en edificaciones se encuentran: las altas cargas térmicas, el incremento de estándares en confort, la demanda de confort de los ocupantes y la construcción de características arquitectónicas, Rodriguez et al. (2008); Lucas et al. (2006).

En la actualidad se cuenta con una amplia oferta tecnológica en la producción de frío para lugares con disponibilidad de energía eléctrica, sin embargo es inaccesible para la economía de muchas regiones en vías de desarrollo, Best & Ortega (1999); Fernández et al. (2006). En dichas tecnologías, no solo se busca una mayor eficiencia energética en la producción de frío, además, se trata de limitar el efecto invernadero producido por algunos refrigerantes. Estos dos factores; el de ahorro energético y el de impacto ambiental, han originado que la ciencia y la tecnología de la producción de frío, se orienten hacia la búsqueda de nuevos refrigerantes y a la optimización termodinámica de los equipos de enfriamiento, Fernández et al. (2006); Vidal et al. (2006).

El sistema de enfriamiento por absorción de vapor, es un fenómeno físico que puede remplazar a los sistemas de compresión mecánica de vapor, utilizando el calor como energía térmica en lugar de trabajo mecánico, Horuz & Callander (2004).

La tecnología de sistemas de absorción puede ser utilizada en aire acondicionado y refrigeración para los sectores residencial, comercial e industrial, Velázquez & Best (2002); Tsilingiris (1993). Además el ciclo de enfriamiento por absorción es posible activarlo con energía solar para producir frío, utilizando las tecnologías solares de media a alta temperatura, Ortega et al. (2008); Atmaca & Yigit (2003); Szokolay (1977).

Por esta razón surge una propuesta del Centro de Estudios de las Energías Renovables (CEENER), para desarrollar una unidad de enfriamiento activada con una fuente de energía híbrida termosolar y biogás, aplicada en la climatización de espacios y consecuentemente el desarrollo de una tecnología innovadora para el remplazo de las tecnologías convencionales. El sistema se conforma principalmente por tres subsistemas, el campo de colectores que capta y suministra energía térmica a una unidad de enfriamiento basada en un ciclo de absorción, que a través de un circuito hidráulico y aire

provee de potencia frigorífica para acondicionar el espacio deseado. La administración de estos subsistemas y las fuentes de energía juega un papel importante en su operación conjunta, lo que demanda un sistema de control que les permita operar a máxima eficiencia ante diferentes condiciones de trabajo. Por ello en este capítulo se muestra una búsqueda bibliográfica acerca de trabajos relacionados con el planteado, así como su problemática y justificación, seguido de los objetivos planteados para el proyecto. La metodología que nos llevará a lograr esas tareas específicas, y por último una reseña general de la distribución del documento.

1.1. Problemática y justificación

El sol tiene un movimiento aparente con respecto a una orientación particular de un plano sobre la tierra, lo cual puede ser descrito en términos de ángulos, Benford & Bock (1939). El primero de ellos va de este a oeste y lo denominamos ángulo acimutal, el segundo es la altura solar, debido a estos movimientos la alineación de un colector solar en relación a la dirección del sol no será estable, Arbab et al. (2009). El sistema de seguimiento solar juega un papel importante para que el colector solar pueda recibir la radiación solar máxima en todo momento Chong & Wong (2009). En los sistemas solares fotovoltaicos con seguimiento en uno y dos ejes es posible captar hasta un 30 y 40 % más de energía en comparación con uno fijo, Abdallah (2004); Abdallah & Nijmeh (2004); Chen & Feng (2007); Sungur (2009). En el caso del colector solar con concentración, el sistema de seguimiento debe ser muy preciso, para asegurar un buen comportamiento térmico, Cope & Tully (1981).

En cuanto al acoplamiento del campo solar y la máquina de absorción se presentan requerimientos que si no son atendidos dificultan evaluar el comportamiento real de toda 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). La mejora y optimización del diseño y control de los sistemas de enfriamiento activados con calor, es una cuestión fundamental, independientemente de la fuente de energía utilizada. Sin embargo, la unión de un sistema de enfriamiento activado con energía térmica y un sistema de control eficaz, pueden ser capaz de combinar la economía con un bajo impacto ambiental, Vargas et al. (1998); Fernández-Seara & Vázquez (2001).

Además el ciclo de enfriamiento se encuentra en fase de desarrollo y la falta de un sistema de automatización y control, presenta una barrera para su desarrollo e introducción al mercado, por lo que surge la necesidad de realizar un sistema de automatización y control que permita operar el sistema de forma automática, segura y continua, con el objetivo de brindar confort y ahorro de energía.

1.2. Antecedentes

Las bombas de calor por absorción deben de ajustar la carga de acuerdo al consumo del usuario, Ohgata et al. (1997) describieron un procedimiento práctico para el diseño de un control robusto del sistema de absorción, que consiste en resolver la no linealidad del sistema mediante la linealización de una serie puntos en estado estacionario. El objetivo del controlador es manipular el flujo del circuito solución para que la salida del agua enfriada en el evaporador se mantenga en un punto de consigna, a pesar de que exista un cambio en la demanda de frío.

Como se sabe la temperatura de generación de vapor de un Sistema de Refrigeración de Absorción de Amoníaco (del inglés Absorption Amonia Refrigeration Systems, AARS) afecta al Coeficiente de Operación, para que este sea el máximo se puede calcular el valor de temperatura óptimo. De acuerdo a esto, Fernández-Seara & Vázquez (2001) estudiaron la dependencia de la temperatura y los parámetros del sistema de absorción, para controlar la Temperatura Óptima del Generador (OGT) de un sistema de enfriamiento por absorción. Los resultados mostraron que la OGT calculada puede ser controlada y gestionada por variar la fuente de calor para mantener al equipo a la máxima eficiencia.

La implementación de un controlador de lógica difusa para un sistema de aire acondicionado basado en un ciclo por absorción, fue llevada a cabo por Lygouras et al. (2007), donde controlaron el flujo de calor entrante en el generador y el flujo de la solución del ciclo por absorción. Los autores mencionan que la desventaja de las propuestas de control son el número de cálculos y la memoria que requieren en la fusificación y defusificación, sin embargo, la mayor contribución de ellos fue implementar el sistema de control difuso en microcontrolador de 16 bits, el cual no tiene ninguna habilidad especial en la lógica difusa.

García-Arellano et al. (2010) analizaron la respuesta transitoria del flujo de refrigerante en el evaporador y su relación con la capacidad en el evaporador de un sistema de enfriamiento por absorción GAX, para ello regulan la capacidad de enfriamiento demandada por el usuario. Este lazo de control ajusta el nivel de la solución refrigerante en el generador, y mantiene estable la capacidad de enfriamiento en el evaporador. adicionalmente dos válvulas solenoides implementadas en diferentes secciones del sistema para separar presiones, y con ello reducir el tiempo de estabilización al restablecer la operación del sistema.

Actualmente en el mercado existe una variedad de empresas que comercializan unidades basadas en ciclos por absorción, por ejemplo la firma YAZAKY con más de 40 años de experiencia en el desarrollo y fabricación de máquinas de absorción, Yazaki se refiere a menudo como "Los Pioneros de la absorción". A partir de su experiencia incomparable en el desarrollo de la producción de los enfriadores de absorción, los sistemas utilizados por la firma YAZAKI en sus productos de refrigeración, se basa en el ciclo de absorción con solución de bromuro de litio (LiBr) y agua, siendo esta el refrigerante y el LiBr el absorbente. El sistema de control de dichas unidades contiene dos lazos de control, el primero regula la fuente de calor, es decir, la válvula de 3 vías hace

un baipás proporcional en el agua caliente entrante al equipo, según la carga térmica en el evaporador; el segundo controla el agua que pasa por la torre de enfriamiento, el cual hace un baipás proporcional mediante una válvula conectada en el circuito de agua de enfriamiento, además el sistema de control manipula el encendido y apagado de las bombas de circulación del sistema, YAZAKi (1993).

ROTARTICA ha desarrollado tecnología basada en el ciclo de absorción y aplicando los mismos principios en un entorno rotativo, para mejorar la eficiencia del ciclo mediante la optimización de los procesos de transferencia de calor, ROTARTICA (2000a). Las unidades de ROTARTICA para funcionar, tienen un termostato colocado en el espacio a climatizar, este termostato basado en un control clásico Todo-Nada se conecta a las terminales de la unidad para encenderla o apagarla, además un sistema de control de alarmas y monitoreo, el cual es la principal comunicación entre el usuario y el equipo. El panel de control contiene botones de membrana para el apagado y encendido del equipo y navegación del menú, además una pantalla de 14 segmentos que indican el monitoreo de los sensores del equipo o el número de alarma, en el caso de que halla sido activada, ROTARTICA (2000b).

ROBUR es una empresa de 15 años y la primera en todo el mundo en la manufactura modular de equipos de refrigeración por aire, para sistemas de calefacción y aire acondicionado, utilizando fuego directo en la tecnología de absorción. La empresa comercializa sistemas de enfriamiento en el sector comercial e industrial (versiones Standard y HT), aplicaciones tecnológicas por ejemplo, en el proceso industrial, que podrían requerir de agua fría hasta 24 horas al día (versión TK) y para aplicaciones de refrigeración a baja temperatura (versión LB). Este tipo de unidades contienen una tarjeta de control electrónico (s60) con microprocesador integrado que controla el funcionamiento de la enfriadora, así como algunos dispositivos de seguridad como lo son de: (1) límite de temperatura que se encuentra en la pared por encima de la cámara de combustión del generador, (2) presostato de aire en el circuito de combustión para detener el motor del quemador debido a la insuficiencia del flujo de aire de combustión, (3) caja de control de encendido del quemador y (4) un interruptor de flujo que controla el flujo de agua fría, ROBUR (2006). La capacidad de la unida de enfriamiento se controla con un algoritmo de control TODO-NADA, el cual manipula la temperatura de entrada o salida del agua enfriada. La compañía además de brindar el controlador s60 por cada unidad, ofrece el sistema de control DDC, el cual permite la automatización y monitoreo de la conexión de un banco de unidades de enfriamiento, ROBUR (2005).

Thermax Ltd. es una empresa que proporciona una gama de producto ingenieril para los sectores de energía y el medio ambiente. Una de las soluciones que oferta la empresa, consta de el sistema de absorción activado con agua caliente y una mezcla de trabajo bromuro de litio agua. Las unidades vienen con un PLC Siemens S7/200 (CPU potente Siemens 226 de XM) y una pantalla OP77 de 4 líneas con 20 caracteres, siempre con las características tecnológicas más avanzadas de la concesión, para brindar una operación segura y económica, a fin de que estos productos sean altamente eficientes, confiables y fáciles de usar. El equipo de control está encerrado en una chapa metálica a prueba de polvo, montada en el refrigerador con protección IP42, THERMAX (2008a).

El sistema de control cuenta con interruptores de seguridad y sobrecorriente, sensores de temperatura para control y monitoreo, además para autodiagnóstico emite audio y mensajes apropiados en la terminal de interfaz del operador. El equipo de enfriamiento contiene un lazo de control en el circuito de agua caliente y otro en el circuito de agua de enfriamiento. El control de la capacidad de enfriamiento es regulado de 10-100 % mediante un algoritmo de control PID, que tiene como variable controlada la temperatura del agua saliente del evaporador y como manipulada la cantidad de adición de calor en el generador, THERMAX (2008b).

Solarnext es una empresa que se dedica al desarrollo y comercialización de paquetes de sistemas de enfriamiento que operan con energía solar térmica, así como el diseño conceptual integral, la planificación, disposición y puesta en marcha de la energía solar y sistemas de climatización para aplicaciones privadas, comerciales e industriales, SolarNext (2009b). La empresa ofrece equipos de enfriamiento y de colección solar ofertados en el mercado, los cuales son acoplados mediante el controlador chilli, el cual tiene la capacidad de controlar sistemas de calentamiento y enfriamiento, mezcladores, entradas para sensores y control de velocidad de bombas, además de contener una interfaz de usuario atractiva por medio de una pantalla de iluminación táctil, puerto Ethernet para mantenimiento y transmisión de información remota, puerto de memoria para el almacenamiento de información, funciones de ayuda integradas y un envolvente robusto de metal, SolarNext (2009a).

Climate Well es una empresa que oferta tecnología para calefacción y refrigeración, a empresas profesionales que ofrecen soluciones líderes ambientales interiores de viviendas unifamiliares, multifamiliares, hoteles, oficinas, centros comerciales, hospitales y otras aplicaciones industriales, Climatewell (2010). Todas sus soluciones cuentan con un panel de control, en el que todos los ajustes se pueden controlar, cambiar o ajustar, desde una interfaz de usuario equipada con una pantalla táctil de 3.5 pulgadas de alta resolución TFT, ClimateWell (2010). Además el controlador cuenta con las características de: (1) funcionar en 6 modos de operación mediante la lectura de sensores y control de válvulas, (2) monitorear los reactores, disipadores y sensores de temperatura, (3) contener puertos para memorias SD y USB que almacenan la adquisición de datos y (4) un puerto Ethernet para la conexión remota del equipo mediante un servidor web, ClimateWell (2010).

En el trabajo descrito por Ruelas (2010) se aborda el desarrollo de un sistema de seguimiento solar para un campo de colectores de cilindro parabólico y un sistema de automatización y control para el circuito hidráulico y de aire de una unidad de climatización, que consiste en operar al sistema de aire acondicionado ante diferentes escenarios, como lo son: funcionamiento con energía solar, almacenamiento de frío y a fuego directo (biogás), con el propósito de mantener la temperatura de confort en una edificación.

De acuerdo al estudio del sistema y el estado del arte, se propone lazos o necesidades de control del sistema de enfriamiento divididas por subsistemas:

1. Automatización y control para el sistema de captación solar, que consiste en:

- a) Sistema de seguimiento solar para el campo de colectores.
 - b) Control de temperatura o energía térmica suministrada en el generador.
 - c) Lazos de seguridad.
2. Automatización y control de la unidad de absorción, que consiste en:
- a) Control de capacidad de enfriamiento de la unidad de absorción.
 - b) Control de flujo en el circuito solución para operar el equipo a máxima capacidad.
 - c) Control del delta de presión para operar el equipo a máxima capacidad.
 - d) Control del flujo de aire en el condensador para operar el equipo a máxima capacidad.
 - e) Control del módulo de fuego directo.
 - f) Lazos de seguridad.
 - g) Funciones o herramientas como autodiagnóstico, adquisición de datos, monitoreo e interfaz de usuario.
3. Automatización y control del circuito hidráulico y aire, que consiste en:
- a) Control de temperatura del espacio a climatizar.
 - b) Automatización y control para operar el circuito hidráulico en los diferentes modos de operación (solar, almacenamiento de frío y biogás)
 - c) Lazos de seguridad.

En este trabajo se pretende continuar con la investigación antes mencionada en Ruelas (2010), actualizando los puntos 1a y 3 además de la automatización y control del equipo de absorción (2a, 2e y 2f), para desarrollar una unidad integral de automatización y control implementado en un sistema de aire acondicionado solar.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Investigar y desarrollar teórica y experimentalmente la automatización y control de un sistema de aire acondicionado, operado con una fuente de energía híbrida termosolar y biogás, 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 aire acondicionado solar.
- Proponer mejoras o soluciones a problemas encontrados en el estudio del arte, relacionados con la automatización y control de los sistemas de enfriamiento termosolares.
- Estudiar de forma teórica de la unidad de enfriamiento por absorción.
- Detectar las variables críticas a controlar y lazos de control.
- Desarrollar una propuesta para automatizar y controlar la unidad de enfriamiento por absorción.
- Diseñar y elaborar circuitos impresos para el controlador de la unidad por absorción y sistema de seguimiento.
- Especificar e instalar la instrumentación y elementos finales de control, del sistema de enfriamiento solar.
- Calibrar instrumentación y caracterizar los elementos finales de control.
- Afinar y acoplar el trabajo realizado por Ruelas (2010); con el controlador de la unidad de enfriamiento por absorción, para automatizar y controlar el sistema de aire acondicionado solar.
- Implementar el sistema de control en la planta piloto y sistema de seguimiento.
- Realizar estudio experimental del controlador del sistema de aire acondicionado solar y sistema de seguimiento solar operando en la instalación del sistema de climatización.
- Realizar escritura de tesis.

1.4. Metodología

Para desarrollar el proyecto planteado, se seguirá como base la metodología del Centro de Estudios de las Energías Renovables, para desarrollar proyectos de investigación y proyectos tecnológicos (tecnologías limpias). Las diferentes etapas de dicha metodología se muestran en la siguiente lista:

1. Detección de la problemática, necesidad u oportunidad.
2. Estudio del estado del arte de la tecnología.
3. Propuesta tecnología con innovación.

4. Estudio teórico del sistema propuesto.
5. Simulación y estudio paramétrico.
6. Diseño de componentes y selección de instrumentación y elementos finales de control (ingeniería básica y de detalle).
7. Construcción del sistema de control y afinación de la planta piloto.
8. Instalación de componentes, instrumentación y elementos finales de control.
9. Pruebas experimentales de arranque estabilización y paro de la planta piloto.
10. Estudio de sensibilidad y corridas de exploración.
11. Estudio experimental.
12. Procesamiento y análisis de la información experimental.
13. Validación de datos teóricos con los experimentales.
14. Corrección de modelos teóricos utilizando datos experimentales.
15. Protección de la invención

1.5. Organización de la tesis

En este documento se redacta el desarrollo de la automatización y control para un Sistema de Aire Acondicionado Solar, en cual se involucro un conjunto de áreas multidisciplinarias. En el Capítulo 2 se mencionan algunos conceptos básicos de la energía solar, climatización, teoría de control e instrumentación, 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 ASPEN plus, con el objetivo de realizar un estudio de sensibilización del sistema . En el Capítulo 4 se muestra la selección de dispositivos e instrumentación, además del diseño electrónico e implementación en hardware del sistema de control. En el Capítulo 5 se presenta la construcción e instalación del sistema de enfriamiento. En el capítulo 6 se presentan los resultados del estudio experimental del circuito de control de la unidad de enfriamiento y del sistema de seguimiento solar. En el capítulo 7 se analizan los datos reales de la unidad de absorcion para obtener un modelo experimental, para sintonizar y evaluar los lazos de control. Por último en el Capítulo 8 se presentan las conclusiones obtenidas a lo largo del proyecto, además de las recomendaciones y trabajos futuros.

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 $1.39 \times 10^9 \text{m}$, a una distancia de $1.5 \times 10^{11} \text{m}$ 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 solido, 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 $40 \times 10^6 \text{K}$, 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 = $1000 \text{ (W h/m}^2\text{)}$

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 ha sido cambiada.

Radiación Total o global, es la suma de la radiación directa y difusa.

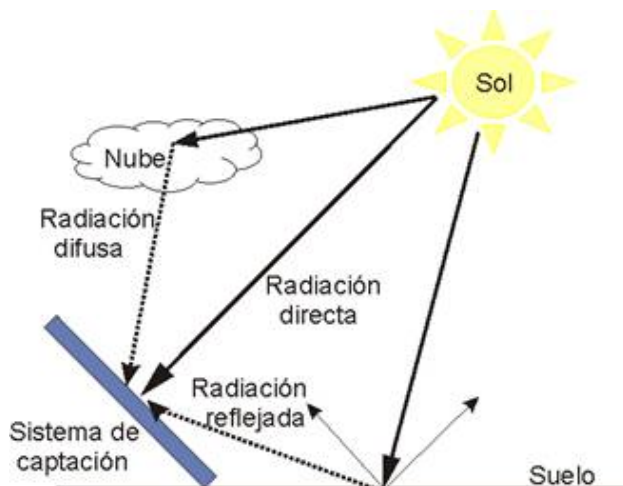


Figura 2.1: Fenómenos de reflexión y dispersión de la radiación solar.

2.1.3. Geometría solar

La posición relativa del sol, es la relación geométrica entre la orientación particular de un plano con respecto a la Tierra en una fecha definida y la dirección de los rayos del sol que entran a la Tierra, esto puede ser descrito en términos de ángulos, Benford & Bock (1939), algunos de ellos son indicados en la figura 2.2.¹

¹Definiciones adoptadas de Duffie & Beckman (2006); Tiwari (2002); Sánchez (2007); Sukhatme (1996)

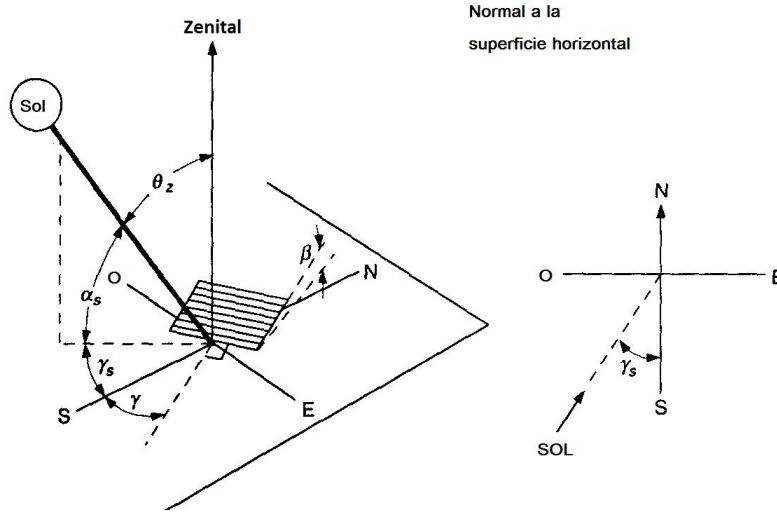


Figura 2.2: Ángulo cenital, ángulo acimutal y ángulo acimutal de la superficie inclinada.

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 acimutal 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 cenital (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 cenital.

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

Ángulo acimutal (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 termosolar

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 disecante.

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

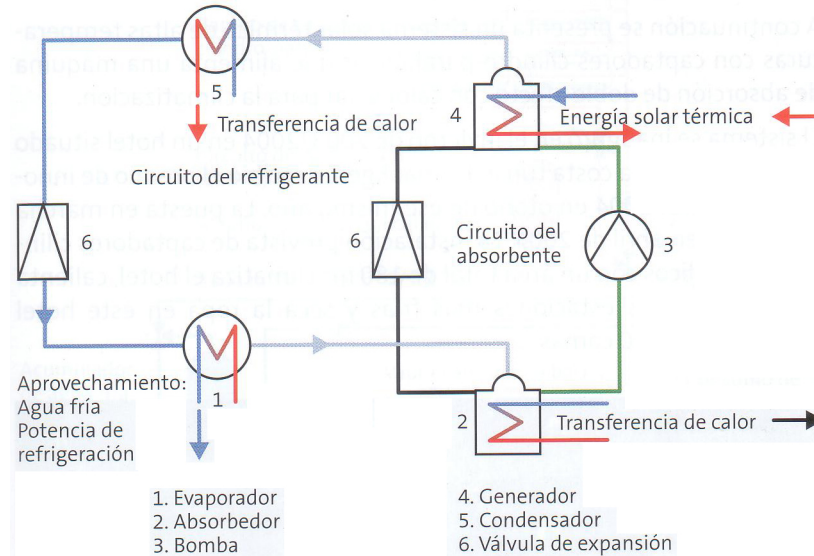


Figura 2.3: Esquema de un ciclo de absorción de simple efecto

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, 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.

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

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

2.3. Técnicas de modelado de sistemas

Al estudiar los sistemas de control, el lector debe ser capaz de modelar sistemas dinámicos y analizar las características dinámicas. Un modelo matemático de un sistema dinámico se define como un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión. Tenga presente que un modelo matemático no es único para un sistema determinado. Un sistema puede representarse en muchas formas diferentes, por lo que puede tener muchos modelos matemáticos, dependiendo de cada perspectiva. Al aplicar leyes físicas a un sistema específico, es posible desarrollar un modelo matemático que describa al sistema, tal que se puede incluir parámetros desconocidos, los cuales deben evaluarse mediante pruebas reales. Sin embargo algunas de las leyes de la física que gobiernan el comportamiento de un sistema no están completamente definidas, y la formulación de un modelo matemático puede resultar imposible, de ser así se pueden utilizar modelado experimental. En este procedimiento se somete al sistema a un conjunto de entradas conocidas y se miden sus salidas a partir de las relaciones de entrada y salida se deriva entonces el modelo matemático, por ello cabe la importancia de mencionar los métodos de la respuesta en frecuencia (es que la función de transferencia de la planta), el análisis de la respuesta transitoria y la transformada z que analiza el sistema en tiempo discreto.

2.3.1. Modelo físico o matemático

La dinámica de muchos sistemas, ya sean mecánicos, eléctricos, térmicos, económicos, biológicos, etc., se describe en términos de ecuaciones diferenciales. Dichas ecuaciones diferenciales se obtienen a partir de leyes físicas que gobiernan un sistema determinado, como las leyes de Newton para sistemas mecánicos y las leyes de Kirchhoff para sistemas eléctricos.

Los modelos matemáticos pueden adoptar muchas formas distintas. Dependiendo del sistema del que se trate y de las circunstancias específicas, un modelo matemático puede ser más conveniente que otros. Por ejemplo, en problemas de control óptimo, es provechoso usar representaciones en el espacio de estados. En cambio, para los análisis de la respuesta transitoria o de la respuesta en frecuencia de sistemas lineales con una entrada y una salida invariantes con el tiempo, la representación mediante la función de transferencia puede ser más conveniente que cualquier otra. Una vez obtenido un modelo matemático de un sistema, se usan diversos recursos analíticos, así como computadoras, para estudiarlo y sintetizarlo.³

2.3.2. Transformada de Laplace

El método de la transformada de Laplace es un método operativo que aporta muchas ventajas cuando se usa para resolver ecuaciones diferenciales lineales. Mediante el uso de la transformada de Laplace, es posible convertir muchas funciones comunes, tales

³Adecuado de Ogata (2003)

como las funciones senoidales, las funciones senoidales amortiguadas y las funciones exponenciales, en funciones algebraicas de una variable compleja. Las operaciones tales como la diferenciación y la integración se sustituyen mediante operaciones algebraicas en el plano complejo. Por tanto, en una ecuación algebraica, una ecuación diferencial lineal se transforma en una variable compleja “s”. Si se resuelve la ecuación algebraica en “s” para la variable dependiente, la solución de la ecuación diferencial (la transformada inversa de Laplace de la variable dependiente) se encuentra mediante una tabla de transformadas de Laplace (ver tabla A.1) o una técnica de expansión en fracciones parciales. Una ventaja del método de la transformada de Laplace es que permite el uso de técnicas gráficas para predecir el desempeño del sistema, sin tener que resolver las ecuaciones diferenciales del sistema. Otra ventaja del método de la transformada de Laplace es que, cuando se resuelve la ecuación diferencial, es posible obtener simultáneamente tanto el componente transitorio como el componente de estado estable de la solución.

La transformada de Laplace de $f(t)$ se obtiene mediante

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dt [f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt$$

donde $f(t)$ es una función en del tiempo t tal que $f(t) = 0$ para $t < 0$, s es una variable compleja, $\mathcal{L}$ es un símbolo operativo que indica que la cantidad que antecede se va a transformar en mediante la integral de Laplace y $F(s)$ es la transformada de Laplace de $f(t)$.

El proceso inverso de encontrar la función del tiempo $f(t)$ a partir de la transformada de Laplace $F(s)$ se denomina transformada inversa de Laplace. La notación para la transformada inversa de Laplace es $\mathcal{L}^{-1}$, se encuentra a partir de $F(s)$ mediante la siguiente integral de inversión:

$$\mathcal{L}^{-1}[f(s)] = f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(s) e^{st} ds, \text{ para } t > 0$$

en donde c , la abscisa de convergencia, es una constante real y se eligió más grande que las partes reales para todos los puntos singulares de $F(s)$. Por tanto, la trayectoria de integración es paralela al eje jw y se desplaza una cantidad c a partir de él. Esta trayectoria de integración va hacia la derecha de todos los puntos singulares. En la actualidad se suele utilizar estructuras básicas para obtener directamente la transformada de la place, dichas tablas pueden ser encontradas en el Apéndice A.

2.3.3. Función de transferencia.

En la teoría de control, a menudo se usan las funciones de transferencia para caracterizar las relaciones de entrada-salida de componentes o de sistemas que se describen mediante ecuaciones diferenciales lineales invariantes con el tiempo. La función de transferencia de un sistema descrito mediante una ecuación diferencial lineal

e invariante con el tiempo se define como el cociente entre la transformada de Laplace de la salida (función de respuesta) y la transformada de Laplace de la entrada (función de excitación) bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero. El sistema lineal e invariante con el tiempo descrito mediante la siguiente ecuación diferencial:

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = b_0 x^{(m)} + b_1 x^{(m-1)} + \cdots + b_{m-1} \dot{x} + b_m x \quad n \geq m \quad (2.10)$$

en donde y es la salida del sistema y x es la entrada. La función de transferencia de este sistema se obtiene tomando la transformada de Laplace de ambos miembros de la ecuación 2.10, bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero, o bien,

$$\text{Funcion de transferencia} = \frac{\mathcal{L}[\text{salida}]}{\mathcal{L}[\text{entrada}]} = \frac{b_0 x^{(m)} + b_1 x^{(m-1)} + \cdots + b_{m-1} \dot{x} + b_m x}{a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y}$$

A partir del concepto de función de transferencia es posible representar la dinámica de un sistema mediante ecuaciones algebraicas en s . Si la potencia más alta de s en el denominador de la función de transferencia es igual a n , el sistema se denomina sistema de n -ésimo orden.

La aplicación del concepto de función de transferencia está limitada a los sistemas descritos mediante ecuaciones diferenciales lineales invariantes con el tiempo. Sin embargo, el enfoque de la función de transferencia se usa extensamente en el análisis y diseño de dichos sistemas. A continuación se presentan algunos comentarios importantes relacionados con la función de transferencia.

1. La función de transferencia de un sistema es un modelo matemático porque es un método operacional para expresar la ecuación diferencial que relaciona la variable de salida con la variable de entrada.
2. La función de transferencia es una propiedad de un sistema, independiente de la magnitud y naturaleza de la entrada o función de excitación.
3. La función de transferencia incluye las unidades necesarias para relacionar la entrada con la salida; sin embargo, no proporciona información acerca de la estructura física del sistema. (Las funciones de transferencia de muchos sistemas físicamente diferentes pueden ser idénticas.)
4. Si se conoce la función de transferencia de un sistema, se estudia la salida o respuesta para varias formas de entrada, con la intención de comprender la naturaleza del sistema.
5. Si se desconoce la función de transferencia de un sistema, puede establecerse experimentalmente introduciendo entradas conocidas y estudiando la salida del sistema. Una vez establecida una función de transferencia, proporciona una descripción completa de las características dinámicas del sistema, a diferencia de su descripción física.

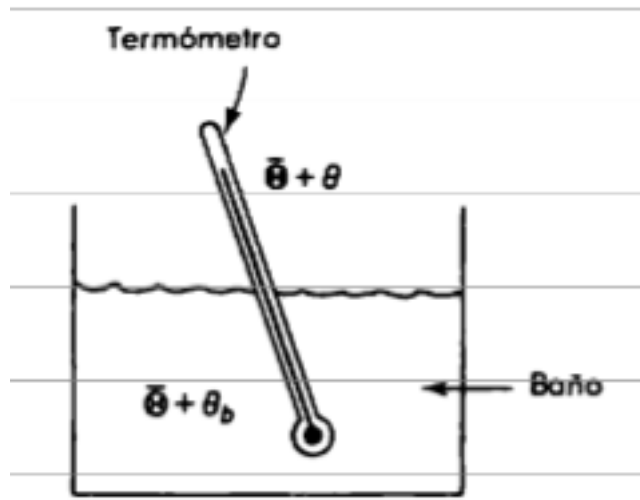


Figura 2.4: Sistema de termómetro de mercurio de pared delgada de vidrio.

Elaboración de un modelo matemático de un sistema térmico. Considere el termómetro de mercurio de la pared delgada de vidrio mostrado en la figura 2.4. Supongase que el termómetro está a una temperatura uniforme Θ K (temperatura ambiente) y que en $t = 0$ se le sumerge a un baño de temperatura $\Theta + \theta_b$ K, donde θ_b es la temperatura del baño (la cual puede ser constante o cambiante) medida sobre la temperatura Θ . Denotemos la temperatura instantánea del termómetro por $\Theta + \theta$ K de modo que θ sea el cambio en la temperatura del termómetro que satisfaga la condición $\theta(0) = 0$. Los sistemas térmicos como el presente se puede describir en términos de la resistencia y la capacitancia, sin embargo a diferencia de los sistemas mecánicos, eléctricos, hidráulicos y neumáticos, estos sistemas no tienen inercia e inercia. Caractericemos este sistemas en términos de resistencia térmica R que se opone al flujo de calor y la capacitancia C que almacena calor.

La resistencia R a la transferencia de calor por conducción o convección es el cambio en la diferencia de (K) necesario para causar un cambio unitario en la razón de flujo de calor (J/s), esto es⁴,

$$R = \frac{\text{Cambio en la diferencia de temperatura}}{\text{cambio en la razón de flujo de calor}} = \frac{K}{J/s}$$

La capacitancia térmica C se define como como el cambio en la cantidad de calor (J) necesario para hacer un cambio unitario en la temperatura (K) o

$$C = \frac{\text{cambio en cantidad de calor}}{\text{cambio en temperatura}} = \frac{J}{K}$$

Notese que la capacitancia térmica C se define es el producto del calor específico y la masa del material. El calor específico del material es la relación entre la cantidad de

⁴Adecuado de Ogata (2003)

calor requerida para elevar la temperatura de un kilogramo de material en un Kelvin y la cantidad requerida para elevar la de un kilogramo de agua un grado Kelvin.

Se puede obtener el modelo matemático de este sistema térmico considerando un balance térmico como sigue. El calor que entra al termómetro durante dt segundos es $q dt$, donde q es la razón de flujo de calor hacia el termómetro. Este calor se almacena en la capacitancia térmica C del termómetro, elevando de este modo su temperatura en $d\theta$. Así que la ecuación de balance es

$$C d\theta = q dt \quad (2.11)$$

Puesto que la resistencia térmica R puede escribirse

$$R = \frac{d(\Delta\theta)}{dq} = \frac{\Delta\theta}{q}$$

la razón de flujo de calor q puede darse, en términos de la resistencia R , como

$$q = \frac{(\Theta + \theta_b) - (\Theta + \theta)}{R} = \frac{\theta_b - \theta}{R}$$

donde $\Theta + \theta_b$ es la temperatura del baño y $\Theta + \theta$ es la temperatura del termómetro. En consecuencia, podemos rescribir la ecuación 2.11 como

$$C \frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta_b - \theta}{R}$$

o bien

$$RC \frac{d\theta}{dt} + \theta = \theta_b$$

2.3.4. Respuesta transitoria

Una alternativa a describir modelos por ecuaciones diferenciales es concentrarse directamente sobre la conducta de entrada-salida. La dinámica puede en principio expresarse mediante una gran tabla de señales de entrada y su correspondientes señales de salida. Este enfoque, que se llama respuesta transitoria, es quizá la forma más intuitiva de caracterizar dinámicas de procesos. Una propiedad de los sistemas lineales invariantes en el tiempo es que la tabla se puede describir por un par de señales.

Una vez obtenido tal modelo, existen varios métodos para el análisis del desempeño del sistema. En la práctica, la señal de entrada para un sistema de control no se conoce con anticipación, pero es de naturaleza aleatoria, y la entrada instantánea no puede expresarse en forma analítica. Sólo en algunos casos especiales se conoce con anticipación la señal de entrada y se puede expresar en forma analítica o mediante curvas; tal es el caso del control automático de herramientas de corte. En el análisis y diseño de sistemas de control, debemos tener una base de comparación del desempeño de diversos sistemas de control. Esta base se configura especificando las señales de entrada de prueba

particulares y comparando las respuestas de varios sistemas a estas señales de entrada. Muchos criterios de diseño se basan en tales señales o en la respuesta del sistema a los cambios en las condiciones iniciales (sin señales de prueba). El uso de señales de prueba se justifica porque existe una correlación entre las características de respuesta de un sistema para una señal de entrada de prueba común y la capacidad del sistema de manejar las señales de entrada reales.

Las señales de prueba que se usan regularmente son funciones escalón, rampa, parábola, impulso, senoidales, etc. Con estas señales de prueba, es posible realizar con facilidad análisis matemáticos y experimentales de sistemas de control, dado que las señales son funciones del tiempo muy simples.

La forma de la entrada a la que el sistema estará sujeto con mayor frecuencia bajo una operación normal determina cuál de las señales de entrada típicas se debe usar para analizar las características del sistema. Si las entradas para un sistema de control son funciones del tiempo que cambian en forma gradual, una función rampa sería una buena señal de prueba. Así mismo, si un sistema está sujeto a perturbaciones repentinas, una función escalón sería una buena señal de prueba; y para un sistema sujeto a entradas de choque, una función impulso sería la mejor. Una vez diseñado un sistema de control con base en las señales de prueba, por lo general el desempeño del sistema en respuesta a las entradas reales es satisfactorio. El uso de tales señales de prueba permite comparar el desempeño de todos los sistemas sobre la misma base.

La respuesta en el tiempo de un sistema de control consta de dos partes: la respuesta transitoria y la respuesta en estado estable. Por respuesta transitoria nos referimos a la que va del estado inicial al estado final. Por respuesta en estado estable, nos referimos a la manera en la cual se comporta la salida del sistema conforme t tiende a infinito.

Tomando como referencia el ejemplo anterior del termómetro de pared delgada (figura 2.4), supóngase que el termómetro está a la temperatura ambiente Θ K y que en $t = 0$ se le sumerge en un baño de agua a temperatura $\Theta + \theta_b$ K (θ_b es la diferencia entre la temperatura de baño y la temperatura ambiente). Nótese que el θ es el cambio de la temperatura del termómetro que satisface la condición $\theta(0) = 0$. Deseamos encontrar la respuesta $\theta(t)$ cuando la temperatura del baño sea constante o θ_b sea constante.

En el modelo matemático del presente sistema, RC es la constante de tiempo. Escribamos $RC = T$. Entonces el modelo matemático se puede escribir como

$$T \frac{d\theta}{dt} + \theta = \theta_b$$

aplicando la transformada Laplace

$$T[s\Theta(s) - \theta(0)] + \Theta(s) \tag{2.12}$$

Observando que $\theta(0) = 0$, esta última ecuación se simplifica a

$$\Theta(s) = \frac{1}{Ts + 1} \Theta_b(s)$$

Nótese que para $\theta_b = \text{constante}$, tenemos una función escalón del tipo

$$\Theta_b(s) = \frac{\Theta_b}{s}$$

por lo tanto la ecuación 2.12 se da por

$$\Theta(s) = \Theta(s) = \frac{1}{Ts + 1} \frac{\Theta_b}{s} = \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{s + (1/T)} \right] \theta_b \quad (2.13)$$

Aplicando la transformada Laplace nos queda

$$\theta(t) = (1 - e^{-t/T})\theta_b \quad (2.14)$$

La ecuación 2.14 plantea que la salida $c(t)$ es inicialmente cero y al final se vuelve unitaria. Una característica importante de tal curva de respuesta exponencial $c(t)$ es que, para $t = T$, el valor de $c(t)$ es 0.632, o que la respuesta $c(t)$ alcanzó 63.2 de su cambio total. Esto se aprecia con facilidad sustituyendo $t = T$ en $c(t)$. Es decir, $c(T) = 1 - e^{-1} = 0.632$. Observe que conforme más pequeña es la constante de tiempo T , más rápida es la respuesta del sistema. En la figura 2.5 se observa el modelo de primer orden en el dominio del tiempo a diferentes constantes de tiempo.

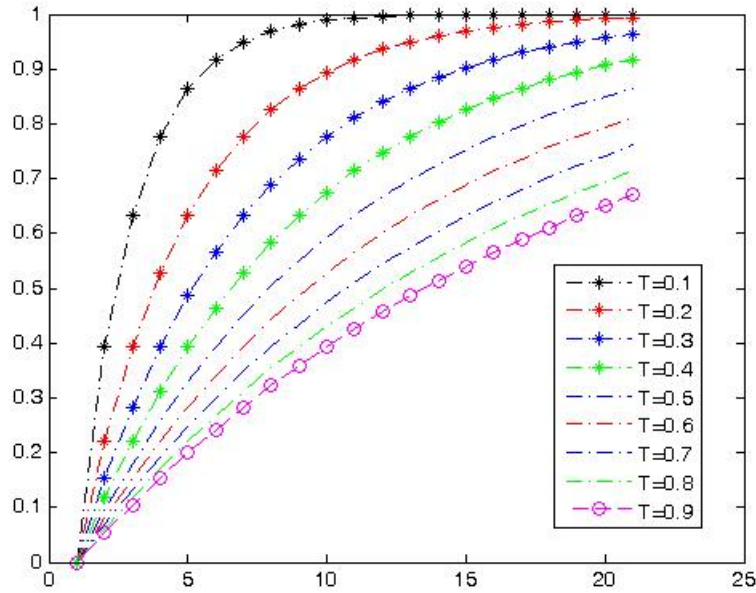


Figura 2.5: Modelo de primer orden para diferentes constantes de tiempo.

2.3.5. Respuesta en frecuencia

El primer paso en el análisis y diseño de un sistema de control es obtener un modelo matemático de la planta que se considera. La obtención analítica de un modelo resulta

ser bastante difícil. Puede lograrse mediante un análisis experimental. La importancia de los métodos de la respuesta en frecuencia es que la función de transferencia de la planta, o de cualquier otro componente del sistema, se determina mediante mediciones simples de la respuesta en frecuencia. Si se han medido la razón de amplitudes y el cambio de fase de un número suficiente de frecuencias dentro del rango de frecuencias que interesa, pueden graficarse en las trazas de Bode. Luego se determina la función de transferencia mediante aproximaciones asintóticas. Se construyen curvas asintóticas de magnitud logarítmica con varios segmentos. Con cierto manejo de prueba y error de las frecuencias de esquina, por lo general es posible encontrar un ajuste muy cercano para la curva (observe que si se gráfica la frecuencia en ciclos por segundo, y no en radianes por segundo, las frecuencias de esquina deben convertirse en radianes por segundo antes de calcular las constantes de tiempo.) Generadores de señales senoidales. Al desarrollar una prueba de la respuesta en frecuencia, debe contarse con generadores de señales senoidales. Es posible que la señal tenga que estar en forma mecánica, eléctrica o neumática. Los rangos de frecuencia necesarios para la prueba son, aproximadamente, 0.001 a 10 Hz para sistemas con constantes de tiempo grandes y 0.1 a 1000 Hz para sistemas con constantes de tiempo pequeñas. La señal senoidal debe estar razonablemente libre de armónicos o distorsión. Para rangos de frecuencias muy bajas (debajo de 0.01 Hz), tal vez se use un generador de señales mecánicas (junto con un transductor neumático o eléctrico conveniente, si es necesario). Para el rango de frecuencias de 0.01 a 1000 Hz, puede requerirse de un generador de señales eléctricas conveniente (junto con un transductor adecuado, si es necesario).

Determinación de las funciones de transferencia de fase mínima a partir de las trazas de Bode. Como se mencionó antes, es posible determinar a partir de las curvas de la respuesta en frecuencia si un sistema es de fase mínima examinando las características de alta frecuencia. Para determinar la función de transferencia, primero se dibujan asíntotas para la curva de magnitud logarítmica obtenida en forma experimental. Las asíntotas deben tener pendientes de múltiplos de 20 dB/década. Si la pendiente de la curva de magnitud logarítmica obtenida experimentalmente cambia de -20 a -40 dB/década en $\omega = \omega_1$, es evidente que existe un factor $1/[1 + j(\omega/\omega_1)]$ en la función de transferencia. Si la pendiente cambia -40 dB/década en $\omega = \omega_2$, debe haber un factor cuadrático de la forma

$$\frac{1}{1 + 2\zeta \left(j \frac{\omega}{\omega_2}\right) + \left(j \frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}$$

La frecuencia natural no amortiguada de este factor cuadrático es igual a la frecuencia de esquina ω_2 . El factor de amortiguamiento relativo ζ se determina a partir de la curva de magnitud logarítmica obtenida en forma experimental de la medida de la cantidad del pico de resonancia cerca de la frecuencia de esquina ω_2 y la comparación de esto con las curvas asintóticas. Una vez determinados los factores de la función de transferencia $G(j\omega)$, la ganancia se establece a partir de la parte de la curva de la magnitud logarítmica con baja frecuencia. Dado que términos como $1 + j(\omega/\omega_1)$ y $1 + 25(j\omega/\omega_2) + (1/\omega_2)^2$ se vuelven unitarios conforme ω tiende a cero.

Funciones de transferencia de fase no mínima. Si en el extremo de alta frecuencia, el atraso de fase calculado es 180° menor que el atraso de fase obtenido en forma experimental, uno de los ceros de la función de transferencia debe encontrarse en el semiplano derecho del plano, y no en el semiplano izquierdo del plano. Si el atraso de fase calculado difiere del atraso de fase obtenido de manera experimental por una velocidad constante de cambio de fase, hay un retardo de transporte presente, o tiempo muerto.

Algunos comentarios sobre la determinación experimental de las funciones de transferencia

1. Por lo general es más fácil obtener mediciones precisas de la amplitud que del corrimiento de fase. Las mediciones del corrimiento de fase pueden implicar errores debidos a la instrumentación o a la interpretación errónea de los registros experimentales.

2. La respuesta en frecuencia del equipo de medición usado para medir la salida del sistema debe tener una curva de magnitud contra frecuencia casi plana. Además, el ángulo de fase debe ser casi proporcional a la frecuencia.

3. Los sistemas físicos tienen varios tipos de no linealidades. Por tanto, es necesario considerar con cuidado la amplitud de las señales senoidales de entrada. Si la amplitud de la señal de entrada es demasiado grande, el sistema se saturará y la prueba de la respuesta en frecuencia producirá resultados imprecisos. En cambio, una señal pequeña provocará errores debidos a la zona muerta. Por tanto, debe hacerse una cuidadosa elección de la amplitud de la señal senoidal de entrada. Es necesario muestrear la forma de la onda de la salida del sistema para asegurarse que sea senoidal y de que el sistema opere en su región lineal durante el periodo de prueba. (La forma de la onda de la salida del sistema no es senoidal cuando el sistema opera en su región no lineal.)

4. Si el sistema que se considera opera en forma continua durante días y semanas, no es necesario detener la operación normal para las pruebas de la respuesta en frecuencia. La señal de prueba senoidal se superpone a las entradas normales. Después, para los sistemas lineales, la salida provocada por la señal de prueba se superpone a la salida normal. Para la determinación de la función de transferencia, conforme el sistema está en operación normal, también es común el uso de señales estocásticas (señales de ruido blanco). Mediante las funciones de correlación se determina la función de transferencia del sistema sin interrumpir la operación normal.

El primer paso para determinar la función de transferencia es aproximar la curva de magnitud logarítmica mediante asíntotas con pendientes de 20 dB/década y múltiplos de la misma, como se aprecia en la figura 2.6. Después, se estiman las frecuencias de esquina. Para el sistema de la figura 2.6, se estima la siguiente forma de la función de transferencia:

$$g(jw) = \frac{K(1 + 0.5jw)}{jw(1 + jw) \left[1 + 2\zeta \left(j\frac{w}{w_2} \right) + \left(j\frac{w}{w_2} \right)^2 \right]}$$

El valor del factor de amortiguamiento relativo ζ se estima examinando el pico de resonancia cerca de $w = 6 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$, se determina que ζ sea 0.5. La ganancia K es

numéricamente igual a la frecuencia de la intersección de la extensión de la asintota de baja frecuencia con la línea 0 dB. Por tanto, el valor de K resulta ser 10. Así, $G(jw)$ se determina tentativamente como

$$g(jw) = \frac{10(1 + 0.5jw)}{jw(1 + jw) \left[1 + 2\zeta \left(j \frac{w}{w_2} \right) + \left(j \frac{w}{w_2} \right)^2 \right]}$$

o bien

$$g(jw) = \frac{320(s + 2)}{s(s + 1)(s^2 + 8s + 64)}$$

Esta función de transferencia es tentativa porque todavía no hemos examinado la curva del ángulo de fase. Una vez que se señalan las frecuencias de esquina en la curva de magnitud logarítmica, es fácil dibujar la curva del ángulo de fase correspondiente para todos los factores que componen la función de transferencia. La suma de estas curvas componentes del ángulo de fase es la suma de la función de transferencia supuesta. La curva del ángulo de fase para $G(jw)$ se representa mediante $\angle G$. Ahí se observa claramente una discrepancia entre la curva del ángulo de fase calculada y la curva del ángulo de fase obtenida en forma experimental. La diferencia entre las dos curvas para frecuencias muy altas parece ser una razón de cambio constante. Por tanto, la discrepancia en las curvas del ángulo de fase debe ser provocada por un retardo de transporte. De esta manera, suponemos que la función de transferencia completa es $G(s)e^{-ts}$. Dado que la discrepancia entre el ángulo de fase calculado y el experimental es de -0.2 rad para frecuencias muy altas, determinamos el valor de $T = 2 \text{ seg}$ del modo siguiente

Por tanto, puede determinarse la presencia de un retardo de transporte, y la función de transferencia completa obtenida de las curvas experimentales es

$$g(jw) = \frac{320(s + 2)e^{-0.2s}}{s(s + 1)(s^2 + 8s + 64)}.$$

2.3.6. Respuesta en tiempo discreto

Otra forma de analizar y modelar la dinámica de un sistema es en tiempo discreto, y una herramienta muy utilizada en este dominio es la transformada z . El papel de la transformada z en sistemas de tiempo discreto es similar al de la transformada Laplace en sistemas de tiempo continuo.

En sistemas de control en tiempo discreto, una ecuación en diferencias lineal caracteriza la dinámica del sistema. Para determinar la respuesta del sistema a una determinada entrada dada, se debe resolver dicha ecuación en diferencias. Con el método de la transformada z , la solución de ecuaciones en diferencias se convierte en un problema de naturaleza algebraica.

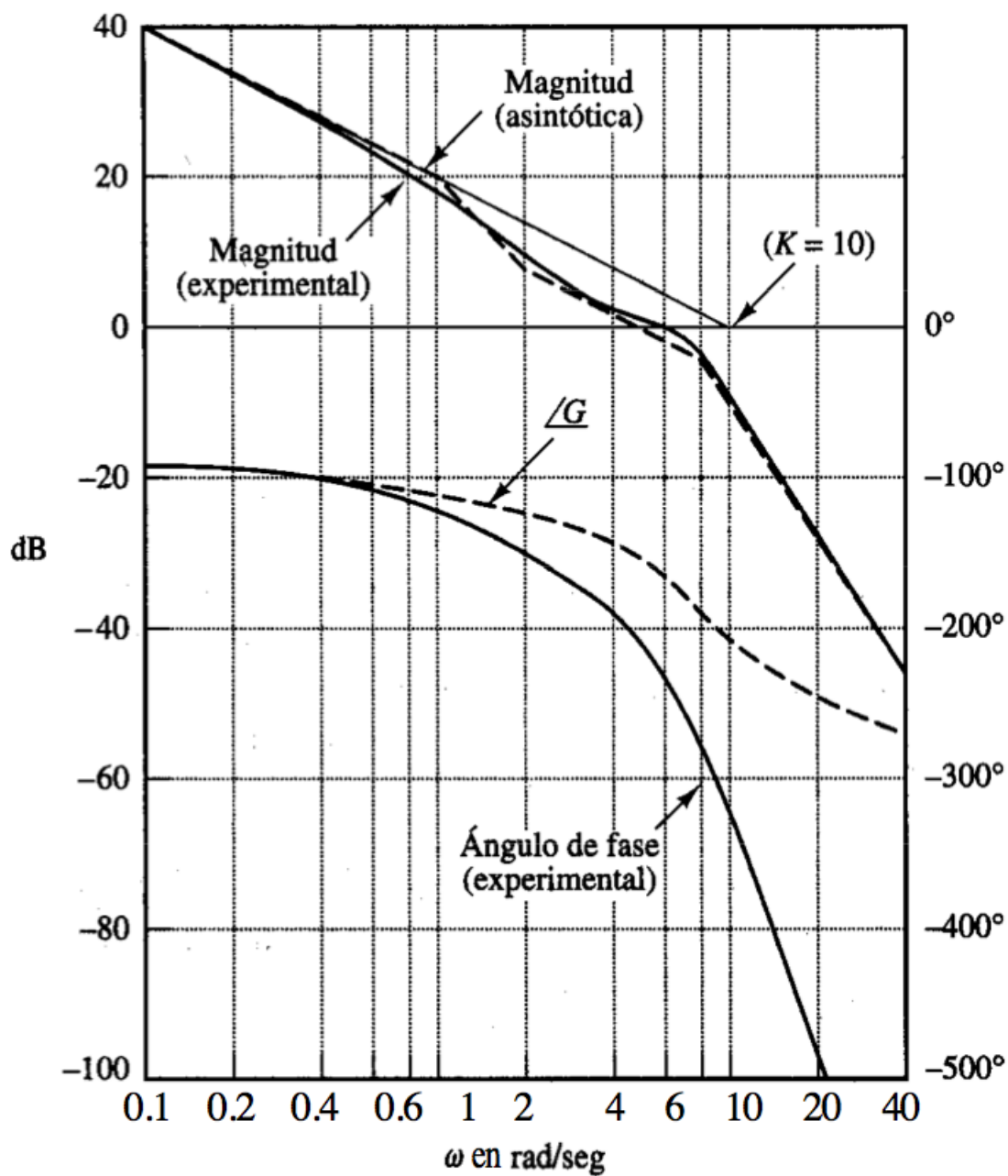


Figura 2.6: Trazas de Bode de un sistema. (Las curvas sólidas se obtuvieron experimentalmente).

2.3.6.1. Transformada z

El método de la transformada de z es un método muy poderoso cuando se trabaja con sistemas en tiempo discreto de una secuencia de números. Al considerar la transformada z de una función del tiempo $x(t)$, solo se toman en cuenta los valores muestreados en $x(t)$, esto es, $x(0)$, $x(T)$, $x(2T)$,, Donde T es el periodo de muestreo, se define mediante la siguiente ecuación

$$X(z) = Z[x(t)] = Z[x(kT)] = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT)z^{-k} \quad (2.15)$$

Para una secuencia de número se define como

$$X(z) = Z[x(k)] = \sum_{k=0}^{\infty} x(k)z^{-k} \quad (2.16)$$

La transformada z definida por las ecuaciones 2.15 o 2.16 se conoce como transformada z unilateral.

El símbolo Z denota la transformada “z” de. En la transformada z unilateral se supone que $x(t) = 0$ para $t < 0$ o que $x(k) = 0$ para $k < 0$. Observe que “z” es una variable compleja.

Observe que cuando se trata de de una secuencia de tiempo $x(t)$ que se obtuvo mediante el muestreo de una señal $x(t)$, la transformada z $X(z)$ involucra de manera explícita a T . Sin embargo, para una secuencia de tiempo $x(k)$, la transformada z de $x(t)$, donde $-\infty < t < \infty$, o de $x(k)$, donde k adopta valores enteros enteros ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), se define como

$$X(z) = Z[x(t)] = Z[x(kT)] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(kT)z^{-k} \quad (2.17)$$

$$X(z) = Z[x(k)] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)z^{-k} \quad (2.18)$$

En las ecuaciones 2.17 y 2.18 se le llama transformada z bilateral.

Para la mayoría de las aplicaciones de la ingeniería, la transformada z unilateral tendrá una solución apropiada de forma cerrada en su región de convergencia. Observe que cuando $X(z)$, una serie infinita en z^{-1} , converge fuera del círculo $|z| = R$, donde el R se conoce como el radio de la convergencia absoluta. Al utilizar el método de la transformada z para resolver problemas en tiempo discreto no es necesario especificar los valores de z para los cuales x converge.

Observe que la expansión del segundo miembro de la ecuación 2.15 da como resultado

$$X(z) = x(0) + x(T)z^{-1} + x(2T)z^{-2} + \dots + x(kT)z^{-k} + \dots \quad (2.19)$$

La ecuación 2.19 implica que la transformada z de cualquier función en tiempo continuo $x(t)$ se puede escribir, mediante inspección, en la forma de una serie. La z^{-k} en esta serie indica la posición en el tiempo que se presenta la amplitud $x(kt)$. De manera contraria si $X(z)$ esta dada en la forma de una serie como la que se indico, la transformada z inversa se puede obtener por inspección como una secuencia de la función $x(kt)$ que corresponde a los valores de $x(t)$ en los valores de tiempo respectivos.

A continuación se presenta un ejemplo de la transformada z .

Función rampa unitaria. Considere la función rampa unitaria.

$$x(t) = \begin{cases} t & 0 \leq t \\ 0 & t < 0 \end{cases} . \quad (2.20)$$

Observe que

$$x(kt) = kt, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Las magnitudes de los valores muestreados son proporcionales al periodo T . La transformada z de la función unitaria se puede escribir como

$$\begin{aligned} X(z) = Z[t] &= \sum_{k=0}^{\infty} x(kT)z^{-k} = \sum_{k=0}^{\infty} kTz^{-k} = T \sum_{k=0}^{\infty} kz^{-k} \\ &= T(z^{-1} + 2z^{-2} + 3z^{-3} + \dots) \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$= T \left(\frac{z^{-1}}{(1 - z^{-1})^2} \right) \quad (2.22)$$

$$= T \left(\frac{Tz}{(z - 1)^2} \right) \quad (2.23)$$

De la misma forma como se trabaja con la transformada de Laplace, una tabla de transformadas z de las funciones comúnmente encontradas es muy útil en la resolución de problemas en el campo de los sistemas en tiempo discreto. La tabla es de ese tipo.

En la tabla puede observarse que partir del dominio del tiempo puede trasladarse al de la frecuencia s y al dominio discreto z , por lo cual si el sistema tiene una estructura del tipo de algunas de las tablas podría trasladarse de un dominio a otro, tal es el ejemplo de la función escalón, la cual según la tabla se puede escribir en el dominio de la frecuencia como:

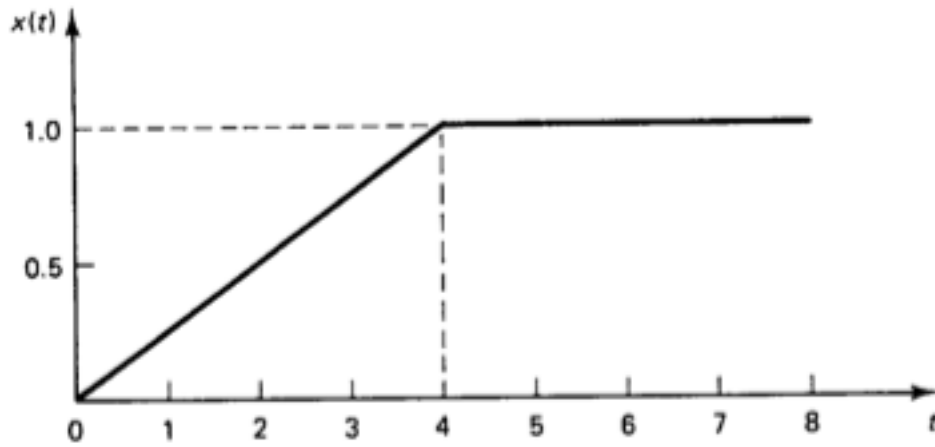
$$X(s) = \frac{1}{s^2}$$

El objetivo es obtener un modelo el sistema mediante información adquirida experimentalmente, para ello podemos utilizar una ecuación en diferencias.

De acuerdo a la información de la tabla 2.2 y graficada en la figura 2.7, con un periodo de muestreo de $T = 1$.

t	$x(t)$
0	0
1	0.25
2	0.50
3	0.75
4	1
5,6,...	1

Tabla 2.2: Información experimental

Figura 2.7: Curva $x(t)$.

Entonces la transformada z de $x(k)$ se puede dar mediante:

$$\begin{aligned}
 X(z) &= \sum_{k=0}^{\infty} x(kT)z^{-k} \\
 &= 0.25z^{-1} + 0.50z^{-2} + 0.75z^{-3} + z^{-4} + z^{-5} + z^{-6} + \dots \\
 &= 0.25(z^{-1} + 2z^{-2} + 3z^{-3}) + z^{-4} \frac{1}{1 - z^{-1}} \\
 &= \frac{z^{-1} + 2z^{-2} + 3z^{-3}}{4(1 - z^{-1})} \\
 &= \frac{1}{4} \frac{z^{-1}(1 + z^{-1} + z^{-2} + z^{-3})}{(1 - z^{-1})^2} \\
 &= \frac{1}{4} \frac{z^{-1}(1 - z^{-4})}{(1 - z^{-1})^2}
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

2.4. 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.

2.4.1. 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 Furier 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.

2.4.2. 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.

2.4.3. 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 2.8), 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.

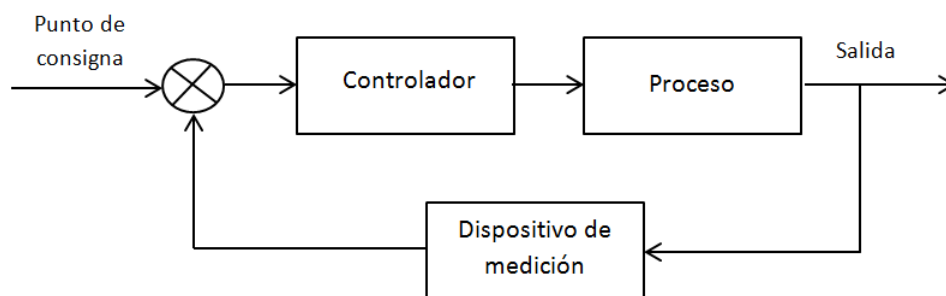


Figura 2.8: Diagrama a bloques de un sistema a lazo cerrado.

2.4.4. 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 2.9). 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.

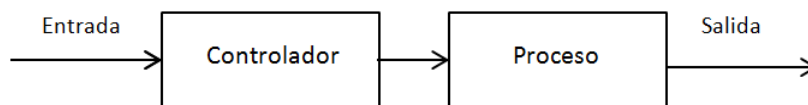


Figura 2.9: Diagrama a bloques de un sistema a lazo abierto.

2.4.5. 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.⁵

2.4.6. Algoritmos de control clásico

2.4.6.1. Control Todo o Nada

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

$$u = \begin{cases} u_{max}, & \text{si } e > 0 \\ u_{min}, & \text{si } e < 0 \end{cases}, \quad (2.25)$$

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 2.25 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 2.10).⁶

2.4.6.2. 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

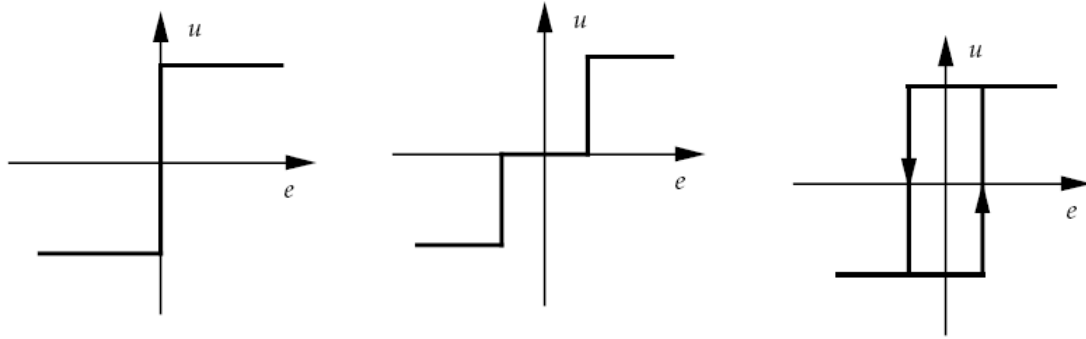
⁵Definiciones adoptadas de Ogata (2003) y Rohrs et al. (1994).

⁶Los algoritmos de control clásico se obtuvieron de Åström & Hägglund (2009).

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.



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

Figura 2.10: Características del controlador Todo-Nada.

2.4.6.3. 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

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

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

2.4.6.4. 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 2.11. 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.

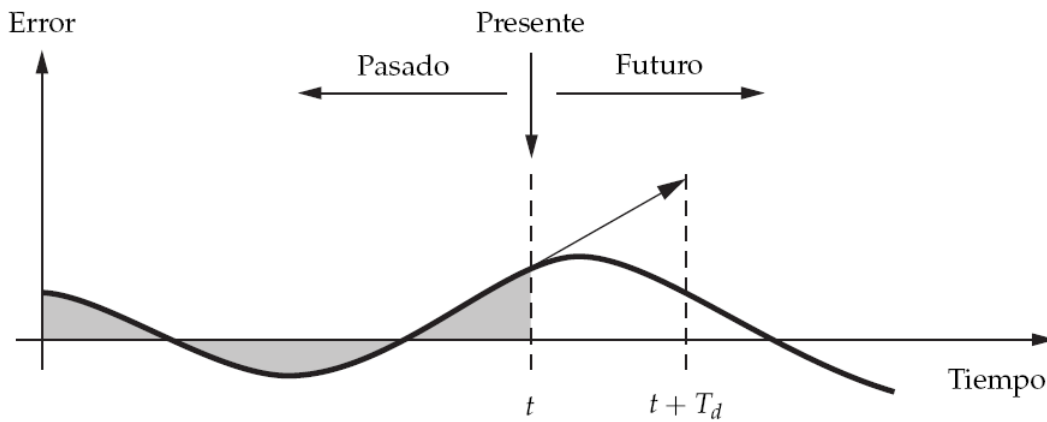


Figura 2.11: Acción de control PID basándose en los errores de control pasados, presentes y futuros.

2.5. Consideraciones para la instrumentación

2.5.1. 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.

2.5.1.1. Sistemas de medición

En general los sistemas de medición están conformados por tres elementos como se muestra en la figura 2.12.

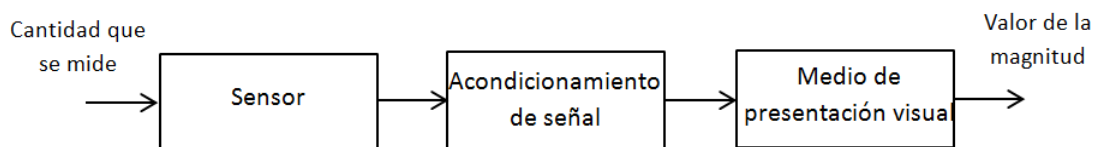


Figura 2.12: Sistema de medición y elementos que lo conforman.

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.

2.5.1.2. 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 principales⁷:

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

2.5.2. 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

⁷Definiciones en esta sección por Pérez (1991); Bolton (1996); Acevedo (2006); Helfrick & Cooper (1991); Mendiburu (1997)

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.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}. \quad (2.26)$$

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.

2.5.3. 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 visual⁸.

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).

⁸Definiciones en esta sección por Pérez (1991); Bolton (1996, 2001); Helfrick & Cooper (1991); Acevedo (2006)

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?
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?

2.5.3.1. 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 utilizados son el platino y níquel. La resistencia está dada por la siguiente ecuación:

$$R = R_0 (1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \dots + \alpha_n T^n), \quad (2.27)$$

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 2.3 se ilustran las características de los 3 elementos más utilizados.

Tabla 2.3: 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 2.27 también puede expresarse de la siguiente manera:

$$R = R_0(1 + \alpha T), \quad (2.28)$$

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:

$$R_t = Ke^{\beta/t},$$

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, 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°C , cumpliendo el grado razonable la siguiente relación:

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

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

2.5.4. 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.

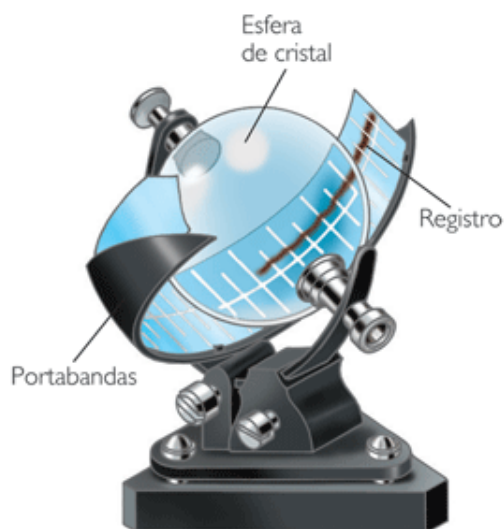


Figura 2.13: Heliógrafo común.

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 (2.14). El mostrado en la figura 2.15a, usa una termo-pila para censar la radiación solar. El mostrado en la figura 2.15b usa como sensor a una celda solar de silicio cristalino.



Figura 2.14: Piranómetro con aro de sombra.

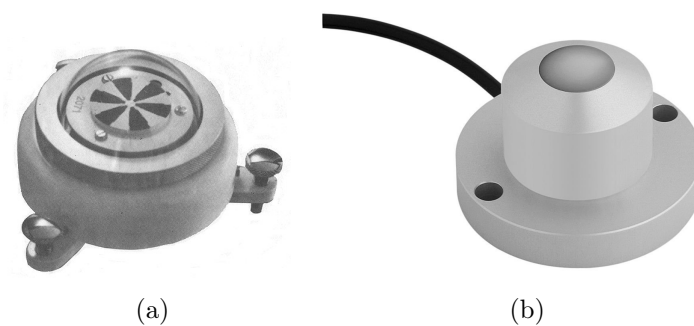


Figura 2.15: Piranómetro de uso común.

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 2.16b.

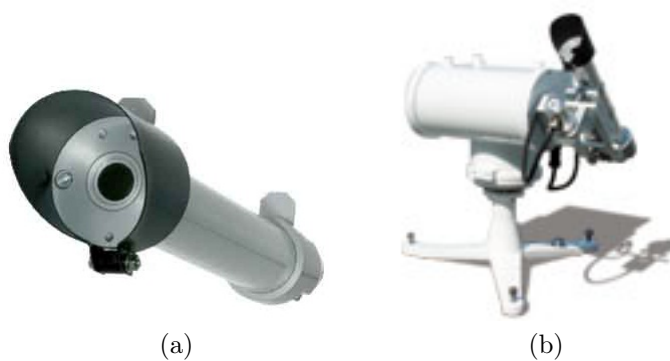


Figura 2.16: Pirheliómetro de uso común.

Capítulo 3

Descripción y estudio teórico del sistema propuesto

En esta sección se muestra la descripción física y operativa de los principales componentes del sistema de climatización, algoritmos de automatización y lazos de control propuestos, además de un análisis teórico basado en una simulación en el software ASPEN PLUS para evaluar la unidad de absorción a detalle, y con ello obtener información en algunos puntos del ciclo como lo son temperaturas, concentraciones, flujos masicos, entre otros, que apoyen a efectuar el estudio experimental.

3.1. Descripción del sistema y estrategia de control

El sistema de aire acondicionado se compone de una unidad de enfriamiento con un ciclo por absorción y un circuito hidráulico, que se interconectan entre si, para transportar el efecto frigorífico producido por la unidad de enfriamiento hasta el espacio a climatizar. El equipo de absorción convencional se activa a fuego directo, sin embargo se realizó el estudio para acoplar un campo de colectores solares, con la premisa de operar el equipo con energía solar y como auxiliar el fuego directo. La disponibilidad del recuso solar y su intermitencia es un factor importante a considerar cuando se trabaja con ella, debido a esto se propone una configuración hidráulica y aire que permite operar el sistema de aire acondicionado solar en diferentes modos de operación. Aunado a lo anterior, se modifica el generador de la unidad de absorción, para acoplar físicamente el campo de colectores y el quemador de fuego directo, sin que se afecten entre si cuando operen por separado o al mismo tiempo. La incorporación de nuevos componentes y configuraciones, exigen una nueva forma de operación y un sistema de control, que permita hacerlo de una forma segura, continua y ahorrando energía.

El sistema de aire acondicionado solar de la figura 3.1 se compone de un campo de colectores solares y su configuración hidráulica que transforma la radiación solar en energía térmica, que por medio de un separador centrífugo es posible que se aproveche por la unidad de enfriamiento, el circuito hidráulico y aire con almacenamiento de frío,

permite que el sistema de aire acondicionado pueda operar en diferentes modos de operación.

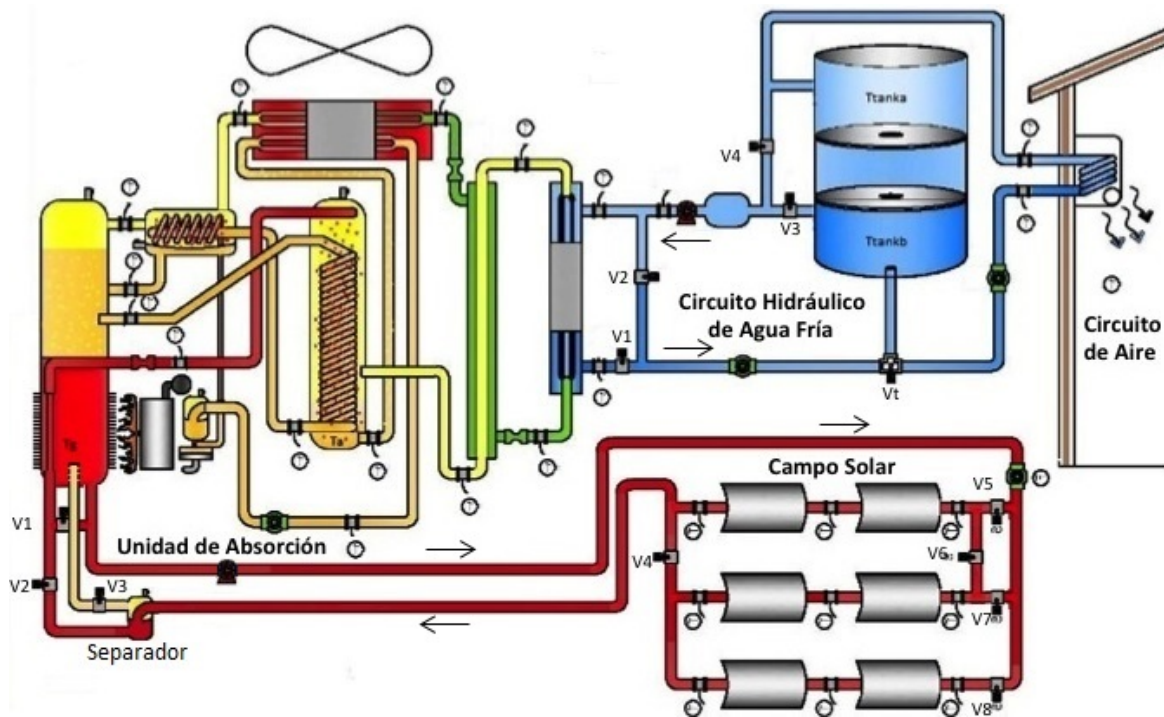


Figura 3.1: Configuración propuesta para el circuito hidráulico de agua fría.

3.1.1. 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, cada colector contiene 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 chumaceras en los extremos permite un giro de Norte-Sur .

Los concentradores se encuentran unidos en pares por el mecanismo de seguimiento mostrado en la figura 3.2, este 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.

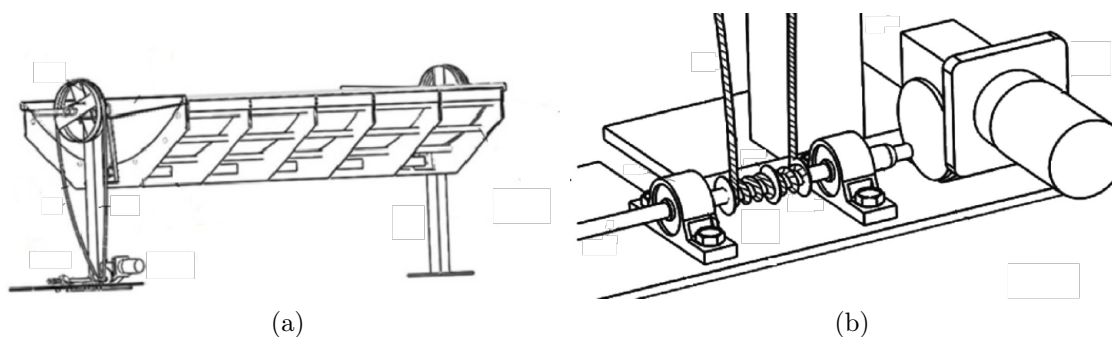


Figura 3.2: Estructura y mecanismo de campo de colectores.

3.1.1.1. Las necesidades de control y propuesta de solución

Las necesidades de control y propuesta de solución se detallan en los siguientes puntos:

1. Sistema de seguimiento solar en uno y dos ejes, con almenos una exactitud $< 1^\circ$, implementado en un dispositivo electrónico empotrado que permita la comunicación con una interfaz de usuario centralizada o algún otro equipo de computo, para enfocar y desenfocar los colectores remotamente (enfoque o desenfoque gradual).
2. Control de temperatura y energía térmica suministrada en el generador. En el primer lazo se regula la velocidad de la bomba de circulación para aumentar o disminuir el tiempo de residencia de la solución en el colector solar, traduciendo en mayor o menor intercambio de calor, con ello es posible controlar la temperatura de generación de vapor (punto de consigna). En el segundo lazo se controla la cantidad de energía suministrada por el campo de colectores, estos tienen un comportamiento gauseano de la cantidad de energía que captan con respecto al enfoque, para ello el sistema de seguimiento desenfoca o enfoca los colectores según la energía térmica demandada. Aunado a los lazos de control descritos, se suman eventos discretos que intervienen en la operación para aprovechar al máximo la radiación solar, a continuación se describen los posibles casos y la operación:
 - a) Alta incidencia de recurso solar: con una buena disponibilidad de recurso solar (mayor a 400 w/m^2) se puede satisfacer la temperatura y cantidad de energía necesaria para operar el sistema de climatización a su mayor capacidad, sin embargo, la captación de energía puede superar a la demanda ya sea por un fenómeno climatológico y se excedan el nivel nominal de radiación solar o debido a que la demanda este por debajo de la nominal. Cuando el lazo de control de temperatura llega a su punto de saturación mínimo y no puede disminuir la temperatura, el campo de colectores cambia

su configuración hidráulica por medio de las válvulas solenoides mostradas en la figura 3.1 y la tabla de verdad (ver tabla 3.1) “SolarParalelo”, que permite obtener la misma cantidad de energía a menor temperatura. Si la temperatura aun no puede disminuir el segundo lazo comienza a desenfocar proporcionalmente el campo solar, para modificar la captación de energía, que consecuentemente se traducirá en la temperatura de generación de vapor.

- b) Media incidencia de recurso solar: en este punto el lazo de control de temperatura opera para alcanzar el punto de temperatura establecida, si este no puede ser alcanzado debido a que se capta poca radiación para elevar la temperatura, el circuito hidráulico entra en modo “SolarSerie” según la configuración de la tabla 3.1 para acomodar los colectores en serie, permitiendo que el primer lazo pueda llegar al objetivo, el lazo número dos mantiene seguimiento con el mínimo error posible.
- c) Baja o nula incidencia de recurso solar: cuando la radiación solar este por debajo de la referencia de 400 w/m^2 , se verifica si hay demanda de energía térmica, si lo hay el sistema entra en modo “Fuego”, en el cual se apaga la bomba del circuito solar y se enciende la válvula “V1” para realizar un baipás en el circuito solar, esto permite a la máquina de absorción operar a fuego directo, sin verse afectada por el circuito solar. Cuando no se requiere energía térmica, el circuito solar se apaga por completo.

Tabla 3.1: Tabla de verdad de las válvulas solenoides del campo solar.

Modo	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
Apagado	0	0	0	0	0	0	0	0
Fuego	1	0	0	0	0	0	0	0
SolarSerie	1	1	1	0	0	1	0	1
SolaParalelo	0	1	1	1	1	0	1	1

- 3. Los lazos de seguridad generalmente son interruptores o controles todo o nada, en este caso se considera un interruptores de presión, flujo, temperatura y radiación, cualquier actuación se lanza una alarma en la interfaz de usuario, además se incluyen válvulas mecánicas de alivio de presión.

3.1.1.2. Algoritmo de automatización y control

En la figura 3.3 se ilustra el algoritmo de automatización y control que cumple con los requerimientos antes mencionados. El algoritmo esta formado por tres principales bloques, el primero de ellos es la etapa de verificación de rutina e inicialización, el cual inicia preguntando si la bandera de encendido esta activada, el segundo paso es verificar si algún sensor se encuentra fuera de los rangos físicamente permitidos, si es así, el sistema se bloquea y envía un mensaje de error con el nombre del sensor defectuoso y una posible causa o corrección, además se redirecciona a la sección de apagado, donde

los colectores se desactivan llevándolos a desenfoque o posición de reposo, se desenergiza la bomba de circulación y la realineación de válvulas en modo “Apagado”. En el segundo bloque llamado verificación y secuencia de operación, inicia verificando las siguientes alarmas de operación:

1. Ausencia de flujo, el el flujo en el sistema es importante, ya que alguna fuga puede ser la responsable de operar a la bomba de circulación en seco, además la ausencia de flujo afecta para que la máquina de absorción funcione adecuadamente.
2. Sobrepaso de temperatura, es importante que el equipo no sobrepase los $220^{\circ}C$, ya que indica una anomalía en el funcionamiento del equipo, como obstrucción o falla de la ventilación en el condensador.
3. Presión elevada, si la presión sobrepasa los 22 Bar , indica una temperatura excesiva por estancamiento o bloqueo en algunas de las tuberías del circuito hidráulico.

Si el sistema detecta cualquiera de las alarmas mencionadas, se envía el equipo a secuencia de apagado con bloqueo, esperando a ser desbloqueada manualmente por el usuario, de lo contrario si el proceso se ejecuto correctamente, se efectúa la acción de los lazos control de capacidad y temperatura mencionados anteriormente. El algoritmo llega al fin operacional, por lo que vuelve a realizar la verificación de rutina y secuencia de operación.

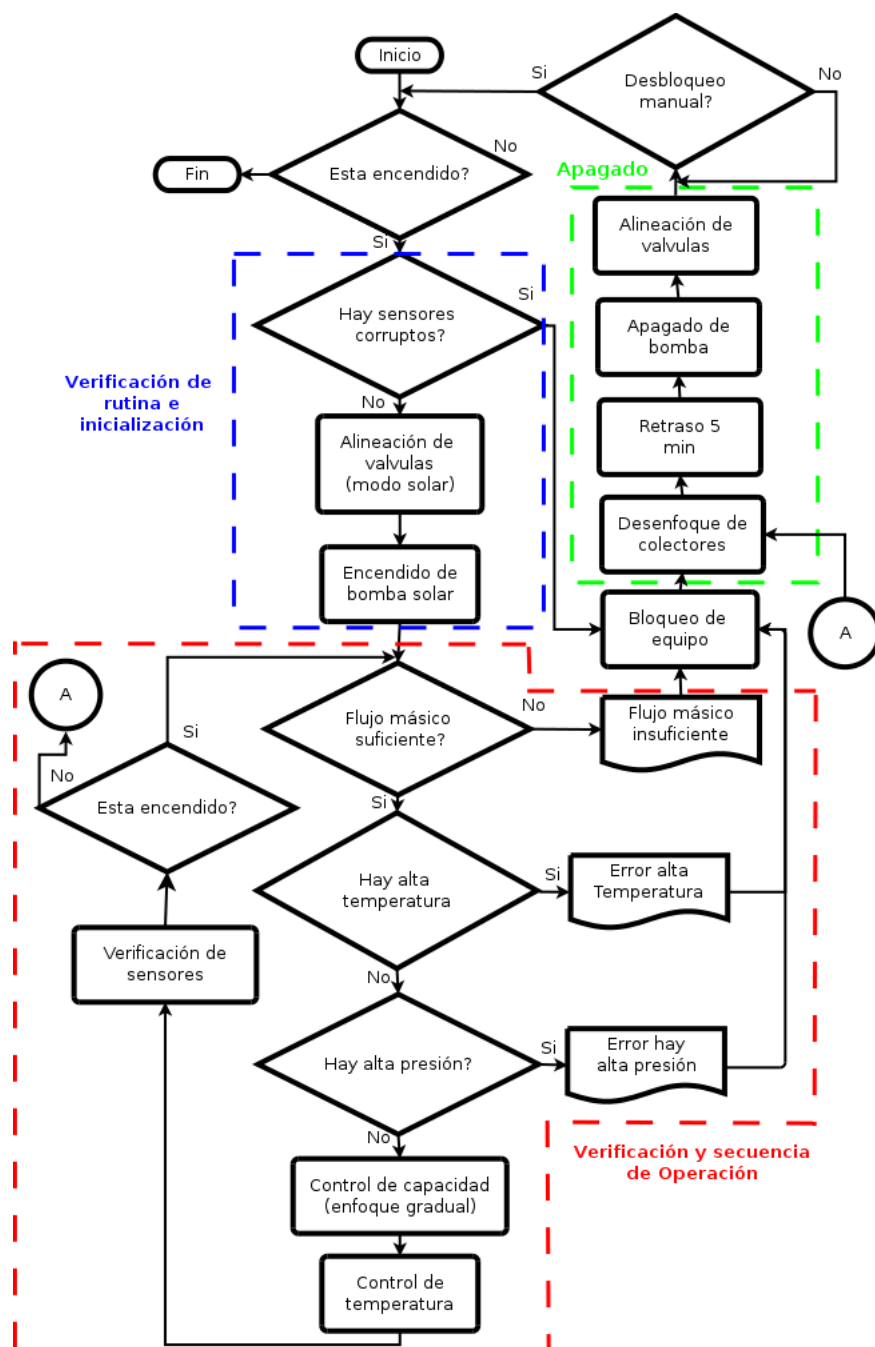


Figura 3.3: Algoritmo de automatización y control del campo de colectores.

3.1.2. Unidad de enfriamiento por absorción

La instalación del sistema de climatización dispone de un máquina de enfriamiento 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 básicamente 5 toneladas, con una

mezcla de trabajo de 13.42 *kg* de agua y 5.45 *kg* de amoníaco. El equipo de absorción opera con una fuente de energía térmica a fuego directo proporcionada por un quemador de gas natural de 26 *kW*.

Tabla 3.2: Información técnica del equipo ACF60-00 HT.

Clasificación de operación	Unidades	Magnitud
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

La energía eléctrica requerida por la bomba de solución y la bomba de agua fría es de 510 *W*. El ventilador del absorbedor condensador refrigerado por aire es de 520 *W* flujo de aire del ventilador de 10 200 a 8 000 *m*³/*h*. El flujo de agua refrigerada es de 2 200 *l/h* y puede llegar hasta 3000.

3.1.2.1. Lazos de control

El equipo de climatización debido a su complejidad y modificación para trabajar con energía solar, demanda lazos de control convencionales y adicionales, para operar de forma segura y en las mejores condiciones de operación. A continuación se detallan las necesidades de control:

1. El control de capacidad de enfriamiento de la unidad de absorción es el lazo principal y fundamental, ya que es el que regula la temperatura del agua refrigerada (temperatura de salida del evaporador). En este lazo se considera como punto de consigna la temperatura del agua refrigerada para calcular la cantidad de energía requerida en el generador, la cual se envía al controlador del campo de colectores para desenfocar proporcionalmente los colectores y con ello obtener menor energía. En el caso de utilizar el módulo de fuego directo, se apaga la unidad cuando se esta por debajo de la temperatura de referencia, de lo contrario seguirá encendida hasta cumplir la consigna.
2. El control de flujo en el circuito solución, se propone para ajustar la unidad de absorción ante variaciones del calor agregado en el generador. En este lazo abierto se toma como punto de consigna el flujo de la bomba de solución, que se calcula a partir de la entrada de energía agregada.
3. El control del flujo de aire en el condensador ayuda enfriamiento excesivo del absorbedor-condensador lo que previene el riesgo de store out, esto evita el

riesgo de un envío de solución repentina del generador hacia el absorbedor. El lazo abierto controla dos velocidades del abanico dependiendo de la temperatura ambiente, para $t_{amb} \leq 35$ baja velocidad y para $t_{amb} > 35$ alta

4. Los lazos de seguridad se componen de un fluostato para el control de la circulación del agua refrigerada y con ello evitar un congelamiento por estancamiento, en el supuesto de que la bomba de circulación no funcione correctamente. Un termostato limitador de temperatura en el generador se utiliza para evitar un incremento de presión al permitido. La bomba del circuito solución incluye sensor de encendido que permite realimentar al sistema de control de cuando se encuentra en funcionamiento. El equipo es encendido a base de gases de combustión y es de suma importancia atender su evacuación, para ello se considera un presostato que verificar el correcto funcionamiento del abanico, además de un detector de flama y un termostato para la temperatura de los humos. En caso de activarse alguno de ellos el sistema levanta una alarma.
5. Funciones o herramientas como autodiagnóstico, adquisición de datos, monitoreo e interfaz de usuario.

3.1.2.2. Algoritmo de automatización del módulo de encendido de fuego directo

La unidad de enfriamiento es capaz de operar con energía solar y fuego directo, el algoritmo de operación de la unidad de absorción incluye secciones del algoritmo de operación del campo de colectores y fuego directo. El algoritmo de encendido del módulo de fuego directo se ilustra en la figura 3.4, el cual se divide en tres secciones, la primera de ellas llamada secuencia de encendido. Al iniciar se energiza el ventilador de combustión y se mantiene así por 30 segundos, esto ayuda a purgar una posible acumulación de gas, después de la purga se energiza la válvula de gas y el módulo de chispa por 5 segundos o hasta que se detecte flama, si hay ausencia de flujo de aire o flama, se desenergiza la válvula de gas e incrementa el contador de intentos de encendido para retornar al inicio del algoritmo, si el error se produce por tercera ocasión, se bloquea su operación e indica la falla. En caso de ejecutar satisfactoriamente la secuencia de encendido, se continua con la fase de verificación de operación, donde se espera la señal de apagado o algún fallo por las siguientes alarmas:

1. Insuficiencia de aire, posible falla en la alimentación del abanico u obstrucción en la succión o emisión de aire.
2. Error en detección de flama, este caso se puede presentar por falla en la alimentación en la electroválvula, o en su defecto la alimentación de gas se encuentra deficiente.

En el caso de apagado el sistema desenergiza los equipos y finaliza el algoritmo, en el caso de una alarma se incrementa el contador de intentos y se retorna al inicio.

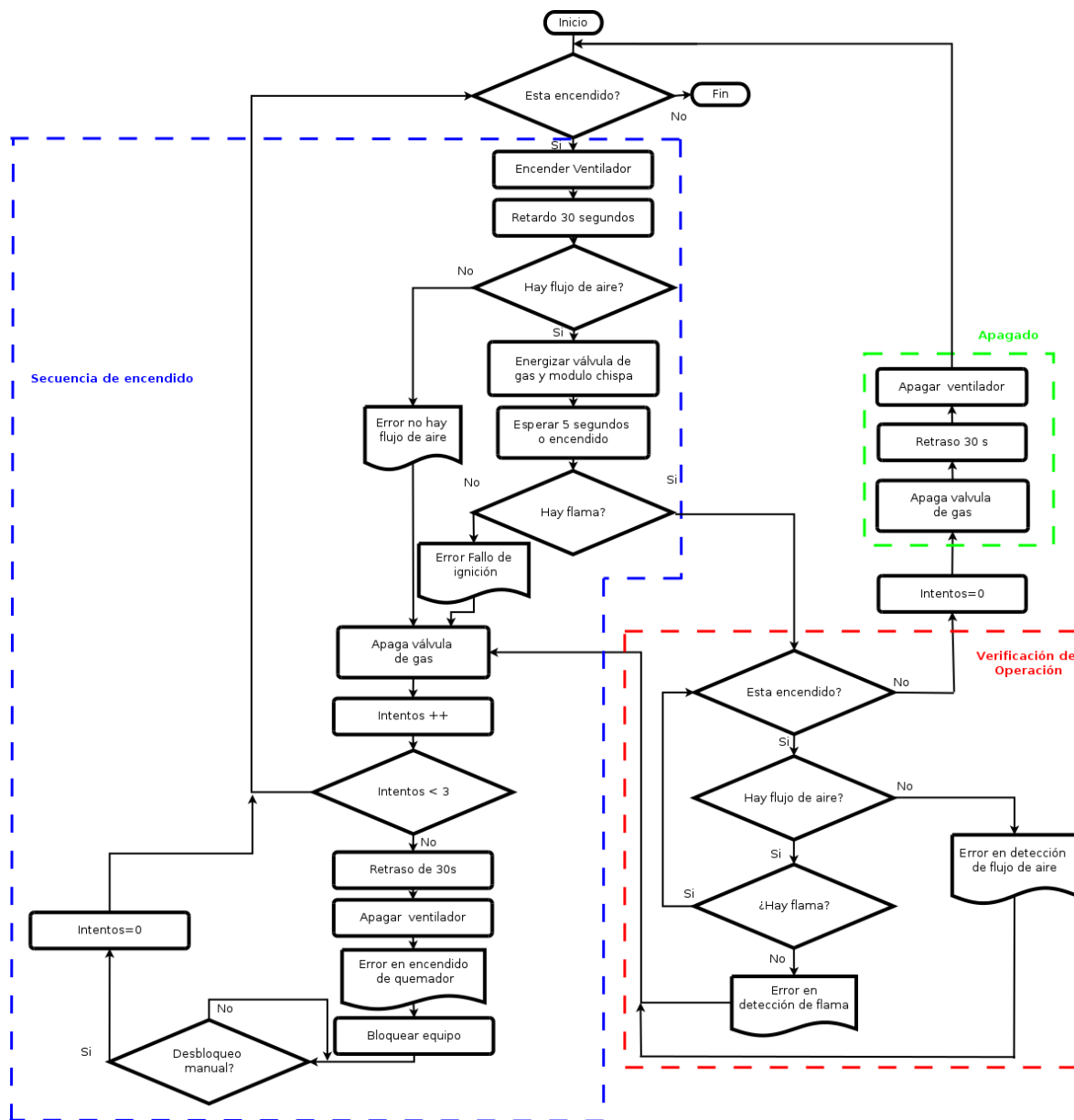


Figura 3.4: Algoritmo de operación del módulo de chispa.

3.1.2.3. Algoritmo de automatización y control de la unidad de absorción

El algoritmo de operación de la unidad de enfriamiento inicia con la sección de verificación de rutina e inicialización, siempre y cuando se encuentre encendida, en esta sección se verifica si se activa algún fallo por sensores defectuosos, flujo de agua en el evaporador y el rango de temperatura ambiente fijado previamente, de ser así el equipo se bloquea por protección, en espera del desbloqueo manual para reiniciar su operación. En el caso de una verificación exitosa, se ejecuta la sección de encendido de equipos, para ello se energiza el abanico del condensador, la bomba del circuito solución, se espera

10 segundos para dar tiempo de alcanzar las revoluciones adecuadas y su medición, si en ese lapso de tiempo no se detecta movimiento de fluido, se redirecciona a la sección de apagado de equipos, en el cual se desenergiza la bomba de solución, el abanico del condensador y el apagado del campo solar o módulo de fuego directo según sea el caso. La sección de encendido de equipos finaliza con la selección de modo de operación (solar o fuego directo), la variable “Modo” es recibida como parámetro de un tercero, y elige si se ejecuta como subrutina el algoritmo de campo de colectores o el encendido a fuego directo, independientemente que opción se elija, se ejecuta la etapa de verificación de operación, la cual verifica si se genera alguna de las siguientes alarmas:

1. Sensor defectuosos, posible sensor dañado, desconectado o corto circuitado. Se verifica la magnitud leída por el sensor y se compara con los límites que puede emitir según la hoja de datos.
2. Flujo de agua insuficiente, insuficiente flujo de agua en el circuito de agua fría, posible falla en la alimentación de la bomba o falta de fluido en el conducto hidráulico.
3. Temperatura ambiente inadecuada, temperatura ambiente excesivamente alta o baja.
4. Insuficiencia rotación de la bomba de solución, posible falla en la alimentación de la bomba hidráulico o falta de fluido en los conductos de la bomba.
5. Límite de temperatura en el generador, posible inadecuada ventilación del condensador, ver inciso 6), bloqueo de tubería, válvula de expansión o exceso de refrigerante en la unidad de absorción.
6. Inadecuada ventilación del condensador, posible falla en la alimentación del motor u obstrucción en la entrada de aire.
7. Exceso de temperatura de gases del generador, posible falta de refrigerante en la unidad de absorción.

En caso de no lanzarse ninguna alarma, finalmente se ejecuta el control de temperatura en la salida del evaporador, una vez terminado se repite el proceso de verificación y operación, hasta que el equipo se apague o se genera alguna de las alarmas mencionadas.

3.1.3. Circuito hidráulico y espacio a climatizar

El Circuito hidráulico y espacio a climatizar es un conjunto de componentes que se interconectan para transportar el fluido caloportador de la unidad de absorción, un tanque de almacenamiento de 2000 l y la manejadora de aire que se encuentra en el espacio a climatizar, en la figura 3.1 se observa que se tienen un trazado de tuberías interconectadas con 4 válvulas solenoides y una válvula de 3 vías, con el objetivo de que interactuen estos 3 componentes principales.

3.1.3.1. Modos de operación

El circuito hidráulico esta diseñado para trabajar en diferentes modos de operación, que a continuación se describen junto con los demás lazos de control¹:

1. El control de temperatura del espacio a climatizar se encarga de manipular el flujo en la válvula de 3 vías, esto se lleva a cabo variando el flujo másico en la manejadora de aire a través de la válvula de 3 vías.
2. La automatización y control para operar el circuito hidráulico en los diferentes modos de operación (solar, almacenamiento de frío y fuego directo) se da con los siguientes 5 modos de operación:
 - **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, tanque de almacenamiento de frío lleno o simplemente el usuario apaga manualmente el sistema de enfriamiento. La apertura de las válvulas solenoides del circuito de agua fría y campo solar (modo “Apagado”) se puede ver en la tabla 3.3 y 3.1.
 - **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, 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 del circuito de agua fría y campo solar (cualquiera de los modos solar dependiendo de las condiciones) se puede ver en la tabla 3.3.
 - **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

¹La unidad manejadora es de una capacidad de 18 kW (5 ton).

evaporador le retira calor al agua del circuito hidráulico, 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 del circuito de agua fría y campo solar (cualquiera de los modos solar dependiendo de las condiciones) se puede ver en la tabla 3.3..

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 del circuito de agua fría y campo solar (modo “Apagado”) se puede ver en la tabla 3.3 y 3.1.

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, 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 igualación 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 biogás 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 del circuito de agua fría y campo solar (modo “Apagado”) se puede ver en la tabla 3.3 y 3.1. Este modo de operación entra en acción si no se cumple el modo 2 y 3.

Tabla 3.3: tabla de verdad de las válvulas solenoides del circuito hidráulico.

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. Los lazos de seguridad en esta sección se reducen a un interruptor de presión y flujo en la salida de la bomba de circulación, que sirve para verificar la obstrucción del paso de agua.

3.1.3.2. Algoritmo de automatización y control

La operación del sistema de aire acondicionado y su automatización se dividió en objetos para facilitar su estudio, el circuito hidráulico y de agua fría funge como el objeto principal o gestor de los demás elementos. En la figura 3.6 se observa el algoritmo de operación del circuito hidráulico y aire, el cual ejecuta los algoritmos mencionados o parte de ellos como subrutinas. La secuencia de operación verifica los sensores defectuosos, en el caso de estar encendido, se alinean las válvulas en modo “SOLAR” esto permite que el agua refrigerada circule a través del evaporador y la vivienda, después del encendido de la bomba se verifica el flujo y la presión del circuito hidráulico, ya que esto indica si la bomba esta funcionando adecuadamente. En la sección de verificación y operación se inicia la lógica principal del algoritmo, para decidir en que modo operar, se lee y compara si la radiación suficiente para trabajar con el campo de colectores, de ser así, se enciende la unidad de enfriamiento en modo solar, de lo contrario, se prioriza el uso del almacenamiento de frío, ya que es generada con energía solar y por consiguiente más barata, en este caso, solo se utiliza el circuito hidráulico y alineación de válvulas en modo “ALMACENAMIENTO”. Si no hubiese energía solar o almacenamiento de frío, se utiliza la unidad de absorción en modo “FUEGO_DIRECTO”, después de cualquiera de los tres modos de operación se ejecuta el control de temperatura del espacio a climatizar, variando el flujo que entra a la unidad manejadora a través de la apertura de la válvula de tres vías. El siguiente paso es la verificación de rutina, si el equipo se apagara repentinamente se ejecuta la sección de apagado del algoritmo de la unidad de absorción, en el modo de operación correspondiente, así este a su vez llamara la sección de apagado de los algoritmos que dependan de el, en el caso de almacenamiento de frío solo es necesario alinear las válvulas en modo “APAGADO” y desenergizar la bomba de circulación y la manejadora de aire. Por último se verifican si existe el fallo de las siguientes alarmas:

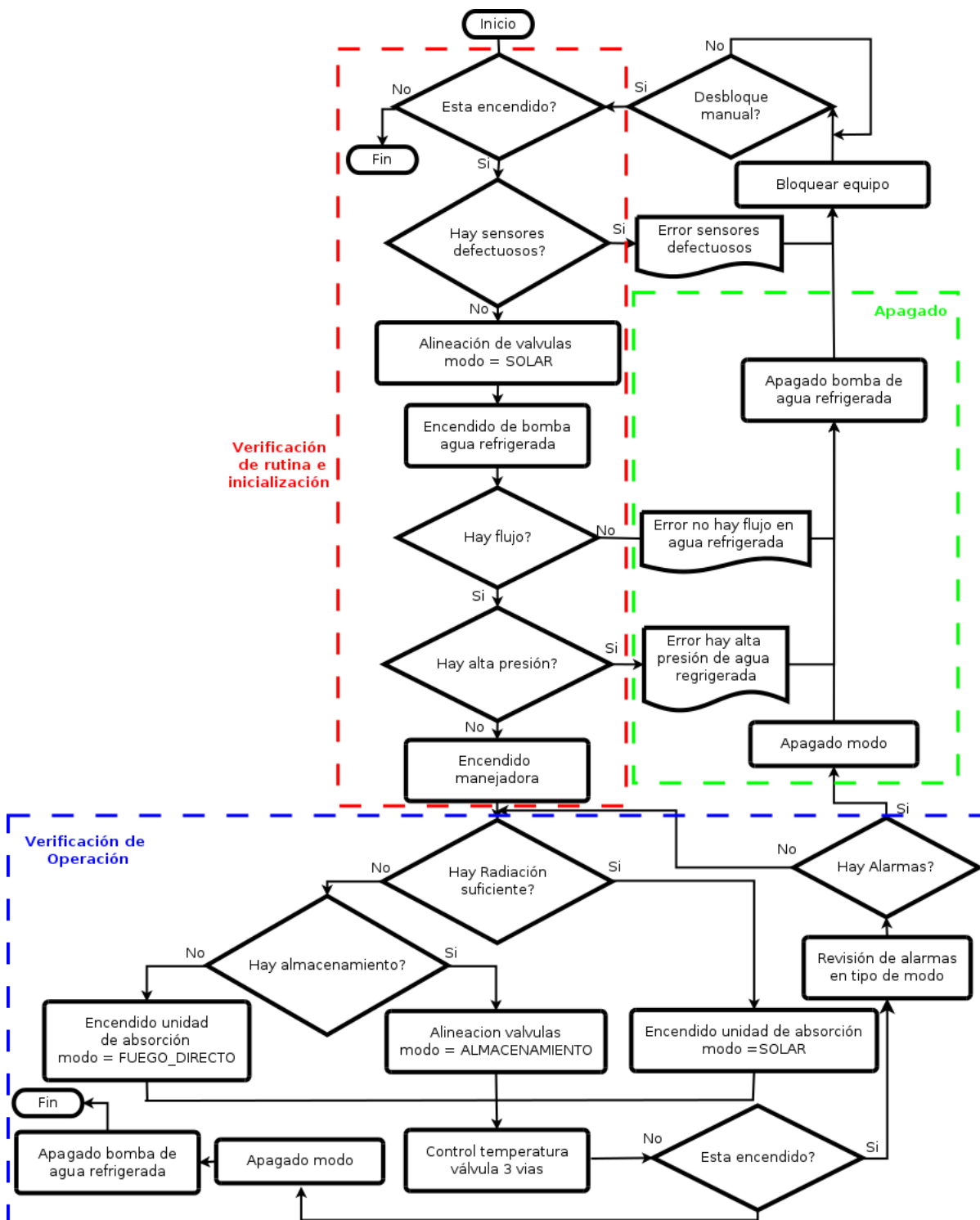


Figura 3.6: Algoritmo de automatización y control del circuito hidráulico y aire.

1. Sensores defectuosos, posible sensor dañado, desconectado o corto circuitado. Se verifica la magnitud leída por el sensor y se compara con los límites que puede

emitir según la hoja de datos.

2. Insuficiente flujo en agua refrigerada, posible falla en la conexión de la bomba o falta de fluido caloportador.
3. Exceso de presión en circuito hidráulico, posible bloqueo de una tubería.
4. Alarmas de los algoritmos dependientes, muestra el error y posible solución generada por un algoritmo dependiente..

Si la revisión de alarmas detecta alguna, se ejecuta la sección de apagado del algoritmo de la unidad de absorción en el modo correspondiente, mostrando un mensaje con de la falla y su posible origen, el equipo se bloquea en espera de la corrección del error y desbloqueo manual.

3.2. Simulación en Aspen plus

El simulador Aspen Plus fue desarrollado en el MIT (del inglés Massachusetts Institute of Technology) y actualmente es uno de los más populares en la industria, es un simulador secuencial y modular, orientado normalmente al proceso químico. Modela y simula cualquier tipo de proceso para el cual hay un flujo continuo de materiales y energía de una unidad de proceso a otra.

El paquete de simulación se puede dividir en tres bloques fundamentales, el primero de ellos es la máquina de simulación y es el núcleo del programa, es el que soporta todo el modelo desde la lectura del archivo de entrada que describe el proceso hasta su resolución por algoritmos numéricos. Tiene diferentes módulos aparte del de simulación: optimización, estimación y regresión. La Interfaz Gráfica de Usuario es el entorno gráfico de modelado. Las Propiedades Físicas: bancos de datos con modelos termodinámicos y propiedades de un gran número de componentes: orgánicos, inorgánicos, electrolitos y sólidos ASPENPLUS (2003, 2009).

3.2.1. Modelo del sistema de absorción en el entorno Aspen Plus

En la figura 3.7 se muestra la representación del circuito por absorción en el entorno de simulación Aspen Plus, el generador consiste en una columna de destilación de 8 etapas y un trabajo de condensado de 0 kW, el intercambio de calor entre el generador y absorbedor (GHX) se realiza por fuera del generador, debido a que la torre de destilación no permite el intercambio de forma nativa.

3.4, utilizados en el estudio experimental de Lazzarin et al. (1996) en el que se evaluó el equipo descrito anteriormente.

Tabla 3.4: Parámetros y consideraciones utilizados en la simulación

Temperatura de salida del agua refrigerada	-20	-10	0	7
Temperatura de entrada del aire(C)	35	35	35	35
Flujo de entrada del aire(m^3/h)	10 200	10 200	10 200	10 200
Anticongelante, ethylene glycol/water(%)	55/45	55/45	55/45	35/65
Flujo del anticongelante(l/h)	2200	2200	2200	2200
Flujo en solución fuerte(kg/h)	108	108	108	108
Presión en condensador(MPa)	1.476	1.517	1.550	1.579
Presion en evaporador(MPa)	0.127	0.208	0.325	0.474
Presion en válvula de expansion intermedia (MPa)	0.750	0.750	0.750	0.750
Eficiencias de intercambiadores(C)	4	4	4	4
Energía de entrada en el generador (kW)	20.8	20.8	20.8	20.8

3.2.3. Resultados y validación

Los resultados de Aspen Plus de acuerdo a las consideraciones de la figura 3.7 y tabla 3.4 se comparan con los resultados experimentales de Lazzarin et al. (1996).

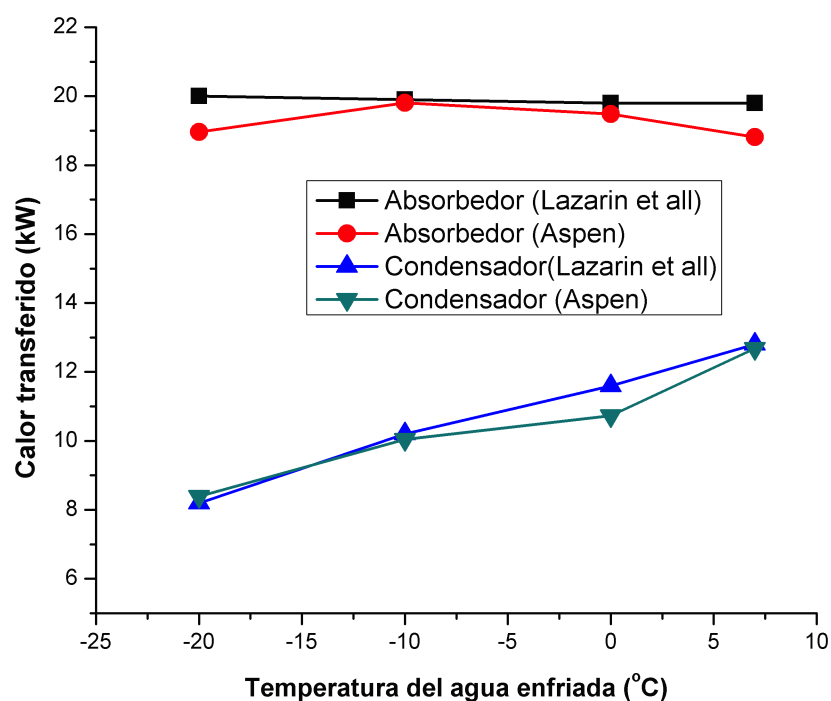


Figura 3.8: Flujo de calor en el absorbedor y condensador en función de la temperatura del agua refrigerada.

En la figura 3.8 se muestra el calor transferido del condensador y absorbedor en función de la temperatura del agua refrigerada, se observa un buen acercamiento a los valores experimentales con un error relativo en el condensador que va desde el 0.94 % con un agua refrigerada a 7°C , hasta un 7.5 % para condiciones de -10°C , en el caso del absorbedor se ve que la mejor aproximación se encuentra 0.45 para -10°C , hasta llegar a un error de 5.19 % a -20°C . Los resultados de Aspen no muestran una consistencia en la tendencia del error, esto se podría explicar debido a que el error en el cálculo de las propiedades mediante Peng Robinson, puede variar según las condiciones a que esta sometida la mezcla amoniaco agua, aunado a que las soluciones del ciclo se pudieran situar en extremos opuestos en el rango del error de convergencia.

La capacidad de enfriamiento de la unidad de enfriamiento baja conforme se le demanda menos temperatura al agua refrigerada (ver figura 3.9), el cálculo hecho por Aspen se aleja un poco de las expectativas ya que va del 9 al 11 % de error relativo. El COP depende de la capacidad de enfriamiento y del mismo modo su estimación se sitúa entre el 9 y 11 %.

En la figura 3.10 se ve como el flujo para la solución pobre se comporta según lo esperado con un error relativo que va desde 1.58-3.58 %. El flujo de vapor se estima con un error 2.26 % hasta 11.44 %. La concentración de la solución pobre se mantuvo en 3.18 % hasta un de 22.58 %.

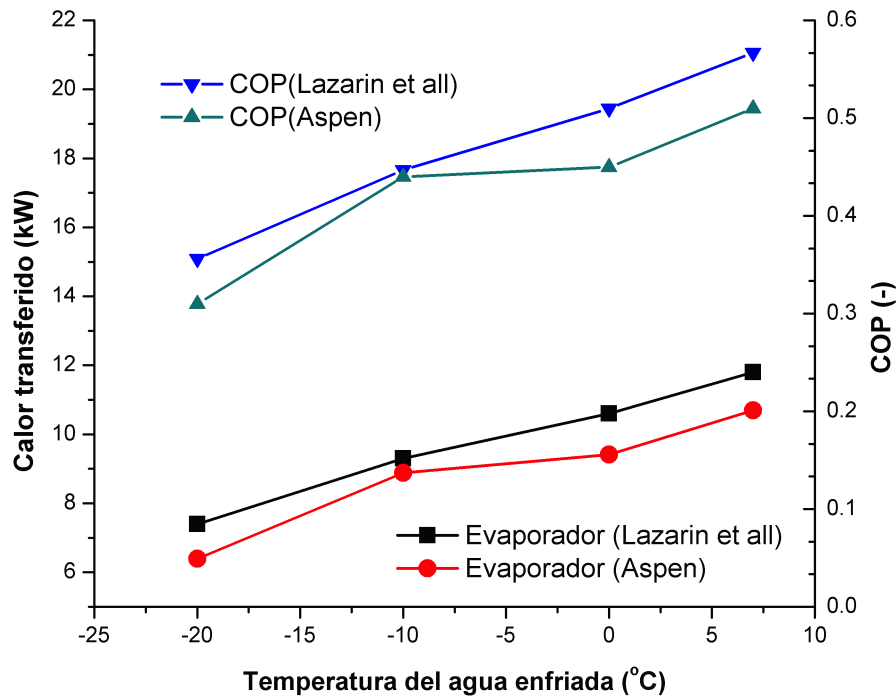


Figura 3.9: Capacidad y COP en función de la temperatura del agua refrigerada.

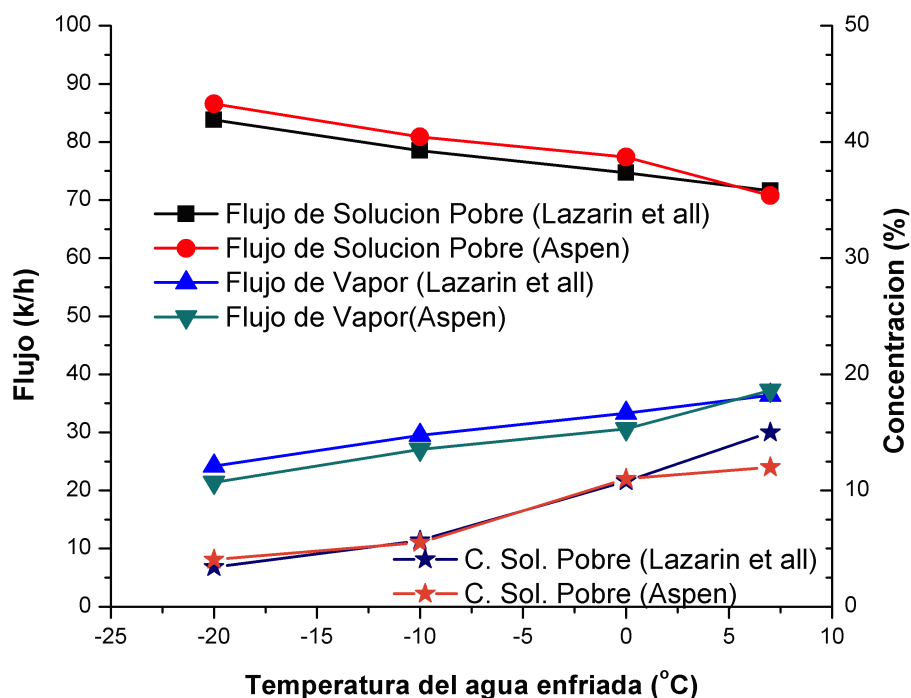


Figura 3.10: Flujos y concentración en función de la temperatura del agua refrigerada.

En la tabla 3.5 se hace un resumen de las variables calculadas con Aspen Plus y los datos experimentales de Lazzarin et al. (1996) con sus respectivos porcentaje de error. Se observa que la solución pobre fue la variable estimada con el mayor rango de error. Seguido por el evaporador, que a pesar de una buena estimación en la cantidad de vapor no es posible alcanzar la capacidad real debido a cálculo de la concentración y la pureza del refrigerante en el evaporador. La estimación del flujo de vapor se ve afectada conforme se demanda menor temperatura en el agua refrigerada. Se cree que la simulación tiene una buena estimación de las variables, ya que el error global se encuentra por debajo del 9.30 %, tomando en cuenta las consideraciones realizadas, error en el cálculo de propiedades y errores mínimos en ciclos de convergencia.

Tabla 3.5: Parámetros y variables en función de la temperatura del agua refrigerada

	Lazzarin et All	Aspen	Error(%)	Lazzarin et All	Aspen	Error(%)	Lazzarin et All	Aspen	Error(%)	Lazzarin et All	Aspen	Error(%)
Temperatura de salida del agua refrigerada	7			0			-10			-20		
Concentración de solución pobre (%)	15.5	12.00	22.58	10.8	11.00	1.85	5.7	5.52	3.18	3.4	4.06	19.50
Flujo masico de vapor (kg/h)	36.40	37.22	2.26	33.3	30.62	8.05	29.50	27.09	8.16	24.20	21.43	11.44
Flujo de calor en el absorbador (kW)	19.8	18.81	5.00	19.8	19.48	1.62	19.9	19.81	0.45	20	18.96	5.19
Flujo de calor en el evaporador (kW)	11.8	10.69	9.41	10.6	9.41	11.23	9.3	9.05	2.69	7.4	6.55	11.49
Flujo de calor en el condensador (kW)	12.8	12.68	0.94	11.6	10.73	7.50	10.2	10.04	1.61	8.2	8.39	2.30
Cop	0.57	0.51	9.41	0.51	0.45	11.23	0.45	0.44	2.69	0.36	0.31	11.49
Error promedio(%)	8.27			6.91			3.13			10.23		

Los resultados de Aspen Plus que corresponde a la configuración de la figura 3.7 de este trabajo y Darwish et al. (2008) se presentan en la tabla 3.6 en forma de

comparación, se puede observar que se tiene un comportamiento similar en la mayoría de las corrientes, sin embargo la configuración de este trabajo adiciona el intercambio de calor GHX, como lo muestra el diagrama del ciclo original de la unidad ROBUR (2006, 2005), a diferencia del trabajo de Darwish et al. (2008), en el que no se ilustra claramente el intercambio de calor entre la solución pobre con la solución contenida en la parte media del generador (GHX). Esta transferencia de calor permite que la solución rica (corriente 12) incremente su temperatura cerca de 30°C , a su vez la temperatura del vapor llega a de los 79.96°C , presentando un delta de temperatura considerable con la fuente de enfriamiento (temperatura ambiente), ocasionando un mayor intercambio de calor en el condensador. A diferencia del resultado reportado por Darwish et al. (2008) que trabaja con la temperatura mínima de 40°C en la entrada del condensador (corriente 1), resultando un cálculo poco consistente ya que el ciclo podría verse en problemas cuando se trabaje con una temperatura ambiente superior a los 35°C . En la tabla 3.5 puede observarse que la corriente 13 también se afecta por el intercambio de calor GHX, lo que provoca que la corriente 13-A disminuya su temperatura un gradiente de 64.41°C , ocasionando que la corriente 14 tenga la capacidad recibir más calor en el intercambiador GAX, en consecuencia un mejor integración energética y menor demanda de disipación calor en el absorbedor.

Tabla 3.6: Resultados de la simulación en Aspen Plus, izquierda Darwish et al. (2008), derecha este trabajo.

Corriente	1A		2		3		4		5	
Desde	Separador		Condensador		Valvula de expansion-1		Preenfriador		Valvula de expansion-2	
Hasta	Condensador		Valvula de expansion-1		Preenfriador		Valvula de expansion-2		Evaporador	
	Darwish at All	Aspen	Darwish at All	Aspen	Darwish at All	Aspen	Darwish at All	Aspen	Darwish at All	Aspen
T(C)	40.63	79.96	40.24	40.51	16.17	16.79	16.17	16.77	(-)6.92	(-)6.57
P(Bars)	15.55	15.55	15.55	15.55	7.55	7.55	7.55	7.55	3.25	3.25
NH3 masa%	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99

Corriente	6		7-a		7		8		9	
Desde	Evaporador		preenfriador		Mezclador		Gax		Aborbedor	
Hasta	preenfriador		Mezclador		GAX		Aborbedor		Bomba	
	Darwish at All	Aspen	Darwish at All	Aspen	Darwish at All	Aspen	Darwish at All	Aspen	Darwish at All	Aspen
T(C)	(-)6.92	-0.8	3.08	11.17	95.2	86.91	86.43	81.85	40.61	40.18
P(Bars)	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25
NH3 mas%	99.99	99.99	99.99	99.99	36.8	36.8	36.8	36.79	36.8	36.8

Corriente	10		11		12		13		14	
Desde	Bomba		Rectificador		Gax		Generador		Valvula de expansion-3	
Hasta	Rectificador		Gax		GHX		GHX		Mezclador	
	Darwish at All	Aspen	Darwish at All	Aspen	Darwish at All	Aspen	Darwish at All	Aspen	Darwish at All	Aspen
T(C)	40.74	41.01	57.25	78.13	91.2	81.73	166.59	171.65	116.41	107.24
P(Bars)	15.55	15.55	15.55	15.55	15.55	15.55	15.55	15.55	3.25	3.25
NH3 mas%	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	12.19	11	12.19	11

En la figura 3.11 se ilustra en las barras moradas y azules la magnitud, en rojo y negro el porcentaje de error relativo de algunos de los datos calculados en la simulación en Aspen Plus con intercambiador GHX y Darwish et al. (2008). Como referencia y datos verdaderos se incluyen los datos de Lazzarin et al. (1996), con las consideraciones y parámetros a una temperatura de salida del agua refrigerada de 0°C . Los resultados de ambas simulaciones tienen un buen acercamiento al valor real, sin embargo el intercambio GHX afecta directamente en el en la corriente 12 provocando que el

condensador mejore su predicción un 8.88 % en comparación con los datos de Darwish et al. (2008). Aunado a lo anterior se observa que el absorbedor debido al decremento de la temperatura de la corriente 14 se pudo llegar a un error relativo 1.62 %.

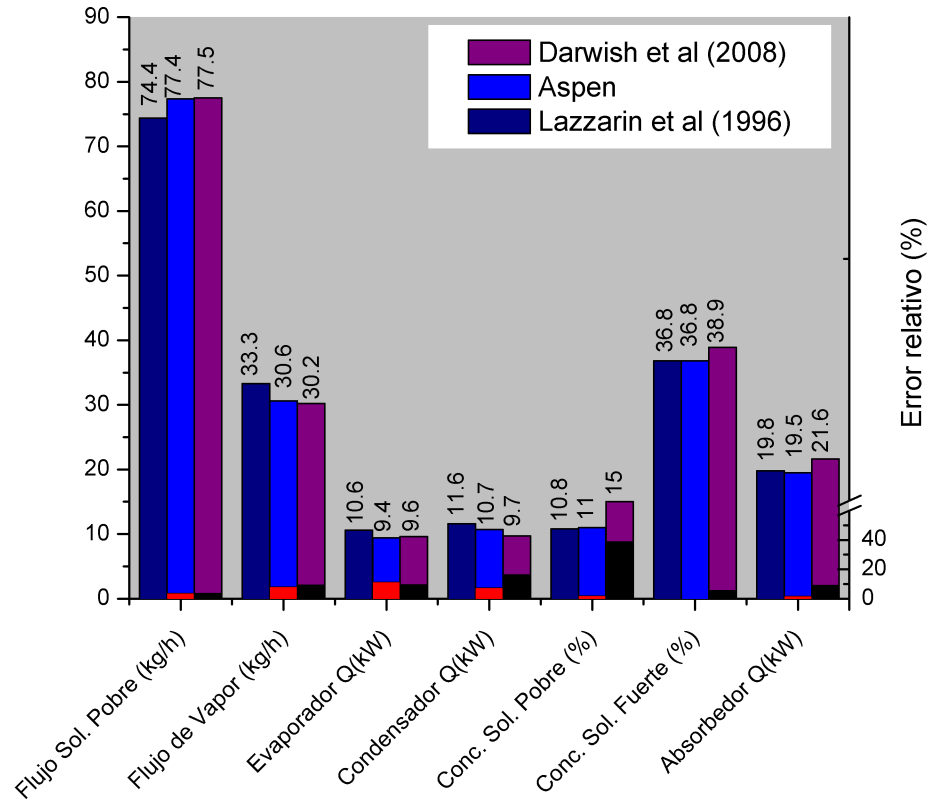


Figura 3.11: Comparación de los datos experimentales Lazzarin et al (2009), simulación de Darwish et al. (2008) y Aspen Plus.

3.3. Estudio paramétrico para detecciones de lazos de control

El equipo por absorción es alimentado a fuego directo con una fuente de calor fija, sin embargo, en la figura 3.12, 3.13 y 3.14 se hace un estudio paramétrico de la variación de calor de entrada, ya que esto tendría el mismo efecto que la adición de calor que pudiese venir de un campo de colectores solares, para determinar la potencialidad o modificaciones para activar el equipo con energía solar. En la figura 3.12 se muestra la concentración y el flujo del refrigerante a 1.6, 1.8 y 2 kg/h en el circuito solución, se observa un comportamiento esperado, que a manera que se le inyecta calor se genera más flujo vapor, se ve que la concentración permanece constante de 12 a 20 kW y alrededor del flujo de calor nominal, la concentración de amoníaco empieza a bajar, debido a que la unidad de absorción esta diseñado para trabajar a una capacidad nominal y el

rectificador es de una capacidad fija, esto provoca que al incrementar el flujo de vapor, el rectificador no sea capaz de condensar o purificar el exceso de agua. Hay que notar que entre menor es el flujo en el circuito solución es más notoria la caída de concentración, debido que a menor flujo másico es más fácil elevar la temperatura en el generador y con ello evaporar agua.

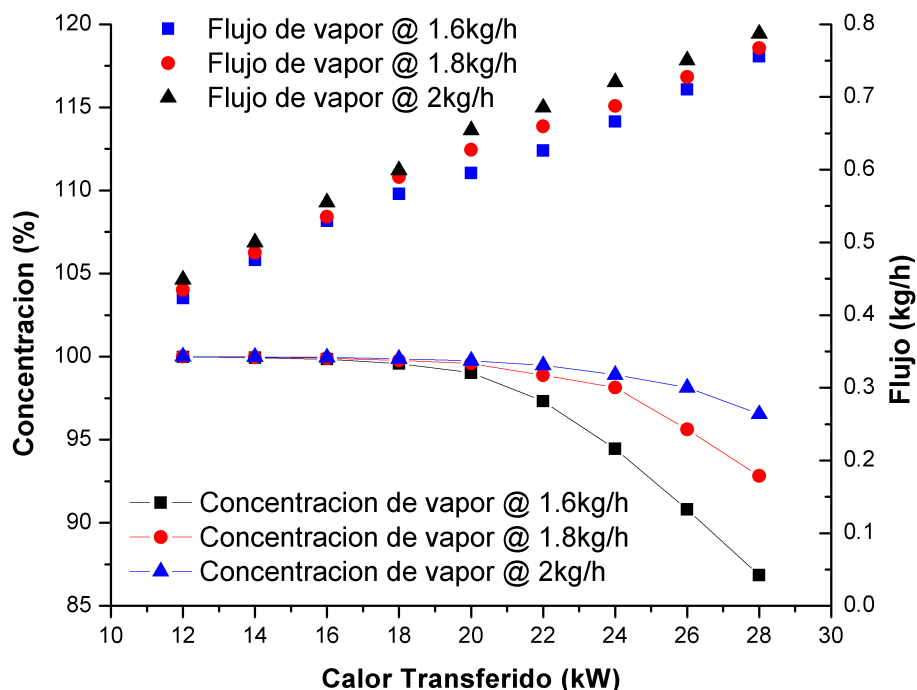


Figura 3.12: Flujo de vapor y flujo del vapor de amoníaco en función del calor transferido en el generador.

En la figura 3.13 se observa que la capacidad de enfriamiento disminuye a pesar del incremento de energía suministrada y vapor en la salida del generador, esto se debe a que la concentración disminuye como se explico en la figura 3.8, ocasionando que conforme el amoníaco se evapora, el punto de ebullición de la mezcla también lo hace, lo que dificulta la evaporación de la misma, esto produce que la calidad en el la salida del evaporador disminuya y por lo tanto la capacidad también lo haga. La capacidad de enfriamiento del ciclo por absorción se ve comprometida con la variación de calor en el generador a un flujo del circuito solución fijo, sin embargo si se varia el flujo como se ve en la figura 3.13 que entre 12 y 16 kW de adición en el generador, se tiene una mejor capacidad de enfriamiento para un flujo de la bomba del circuito solución a 1.6 kg/h, entre 16 y 20 kW conviene trabajar a 1.8 kg/h y de 20 kW en adelante a 2 kg/h, es decir si se requiere mantener operando la máquina de absorción a máxima capacidad,

es necesario que conforme se eleva o disminuya la cantidad de energía, también se haga de forma proporcional con el flujo del circuito solución.

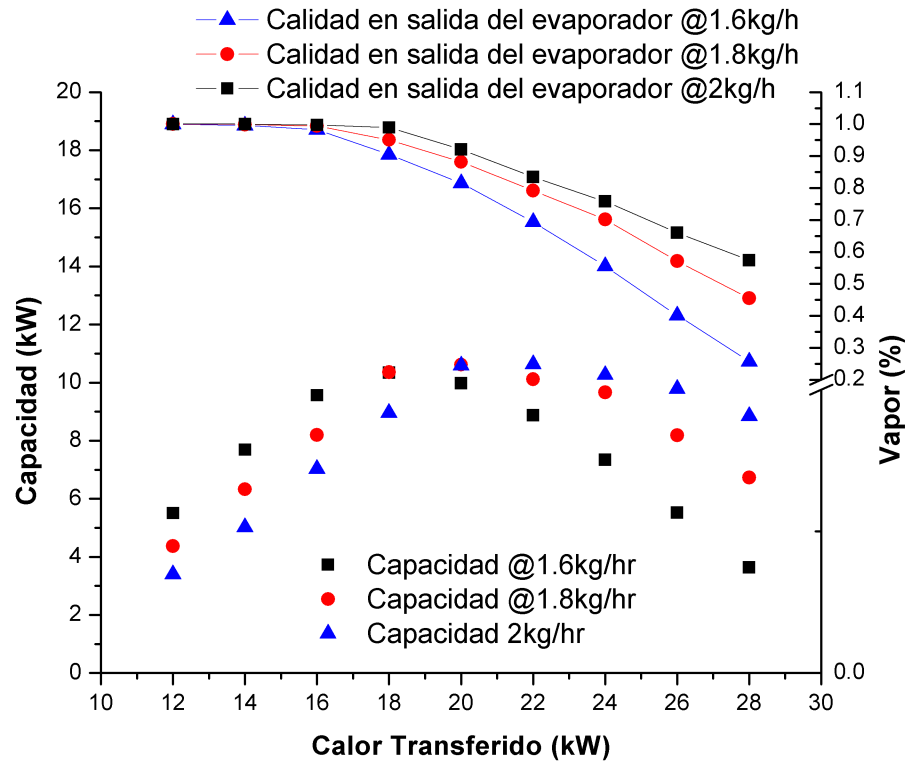


Figura 3.13: Concentración del flujo de vapor y capacidad en el evaporador en función del calor transferido en el generador.

En la figura 3.14 se observa que a medida que se entrega más calor en el generador, el COP decae por la misma razón que lo hace la capacidad de enfriamiento. El mejor COP ante la variación de calor de entrada se obtiene al variar el flujo del circuito solución. Se observa que el mayor COP se obtiene a 1.6 kg/h a una temperatura de generación de vapor de alrededor de los 160°C , de la misma forma el máximo COP para los flujos de a 1.8 kg/h y a 2 kg/h se sitúa alrededor de los 160°C , significando que el flujo óptimo del circuito solución es cuando se tiene una temperatura de generación de 160°C , dicho de otra forma, se puede decir que al variar el flujo del circuito solución se puede controlar la temperatura de generación. Si se toma en cuenta que existe una Temperatura de Generación Óptima, Fernández-Seara & Vázquez (2001)., para este estudio se encuentra que es de 160°C .

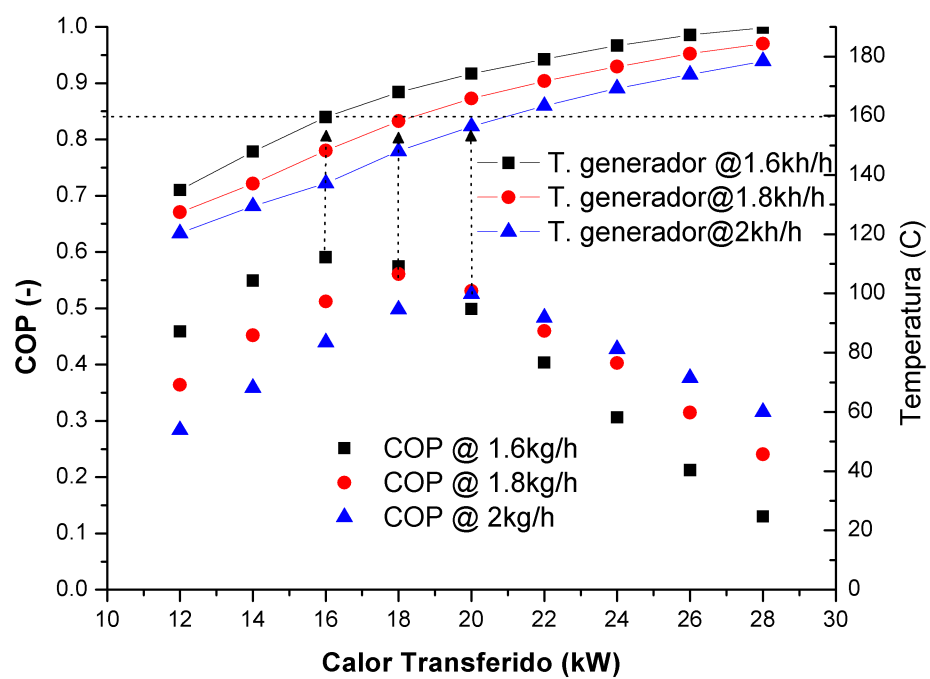


Figura 3.14: COP y temperatura de generación en función del calor transferido.

Capítulo 4

Diseño y construcción del sistema de monitoreo y control

En este capítulo se describe la propuesta y arquitectura del sistema de monitoreo y control, seguida de su diseño electrónico, construcción de circuitos impresos y programación de la interfaz de usuario y firmware de los microcontroladores, además se incluye la selección y calibración de instrumentación y actuadores.

4.1. Propuesta y arquitectura

La implementación en hardware del Sistema de Automatización, Control, Monitoreo y Adquisición de Datos (SACMAD) del Sistema de Aire Acondicionado Solar (SAAS), se dividen en subsistemas o módulos de control que realizan tareas específicas. Tal como lo hacen los sistemas distribuidos, sin embargo, en este trabajo se probó una combinación con el paradigma orientado a objetos, para modelar el hardware y manipular su comportamiento, tal y como se hace en software de algunos lenguajes de programación orientado a objetos, logrando que las tareas específicas se dividan en diferentes controladores de una manera ordenada, que ayuda a descentralizar procesos, que ocupan un poder de cómputo considerable, en varios dispositivos embebidos.

En la figura 4.1 se muestra el diagrama en bloques que conforman el sistema de control de aire acondicionado solar, como principal se tiene al Controlador de Agua Fría (CAF) que administra los modos de operación del circuito de agua fría descritos en el capítulo anterior, además se interconecta con el Sistema de Control de la Unidad de por Absorción operado con energía solar y biogás (SCUA), para adquirir las señales de los sensores y manipular su comportamiento. El SCUA administra el comportamiento de el Controlador de Fuego Directo (CFD) y el controlador del campo de colectores (CCC), al mismo tiempo se adquieren las señales de los sensores y son enviados al SCUA, para que estén disponibles cuando se reciba la petición del CAF. La conexión entre SCUA con CFD y CCC es transparente para CAF, es decir, CAF recibe la información como si fuera solamente de un solo controlador. El sistema de control para el seguimiento

solar (SSS) es parte del campo de colectores por lo cual es administrado por CCC para controlar el enfoque y desenfoco del campo solar. El objetivo de manejar un control en bloques y orientado a objetos, debido a que al utilizar distintos dispositivos ayuda a realizar una tarea específica de forma continua, a diferencia de cuando se realizan varias tareas de forma secuencial. La arquitectura modular permite que los subsistemas ganen cierta libertad para operar libremente, cuando uno de estos así lo requiera, por ejemplo: el sistema de control para el seguimiento solar, puede ser implementado para el seguimiento solar en un arreglo fotovoltaico, en un sistema de captación solar cilindro parabólico, fresnel o disco parabólico de manera autónoma, sin la necesidad de incorporar elementos no necesarios como el SCUA. De esta manera se obtienen controladores que pueden ser utilizados en diversos proyectos con las mismas características.

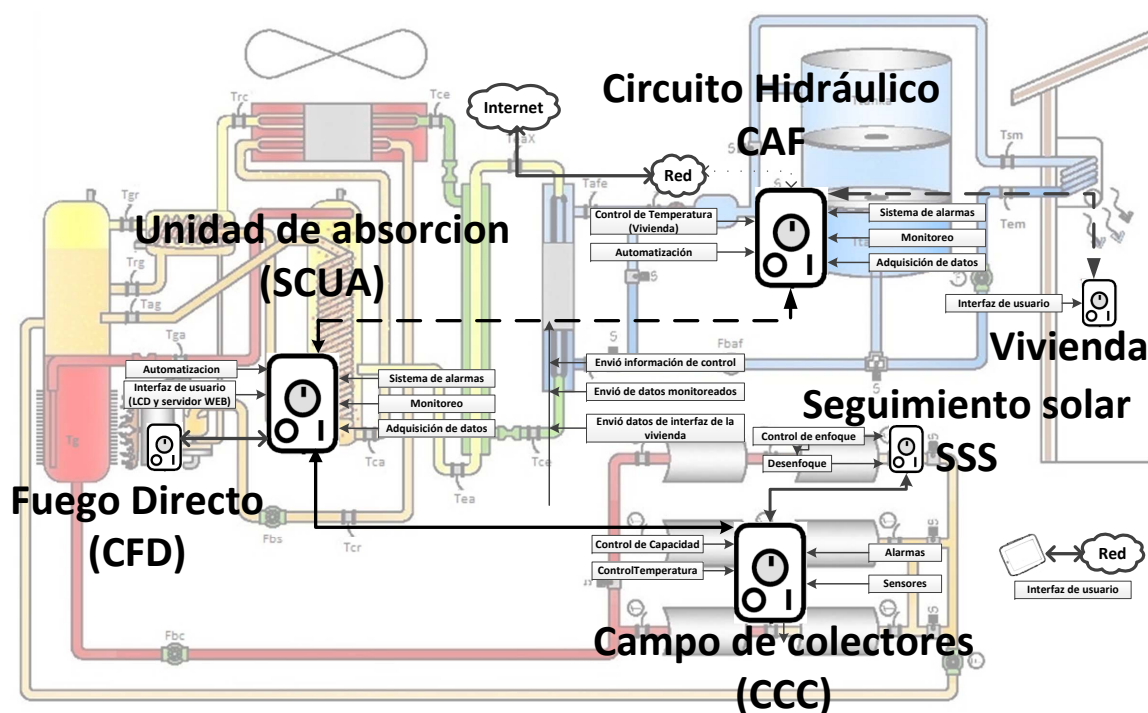


Figura 4.1: Arquitectura en hardware del controlador del sistema de aire acondicionado solar.

Con el fin de ajustar el hardware a la arquitectura planteada, se utiliza un tablero muy popular de la plataforma Arduino con su escudo (shield) de comunicación ethernet, en la figura 4.2 se ilustra el diagrama a bloques de la arquitectura del controlador que se utilizó en los distintos subsistemas, de aquí en adelante también referidos como objetos. El tablero incorpora el modelo Arduino Mega2560, al cual se le hará un escudo de automatización y control muy general para ajustarse a cada caso específico. Los canales análogos del microcontroladores solo son capaces de realizar lecturas de voltaje de 0 a 5 VDC, algunos de los sensores preacondicionados se ajustan a este rango,

sin embargo, hay otros que se ajustan al estándar de $4 - 20\text{ ma}$, 0 a 10 vdc o inclusive los que no son preacondicionado como los sensores de temperatura RTD y termopar, que arrojan un valor de resistencia o voltaje muy pequeño. Para ello se considero una sección de acondicionamiento de señales que consiste en una serie de conectores acomodados estratégicamente, con el objetivo insertar circuitos intercambiables de una medida específica, que contengan la etapa de acondicionamiento para cada sensor, de esta manera el hardware se ajusta al numero y tipo de sensores de cada caso particular. Las entradas y salidas digitales y salidas moduladas por ancho de pulso, requieren del mismo proceso que las entradas analógicas, ya que seria imposible activar un motor de corriente alterna con una salida digital del microcontrolador. Los puertos de comunicación serie e i2c juegan un papel importante en la arquitectura del equipo, ya que es la manera de comunicación con otros dispositivos o periféricos. En el caso del CAF se integra una pantalla de cristal liquido táctil para mostrar la información o estado del sistema, un reloj de tiempo real y un transmisor-receptor de radio frecuencia, para intercomunicarse de forma alámbrica o inalámbrica a otros dispositivos. El módulo integra la circuiteria básica para su funcionamiento y programación, además de un módulo lector de memorias SD para guardar la configuración y los datos recolectados durante su operación.

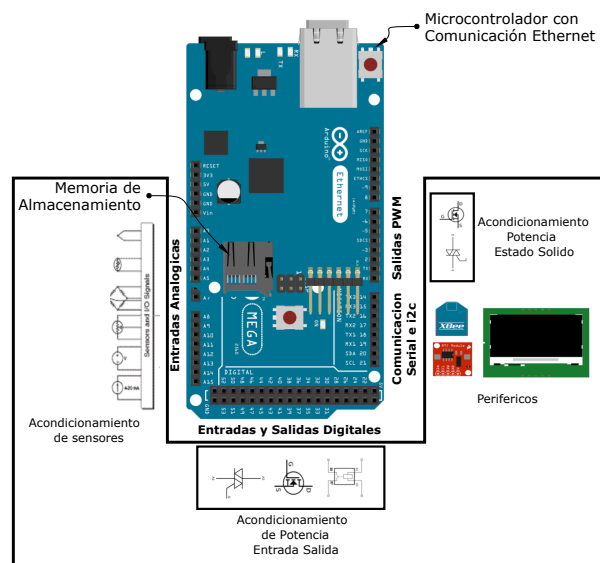


Figura 4.2: Módulo genérico para adquisición, automatización y control.

4.2. Diseño y fabricación del SACMAD

El SACMAD se compone de un circuito empotrado, que por si solo es capaz de adquirir señales analógicas y digitales para almacenarlas en un archivo de texto, también cuenta con algoritmos de control y puertos de salida para controlar procesos.

4.2.1. Diseño del sistema de adquisición de datos

El dispositivo electrónico puede comunicarse a través de conexión serial o ethernet a la utilidad de configuración, monitoreo y control instalada en un equipo de computo, tal como se muestra en la figura 4.3, es decir, dentro del algoritmo de operación del dispositivo empotrado existe una sección de peticiones y comandos, que mantiene escuchando el puerto serial y ethernet, en espera de una petición o comando.



Figura 4.3: Arquitectura entre dispositivo y utilidad de monitoreo.

4.2.1.1. Protocolo de comunicación

En la tabla 4.1 se muestra el formato que debe contener la cadena recibida para efectuar una petición desde la utilidad de configuración hasta el dispositivo de monitoreo, por ejemplo, si se recibiera la siguiente cadena: "1:A1", el dispositivo de medición regresara el valor en bits en forma de cadena "763" del canal analógico 1. En el caso de que el valor requiera de un procesamiento, por ejemplo si se desea obtener el voltaje leído por el canal analógico 1, se puede pedir una petición para que se ejecute un método que convierta ese valor, la cadena podría ser "1:5" donde el 5 indica que en el firmware del microcontrolador se ejecute la función deseada y que regrese el valor del voltaje en una cadena ("2.5").

Petición:Idpin o Petición:metodo	
Tipo	Descripción
Peticion	Es el identificador para realizar una peticion con valor reservado de 2
ID	Es el identificador del tipo de pin, con valores 'A' entradas analogicas y 'D' para entrada digital
pin	Es el numero de terminal a leer, de [0-n].
metodo	Es el identificador para un metodo especializado, de [0-n]

Tabla 4.1: Estructura de la cadena de petición.

Comando:IDpin:valor o Comando:método:valor	
Tipo	Descripción
Comando	Es el identificador para realizar una acción con valor reservado de 2
ID	Es el identificador del tipo de pin, con valores 'A' para salidas PWM y 'D' para digital
pin	Es el numero de terminal que a modificar, de [0-n].
Valor	Es el valor a modificar en la terminal seleccionada. De [0-1] para los digitales y de [0-255] para las salidas PWM
metodo	Es el identificador para un metodo especializado, de [0-n]

Tabla 4.2: Estructura de la cadena de comando.

4.2.1.2. Utilidad de configuración, monitoreo y control

La utilidad de configuración, monitoreo y control es una aplicación de escritorio basada en la plataforma de Java, lo que permite el uso multiplataforma. En la figura 4.4a se ilustra la pantalla de inicio de la utilidad, la cual permite conectarse a dispositivo electrónico mediante el puerto USB o comunicación ethernet introduciendo la dirección IP y puerto. Una vez hecha la conexión se reciben los parámetros, como el nombre del archivo donde se guardan los datos adquiridos y la bandera que seleccionan si se guardan o no, la fecha y el tiempo de muestreo.

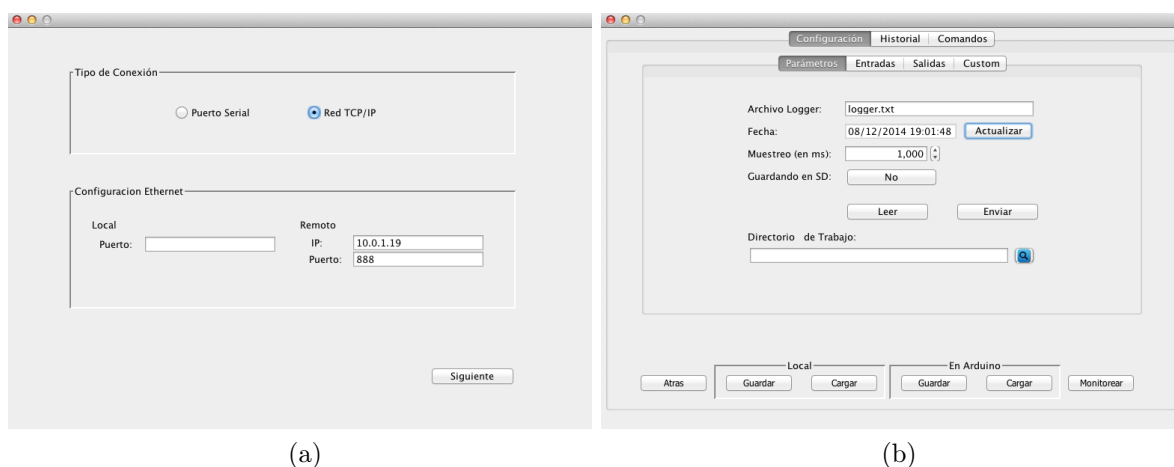


Figura 4.4: Pantalla de conexión y configuración de parámetros de la utilidad de monitoreo y control.

En la figura 4.5a se muestra como se pueden configurar las entradas y salidas, con un nombre personalizado, en el caso de las entradas analógicas se puede seleccionar el tipo un tipo de sensor preprogramado con la ecuación que convierte la señal de voltaje al tipo de señal conectada físicamente, también se incluye una ecuación de segundo orden que permite corregir el sensor de acuerdo a una calibración. Dicha configuración puede

ser guardada en el microcontrolador o leída desde el, o en su defecto guardarse una copia de seguridad en el equipo de computo. Una vez que el dispositivo esta configurado y conectado a la utilizad de monitoreo, se dan de alta las gráficas deseadas, eligiendo una combinación de entradas analógicas previamente dadas de alta. En la figura 4.5b se ve como se grafican las entradas análogas en tiempo real, una imagen de la gráfica y los datos adquiridos puede ser guardados en el equipo de computo en formato JPG y excel respectivamente.

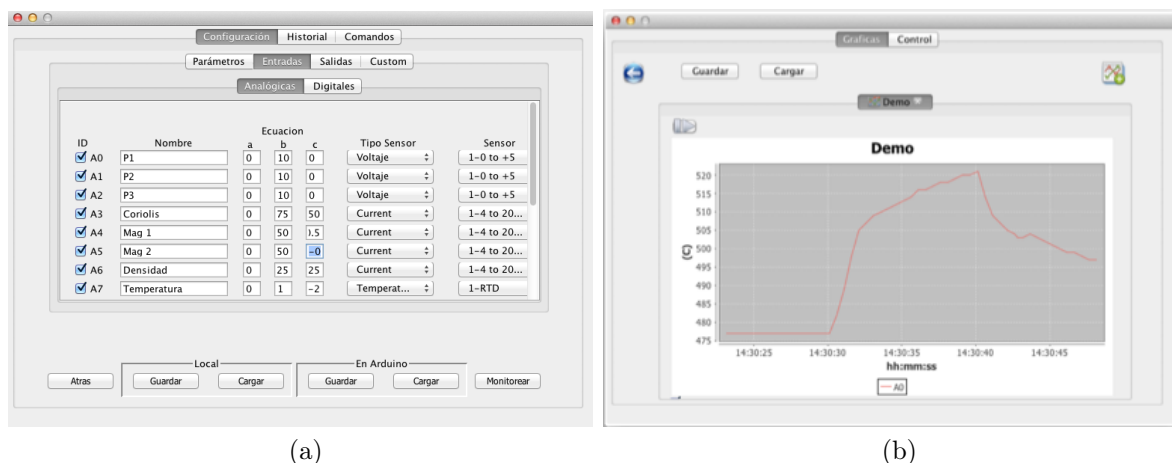


Figura 4.5: Pantalla de configuración de entradas analógicas y gráficas de la utilidad de monitoreo y control.

4.2.2. Diseño electrónico

En el diseño electrónico y la construcción del circuito impreso del SACMAD descrito anteriormente, se llevo a cabo mediante un circuito impreso (PCB), el cual es un 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 baquelita. 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.

El PCB se elaboró a partir del diagrama esquemático mostrado en las figura 4.6, el cual se probó a través del protoboard y placas de demostración. El diagrama computarizado se realizó en el software de diseño CAD EAGLE 6.5, en el cual se eligieron los componentes electrónicos dentro del repositorio de librerías, además de definir su interconexión.



El siguiente paso fue la elaboración del tablero, donde se ilustran las figuras del encapsulado de cada componente y la unión de ellos mediante nodos, que indican como se interconectan físicamente los componentes y las rutas que conforman el circuito. En la figura 4.7 se muestra la vista final del tablero, y la explicación de donde se insertaran los dispositivos, tales como el microcontrolador, el emisor y receptor de radiofrecuencia XBEE, el reloj de tiempo real RTC y los conectores para los módulos de acondicionamiento de señales de entrada y salidas.

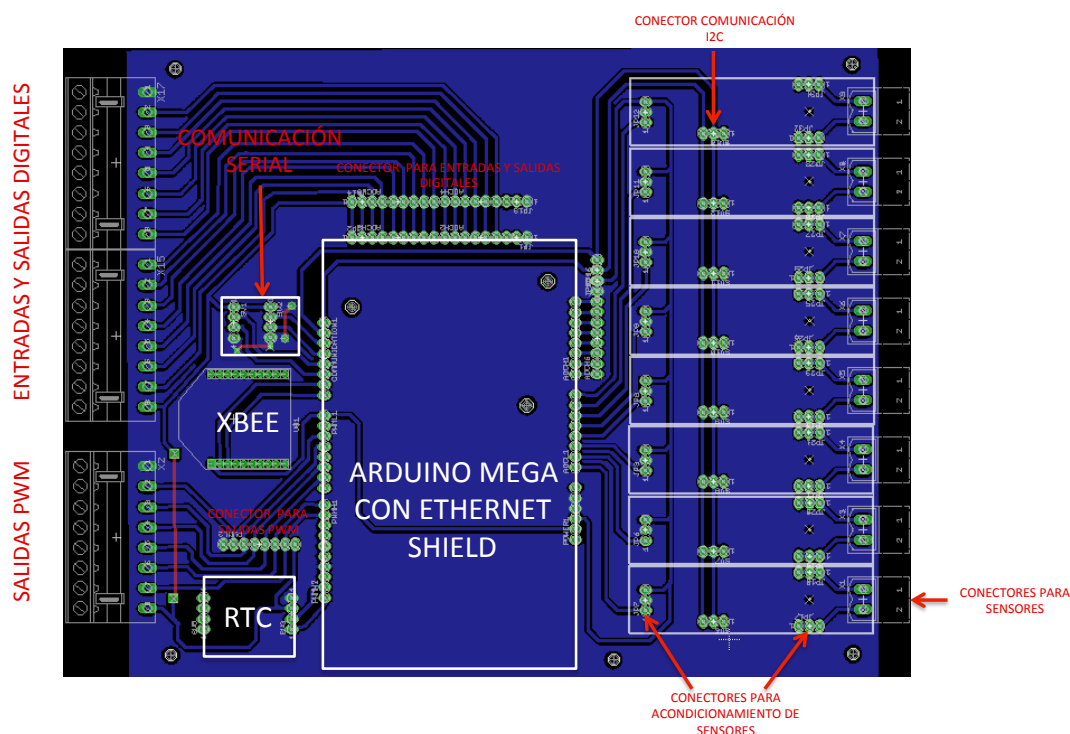


Figura 4.7: Tablero del controlador del sistema de aire acondicionado.

4.2.3. Acondicionamiento de señales e instrumentación

El funcionamiento óptimo de un sistema es de vital importancia, uno de los principales puntos a cuidar es la selección de instrumentos y su calibración, ya que son los encargados de recolectar la información, para ello se deben tomar en cuenta ciertos indicadores como lo son: los rangos de operación del instrumento, el tiempo de respuesta, la exactitud, la precisión, la histeresis y tipo de material. La calibración también juega un papel importante, debido a que permiten obtener la relación entre las señales producidas por el instrumento y el valor real o patrón (regularmente muy cercano al valor real). La mayoría de los sensores y actuadores no se ajustan a un estándar o por su naturaleza emiten y reciben diferentes tipos de señales, como puede ser resistivas, capacitivas, voltajes digitales y analógicos, con niveles de voltaje dentro y fuera del rango de operación del microcontrolador, para ello es necesario realizar etapas de acondicionamiento que amplifiquen, atenúen y transformen esas señales, de tal manera que nuestro equipo de control y monitoreo sea capaz de recibir la información de los sensores y de manipular los actuadores sin ningún tipo de problema. De acuerdo a la instrumentación seleccionada se realizaron los siguientes acondicionamientos de señales:

4.2.3.1. Sensor de temperatura

RTD PTC100 de 0°C a 350°C y modelo TH-SA-M-PM-065-2015-6-N2, con un coeficiente de temperatura (α) de 0.00385 y una precisión de $\pm 0.1\%$ @ 0°C , cuenta con un cable 182.8 cm (72 pulgadas) de longitud y un vástago de 20 cm (8 pulgadas) de acero inoxidable, el diseño permite instalarlo en una tubería con rosca de 1.3 cm ($1/2$ pulgada), una imagen del sensor se aprecia en la figura 4.8.



Figura 4.8: Sensor de temperatura RTD PTC100.

El sensor RTD cambia su resistencia eléctrica de acuerdo a la temperatura, es decir, para obtener su temperatura es necesario medir o calcular su resistencia. El puente de Wheatstone es un circuito electrónico utilizado para medir resistencias a través de el equilibrio de voltaje entre dos de sus terminales llamados brazos, tal como se puede apreciar en la figura 4.9, se dice que esta en equilibrio cuando cuando $R1=R2=R3=\text{CONRTD}$, donde CONRTD es el conector de la resistencia desconocida, conforme esta va creciendo lo hace de manera proporcional el diferencial de potencia (V_o).

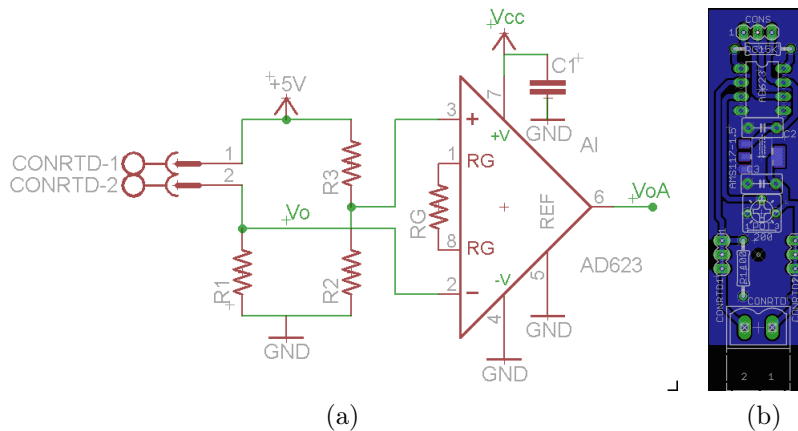


Figura 4.9: Etapa de acondicionamiento del sensor de temperatura.

El RTD PT100 antes mencionado tiene una resistencia de 100Ω a 0°C , para equilibrar el puente a esta temperatura se colocaron las resistencias $R1=R2=R3$ con un valor de 100Ω , a partir de que el sensor de temperatura aumente su temperatura el

puede arrojar un voltaje proporcional a su resistencia, que puede ser modelada por la ecuación 4.1,

$$V_o = V_{cc} \left(\frac{R_3}{R_2 + R_1} \right) - V_{cc} \left(\frac{R_1}{R_1 + RTD} \right), \quad (4.1)$$

despejando RTD se obtiene la resistencia del sensor, dada por la ecuación 4.2,

$$RTD = \frac{R_1}{\frac{R_2}{R_2 + R_3} - \frac{V_o}{V_{cc}}} - R_1. \quad (4.2)$$

El voltaje emitido por el puente aumenta conforme lo hace resistencia del sensor RTD, debido a que el incremento es muy bajo, es necesario amplificar la señal para aprovechar eficientemente la resolución del convertidor analógico digital del sistema de lectura, por ejemplo; para un voltaje de 0.4035 se tiene una temperatura de 110°C, suponiendo que el rango de temperatura va de 0 a 200°C, y el ADC trabaja de 0-5 Volts, se estaría desperdiciando más de un 84 % de la capacidad de lectura, para ello se utiliza el amplificador de instrumentación, el cual puede configurarse para amplificar una señal diferencial de entrada con bajo porcentaje de ruido, si la señal se amplifica con una ganancia de $A = 10$, el voltaje máximo será de 4.03 Volts. Con el cual se puede hacer una lectura más exacta, en la figura 4.9 se observa como voltaje V_o se conecta a la entrada inversora y no inversora del amplificador, con lo que se tendría en la salida del amplificador la señal amplificada V_oA , donde A es la ganancia y esta dada por la ecuación 4.3,

$$A = \frac{100K\Omega}{RG} + 1, \quad (4.3)$$

ideal para un rango de temperaturas de 0 a 100°C $A = 10$ y $RG = 11K\Omega$, y para un rango de temperaturas de 0 a 220°C $A = 5$ y $RG = 25K\Omega$.

Para calibrar y corregir la desviación de temperatura leída por el sensor y sistema de adquisición de datos, se utilizó como patrón el calibrador compacto AMETEC CTC-140A (ver Figura 4.10a), el equipo contiene una cavidad donde se introduce el sensor, y se mantiene a una temperatura fijada por el usuario, en la figura 4.10b se observa la respuesta del sensor ante el barrido de temperatura.

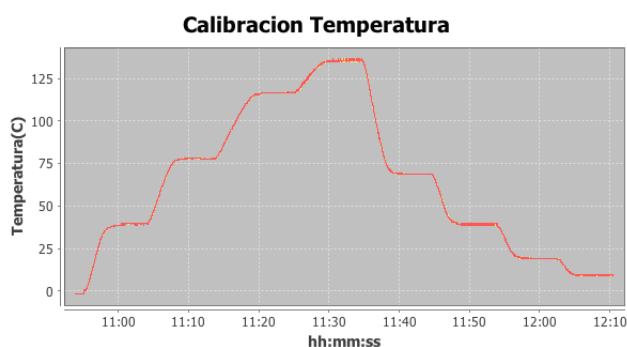
Hecho lo anterior se gráfico la información y mediante una regresión lineal (Ecuación 4.4) se obtuvo una ecuación para ajustar o disminuir la incertidumbre del sensor.

$$f(x) = a_0 + a_1x \quad (4.4)$$

donde $f(x)$ es la temperatura corregida, a_0 y b_1 son constantes y x es la temperatura leída por el sensor.



(a) Calibrador de temperatura.



(b) Barrido de temperatura del sensor RTD.

En el sistema se obtuvieron un total de 18 sensores de temperatura, los cuales al compararlos con la señal de referencia, mostraron un error de 2 a 4°C arriba de la referencia, tal y como se muestra en la gráfica de la Figura 4.10, en la Tabla 4.3 se muestran las constantes de la ecuación para cada sensor.

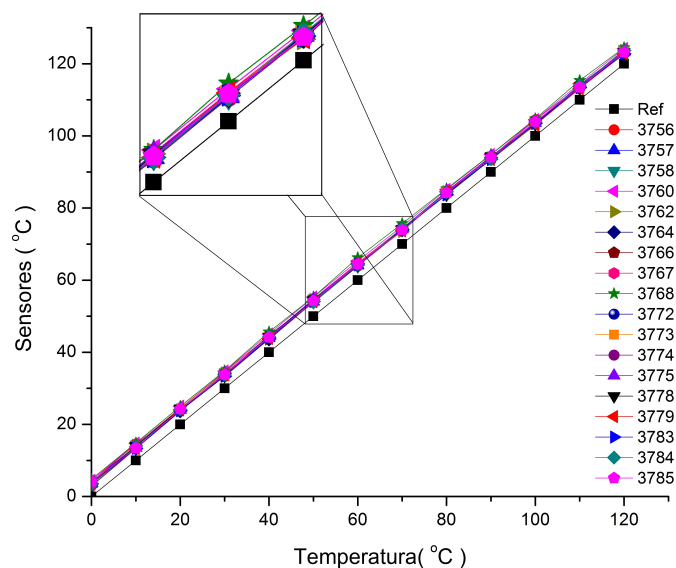


Figura 4.10: Respuesta de los sensores de temperatura RTD comparados con la del patrón.

Tabla 4.3: Constates de ecuación de corrección para cada sensor de temperatura RTD.

# de serie	a_0	a_1	R
3756	-4.42606	0.99839	1
3757	-4.01298	0.99971	0.99999
3758	-3.89758	1.00014	1
3760	-4.99383	1.00257	0.99992
3762	-4.09212	1.00194	0.99986
3764	-3.63241	1.00004	0.99981
3766	-4.09015	1.00104	0.99986
3767	-4.38385	1.00184	0.99993
3768	-3.95292	1.00245	0.99989
3772	-3.94699	1.00061	0.99991
3773	-4.10618	1.00395	0.99984
3774	-3.68063	1.00001	0.99988
3775	-4.00035	0.9994	0.99983
3778	-4.18549	1.00523	0.99986
3779	-3.94762	1.00444	0.99978
3783	-3.82439	1.00302	0.9999
3784	-3.93982	0.99974	0.99992
3785	-4.1679	1.00331	0.99991

4.2.3.2. Transmisor de flujo

El indicador y transmisor de flujo marca Endress+Hauser modelo Promag-50 (50H04-CA0A1AA0BAAA), el cual provee una señal lineal de salida de $4 - 20\text{ ma}$ proporcional al flujo de $0 - 4\text{ l/s}$, la temperatura del fluido de trabajo máxima es de 180°C con una presión máxima de 580 psi (40 bars), (ver Figura 4.11). El transmisor de flujo de efecto Coriolis modelo CMF025M313NQBUSZZZ es capaz de medir flujo másico y densidad, este genera 2 señales 4 a 20 ma que corresponde 0 a 18.4 kg/hr y 0 a 5 g/cm^3 , su temperatura máxima es de 240°C a una presión de 850 psig (58 bars).

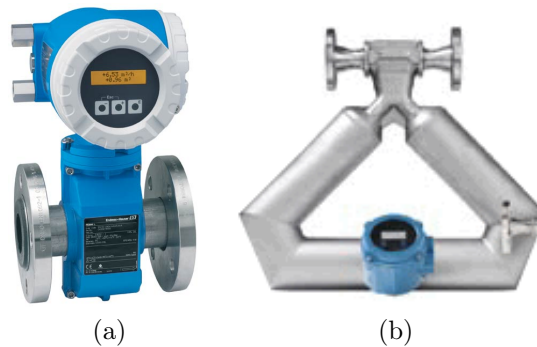


Figura 4.11: Indicador y transmisor de flujo volumétrico.

El convertidor analógico del sistema de medición puede recibir señales de 0 a 5 *volts*, los sensores de flujo ofrecen señales de ofrece de 4 – 20 *ma*, para transformar de corriente a voltaje se utiliza una resistencia de carga que fácilmente puede ser calculada por medio de la ley de ohm,

$$R_i = \frac{V}{I} = \frac{5v}{20ma} = 250\Omega, \quad (4.5)$$

dando como resultado el circuito de la figura 4.12, que arroja un voltaje de salida de 1 a 5 *v*, cabe notar que cuando alguna salida sea > 1 *v*, es por que hay un problema en dicho sensor.

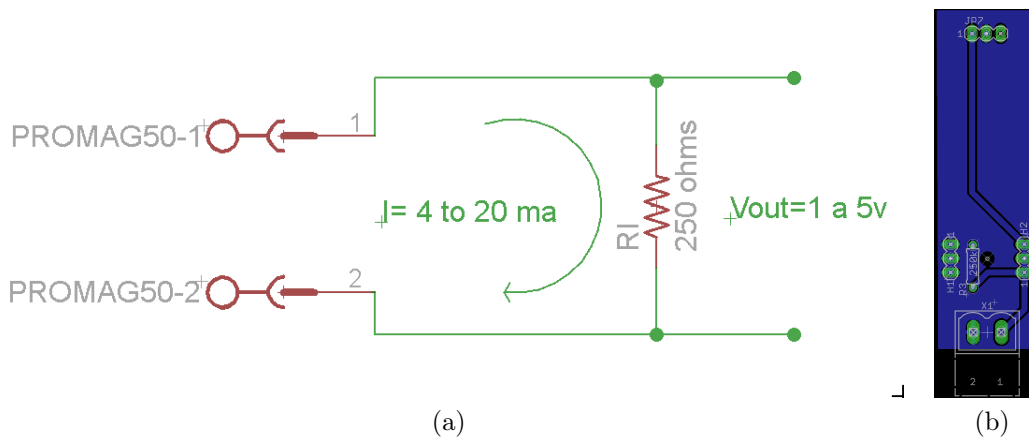
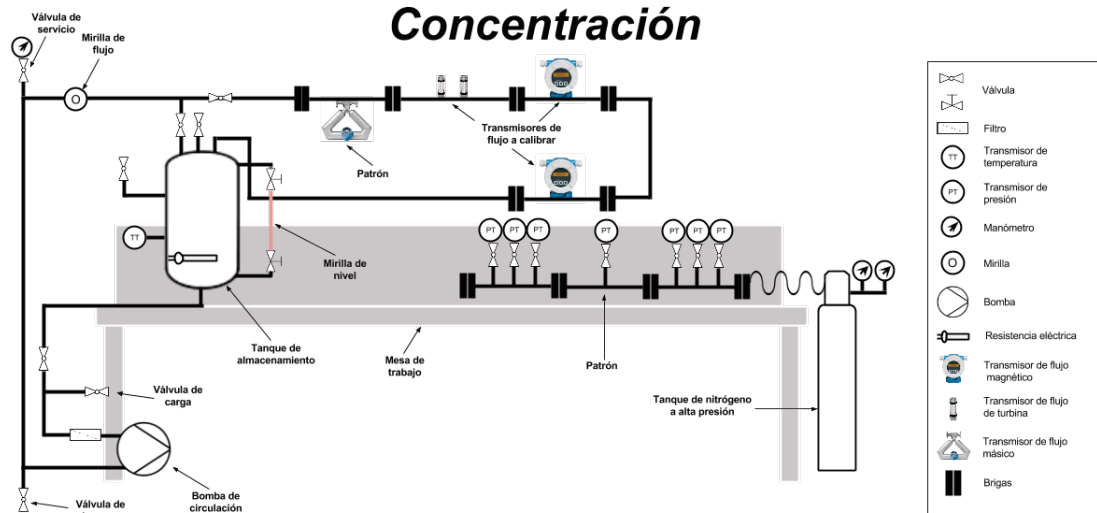


Figura 4.12: Acondicionamiento para convertir de corriente a voltaje.

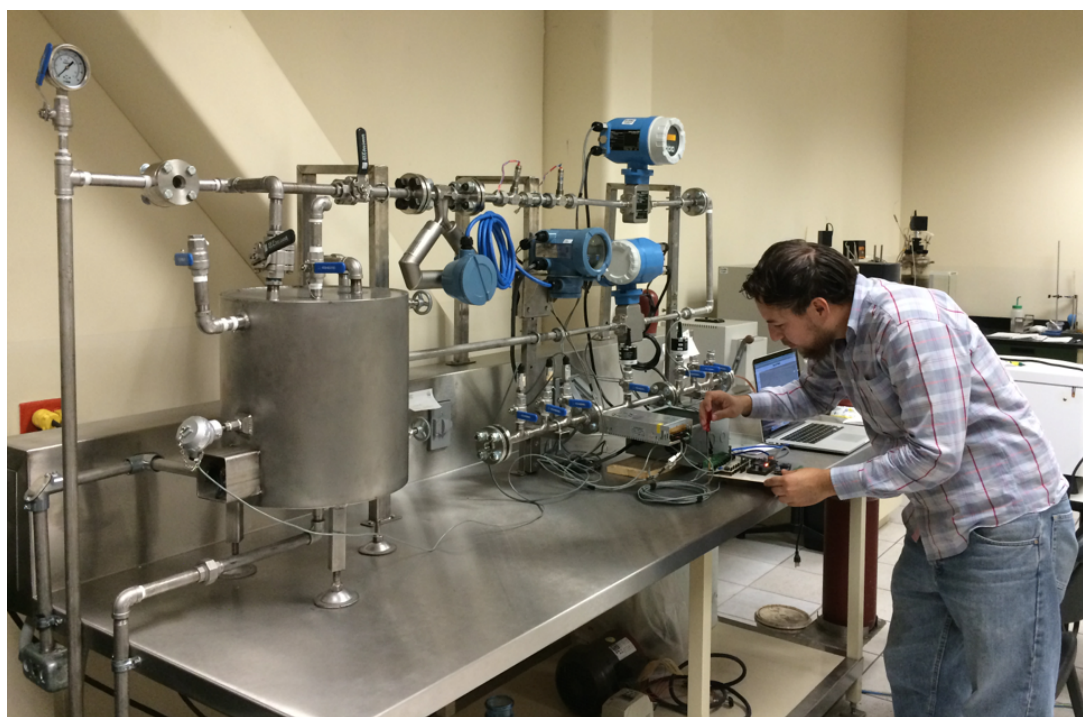
Para calibrar los sensores de flujo fue necesario diseñar y construir el banco de calibración de la figura 4.13a, que se compone de una bomba de circulación, un tanque de agua, tubería para interconectar los elementos y accesorios como válvulas de carga y descarga, mirillas de flujo y nivel, válvulas de servicio para manómetro y un múltiple para la conexión del sensor de flujo patrón (efecto Coriolis) y los sensores a calibrar (magneticos). El flujo de los sensores se varia con las válvulas de servicio superior de entrada del tanque y la entrada al múltiple. En la figura 4.13b se ilustra una imagen del banco de calibración ya terminado y la realización de calibración.

En la figura 4.14 se muestra la lectura desde la utilidad de monitoreo y adquisición de datos, se puede ver claramente como se realizó un barrido del flujo máximo al mínimo, evidentemente se ve que el patrón tiene un mejor tiempo de respuesta, sin embargo una vez estabilizados, la medición prácticamente es la misma. Los resultados son los esperados, ya que ambos sensores son de una marca con renombre y vienen calibrados de fabrica, el procedimiento de calibración da certidumbre que el sensor patrón y el magnético 2 trabajan perfectamente, a diferencia del magnético 1 que por defecto deja de funcionar abajo de los 0.75 *l/s*.

Banco de Calibración de Flujo, Temperatura y Concentración



(a)



(b)

Figura 4.13: Banco de calibración de flujo, presión, temperatura y concentración.

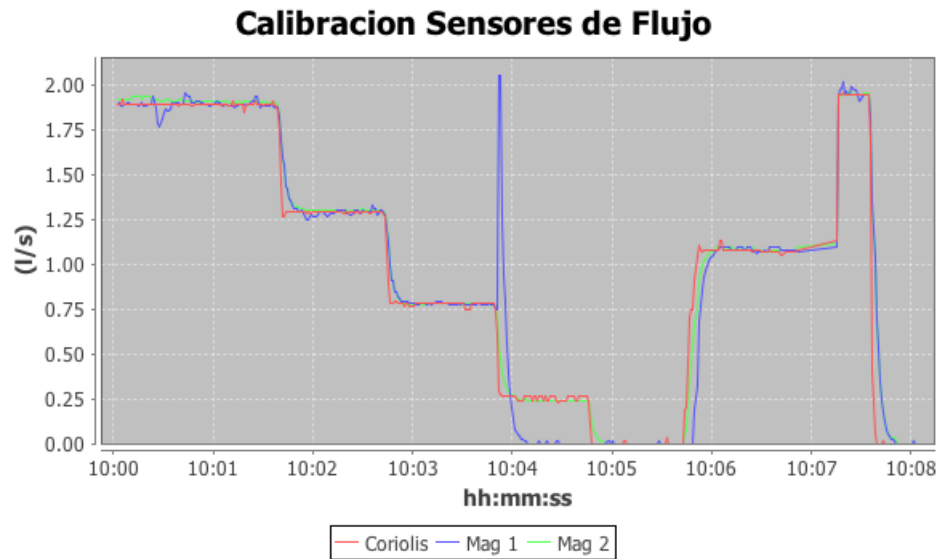


Figura 4.14: Lectura del barrido de flujo en la utilidad de monitoreo.

4.2.3.3. Indicador y transmisor de flujo

el indicador y transmisor de flujo marca Dwyer modelo SFI-8013/4 con sensor A-712 utilizado en el circuito de agua fría, 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 4.15. El flujo se determina por la Ecuación 4.6.



Figura 4.15: Indicador y transmisor de flujo volumétrico.

$$\text{Flujo} = \frac{\text{Voltaje}}{0.28}. \quad (4.6)$$

La salida del sensor puede poner en peligro al controlador, ya que el máximo voltaje por el microcontrolador es de 5 V, debido a esto la señal es acondicionada con el circuito electrónico de la figura 4.16.

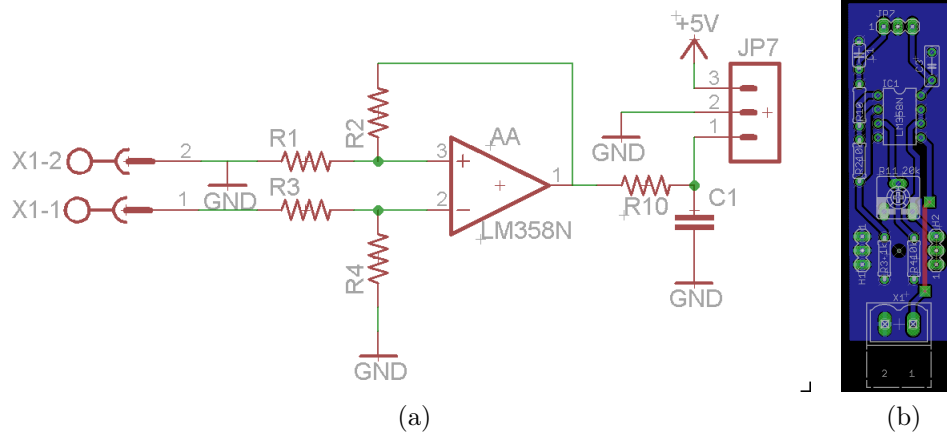


Figura 4.16: Acondicionamiento de señal para el indicador de flujo.

Que consta de un amplificador en configuración restador modelado con la ecuación 4.7,

$$V_{out} = \frac{R_f}{R_i} (V_{i_2} - V_{i_1}) \quad (4.7)$$

donde la entrada no inversora corresponde a la señal del transmisor para atenuarlo con una ganancia de $A = 0.5$,

$$A = \frac{R_f}{R_i} = \frac{1}{2}, \quad (4.8)$$

cumpliendo con la ecuación 4.8 se propone $R_f = R_4 = R_2 = 500\Omega$, despejando $R_i = R_3 = R_1$ de ecuación 4.7, 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 0.5 corresponde a 5 volts, el cual se encuentra dentro del rango del voltaje de operación del microcontrolador.

4.2.3.4. Transmisor de presión

Marca Dwyer que va de 0 a 1000 psi con una señal proporcional de 0 a 5 vcd y una precisión $\pm 0.25\%$ de la escala total, en la Figura 4.9 se observa como la forma del instrumento permite instalarse en una toma de una tubería de 1/2".



Figura 4.17: Transmisor de presión Dwyer.

De acuerdo a la señal de salida no es necesario realizar ningún tipo de acondicionamiento. La presión se puede determinar con una interpolación de primer orden, dada por la Ecuación 4.9, donde $x = \text{voltaje proveniente del sensor}$, $x_1 = 0v$, $x_2 = 5v$, $y_1 = 0psi$ y $y_2 = 1000psi$, sustituyendo finalmente nos queda la siguiente ecuación

$$Flujo = 0 + (x - 0) \frac{(1000 - 0)}{(5 - 0)}. \quad (4.9)$$

La calibración de los sensores de presión se llevo a cabo en el banco de calibración de la figura 4.13 antes mencionado, el cual contiene un tanque de nitrógeno de alta presión conectado a un múltiple con válvulas, para conectar los transductores de presión. En la figura 4.18 se muestra el barrido característico para efectuar el proceso de calibración, el tiempo de respuesta entre el patrón y los sensores a calibrar es muy similar

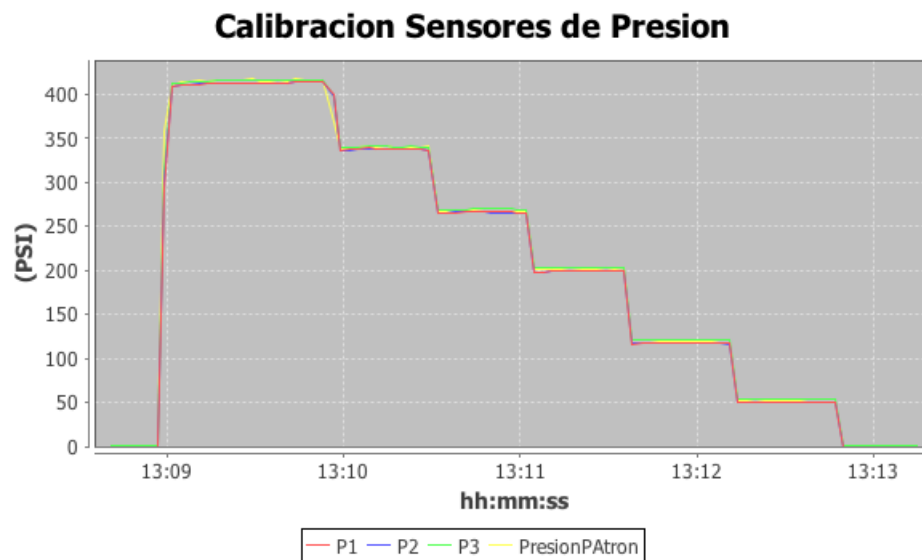


Figura 4.18: Lectura del barrido de presión de los sensores de flujo en la utilidad de monitoreo.

En base a los datos recolectados se realizó un ajuste con una ecuación de primer orden, muy similar a la hecha con los sensores RTD, las constantes de calibración se muestran en la tabla 4.4.

Cuadro 4.4: Constates de ecuación de corrección para cada sensor de presión.

# de serie	a_0	a_1	R
P1	1.0794	0.00192	1
P2	0.9817	0.00276	0.99
P3	0.9557	-0.90148	0.99

Válvulas solenoides marca DEWIT modelo W-220, utilizadas para redireccionar flujos en el circuito hidráulico de agua fría, son válvulas con cuerpo y resorte de acero inoxidable y núcleo de teflon, con una temperatura de trabajo de -10 a $180^{\circ}C$ y una presión de $6 - 200 PSI$. Cuando la válvula está desenergizada el resorte del núcleo presiona contra el orificio piloto cerrándolo, la presión sobre el disco se crea mediante el orificio de compensación, el disco cierra el orificio principal mientras la presión de linea se aplique sobre el disco, por lo que en tanto la válvula esté desenergizada permanecerá cerrada. Al momento de energizar la válvula con $120 VCA$ el orificio piloto se abre, como el orificio piloto es mayor que el orificio de compensación, la presión sobre el disco cae por lo que el orificio principal se abre, la válvula estará abierta en tanto esté energizada y la presión diferencial mínima se mantenga.



Figura 4.19: Válvula proporcional de 3 vías.

Válvula proporcional de 3 vías la válvula proporcional de 3 vías, es marca Belimo y mostrada en la figura 4.20, es controlada electrónicamente con una señal de $2 - 10 VCD$, puede trabajar en modo divisor y mezclador, la alimentación para la válvula es de $24 VCD$, además cuenta con una señal de salida de $2 - 10 VCD$ 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 $95 s$.



Figura 4.20: Válvula proporcional de 3 vías.

4.2.3.5. Bomba de solución

Consta de un motor marathón electric de 1/2 HP con tres fases a 220 V a 1725 RPM, para conmutar y variar su velocidad se utilizó un variador de frecuencia marca WEG modelo CFW-08 de 1 HP. En la figura 4.21a se ilustra que aunque el motor es de tres fases, la conexión del variador de frecuencia puede ser monofónica a 220 V. La configuración del variador de frecuencia permite controlar la frecuencia/velocidad del motor desde el tablero local, sin embargo cuando esta en modo remoto, se manipula desde una entrada analógica (AI1) de 0-10volts equivalente de 0-60Hz (ver figura 4.21b), la entrada digital DI1 esta conectada a común para habilitar permanentemente al variador, el paro o marcha se da con un 0 o 1 lógico dado a la entrada digital, no es necesario controlar el sentido o giro ya que la aplicación no lo requiere.

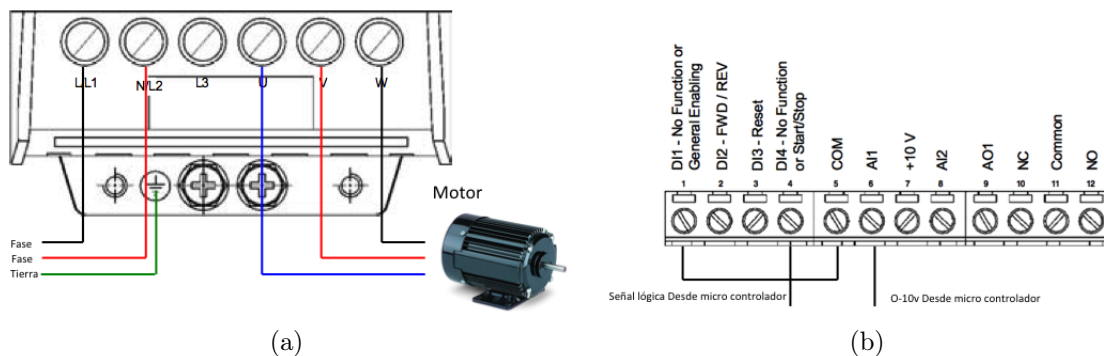


Figura 4.21: Conexiones de potencia y control del variador de frecuencia.

4.2.3.6. Elementos de potencia

Se requieren para manipular la conmutación de ciertos dispositivos como; la manejadora de aire, el quemador de gas, la bomba de circulación de agua fría, para

ello se diseñó un circuito que aísla la señal de control de la de potencia, mediante 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 o apagar actuador de potencia, el circuito puede observarse en la figura 4.22. El circuito descrito previamente, es utilizado para activar un dispositivo en corriente alterna, de requerir conmutar algún dispositivo en corriente continua, se cambiaría el relevador LY30 por la carga, y se obtendría un relevador de estado solido en corriente directa.

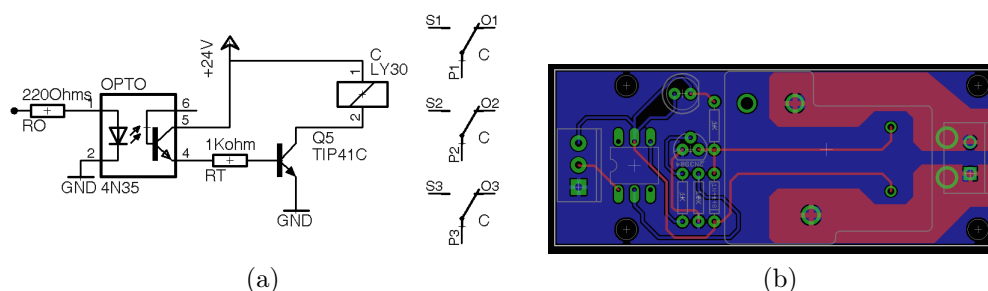


Figura 4.22: Etapa de acondicionamiento para interruptores magnéticos.

4.2.3.7. 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 obteniendo buenas experiencias, por ello se realizó una búsqueda en las familias de los diferentes tipos de microcontroladores 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*), además de conexiones nativas para puertos usb y ethernet. Sin duda estos dos últimos puntos, fueron de vital importancia. El microcontrolador elegido fue el fue utilizado el Atmel Atmega2560, que puede ser obtenido en una de las tarjeta de ensamble más populares de la plataforma arduino Mega 2560, ya que es uno de los modelos más poderosos con 256Kb de memoria flash y más de 70 pins de salidas, además que es una plataforma en desarrollo constante y con un gran número de accesorios llamados “shields” (ver Figura 4.23).

La conexión a red del arduino mega2560 se realiza de Ethernet Shield, está se basa en el chip ethernet Wiznet W5100, el cual provee dirección de red IP capaz de utilizar protocolos TCP y UDP. Soporta hasta cuatro conexiones de sockets simultáneas. El shield incluye una ranura de tarjeta SD utilizada para guardar la configuración y los datos adquiridos en modo aislado.

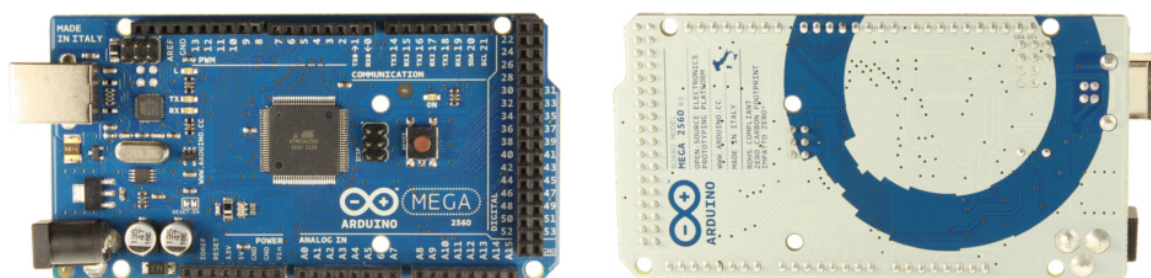


Figura 4.23: Tablero de demostración PIC32 Ethernet Starter Board y expansión.

4.2.4. Firmware

La programación de cada módulo genérico para adquisición, automatización y control, que se convertirá en el controlador individual de cada entidad u objeto, se baso en el software de la plataforma Arduino 1.05 y librerías disponibles compatibles con el hardware utilizado. En la figura 4.24 se despliega el diagrama a clases de todo los objetos que conforman el sistema de automatización, control y adquisición de datos, se pudiera catalogar como principal objeto el de AguaFria, debido a que es el encargado de coordinar o enviar comandos y peticiones a Absorción, CampoSolar y Seguimiento.

Los demás objetos son herramientas que ayudaran a realizar tareas y acciones incluidos en los objetos principales, por ejemplo, el objeto sensor es el encargado de leer la señal de voltaje de un canal analógico específico, y elegir la ecuación adecuada según el tipo, característica y categoría, para convertir ese valor de voltaje en la medición real, aunado a lo anterior el método defectuoso o alarma verifica si el sensor genera un valor fuera de sus limites físicos o personalizado, si así es es, se genera un mensaje de error que ayuda a ubicar directamente alguna anomalía. El sensor puede sufrir cambios físicos que provoquen que el valor emitido se aleje del real, anteriormente se mostró el procedimiento de calibración que da como resultado las constantes de una ecuación de primer o segundo orden, las cuales pueden introducirse fácilmente en el objeto polinomio para corregir el valor final. El voltaje entre el sensor y el dispositivo de medición, se pude ver afectado por ruido eléctrico, provocando que el valor oscile entre el valor arrojado por el sensor, para ello se utilizaron filtros analógicos en algunas etapas de acondicionamiento, sin embargo, se consideraron filtros digitales que complementan esta acción. El objeto Filtro se crea a partir de la librería Filter Jeroendoggen (2008), que incluye el filtro Bessel, Chebychev y la Media aritmética de primer y segundo orden. En la gráfica de la figura 4.25, se muestra la respuesta original de un sensor de temperatura RTD y la modificada con los filtros ya mencionados, como se esperaba los filtros de primer orden Bessel y Chebychev tienen un filtrado más marcado y se nota los escalones por el efecto de discretización, aunado a ello se tiene un error en estado estable de la medición en algunos puntos. La media de 1er orden se comporta como la señal original pero un poco desfasada, la media de 2do orden tiene un buen comportamiento más su cálculo lleva más tiempo y poder de cálculo que las opciones restantes.

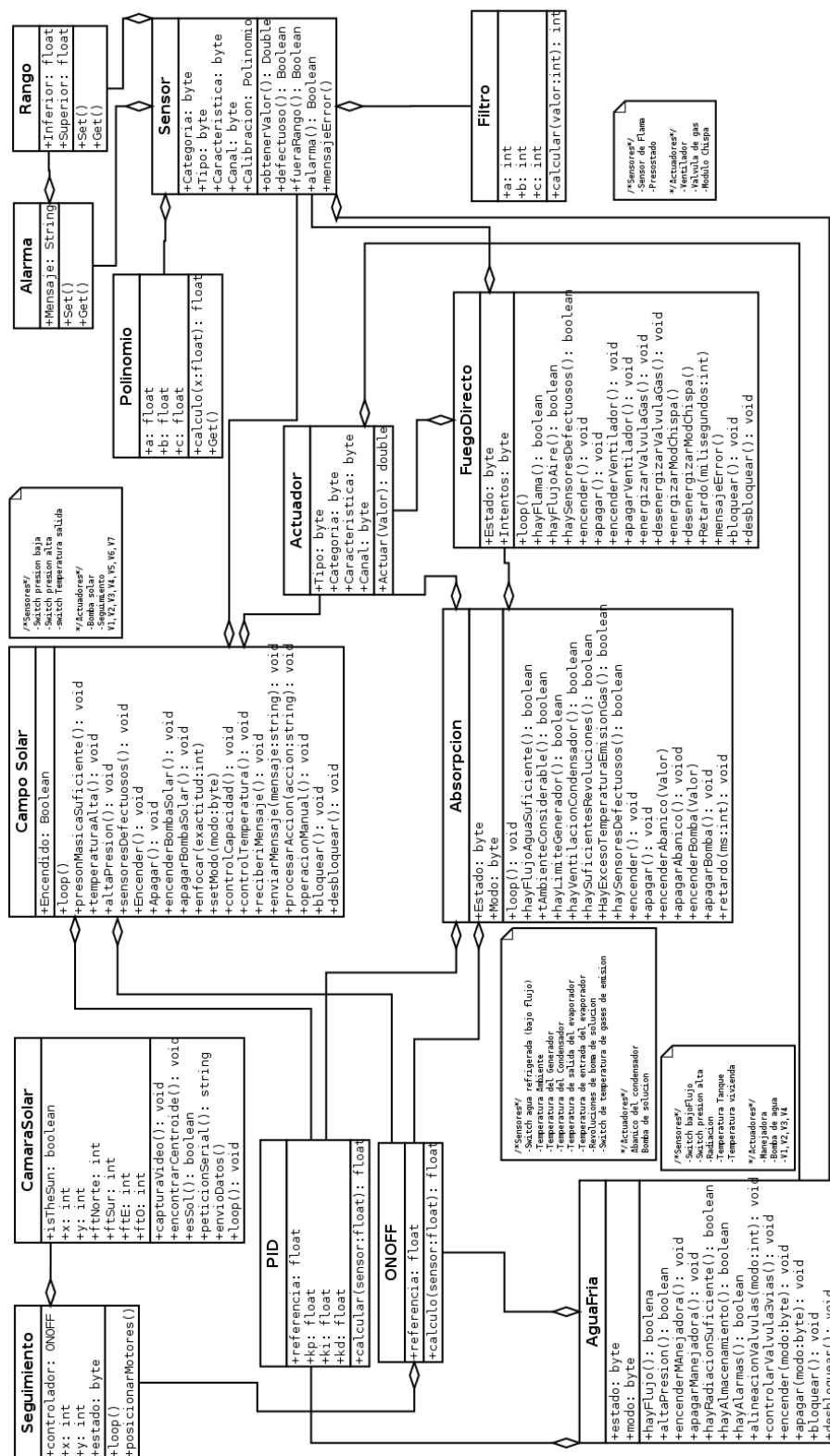


Figura 4.24: Diagrama de clases de los diferentes dispositivos que componen la automatización y control.

El Bessel de 2do orden tiene un buen comportamiento, sin embargo, el Chebychev se ajusta mejor a la señal original. En la figura 4.26 se muestra en un acercamiento la señal original y su equivalencia en filtro por la mejor opción, claramente se ve como atenúa las oscilaciones con un buen tiempo de respuesta, debido estas pruebas se utilizó el filtro el Chebychev de 2do orden, quien tubo el mejor desempeño en el filtrado de la señal. En pocas palabras se modelo un sensor como un objeto de la vida real, que puede realizar lecturas con eliminación de ruido, con capacidad de autodiagnostico y calibración, lo que es clave para cada controlador del sistema.

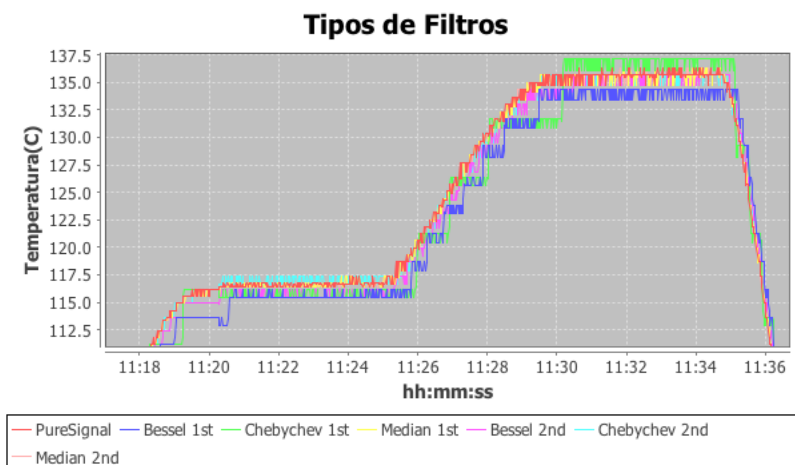


Figura 4.25: Respuesta de salida con diferentes filtros de un sensor de temperatura tipo RTD.

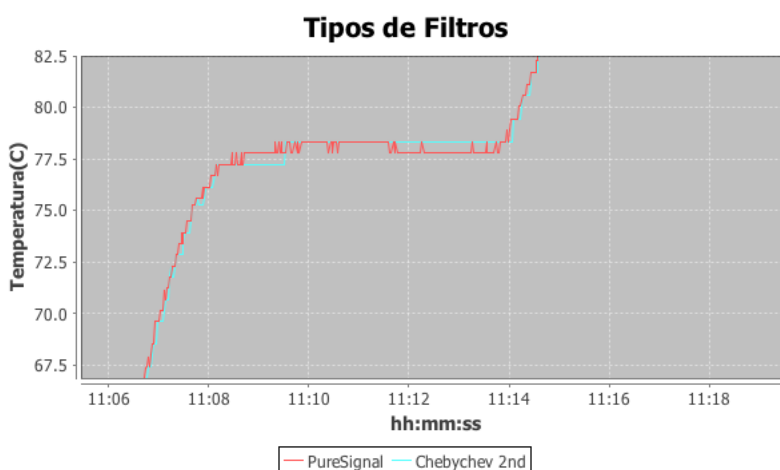


Figura 4.26: Respuesta de salida de un sensor de temperatura tipo RTD y su respuesta con filtro Chebyshev.

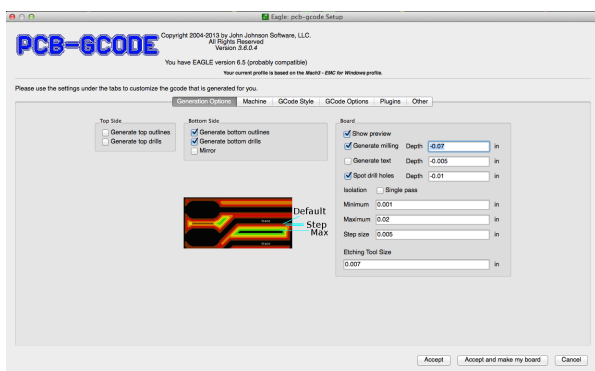
El punto medular de los dispositivos de control es el algoritmo, en esta arquitectura se incluyo un clásico controlador On-Off con histeresis, para válvulas solenoides o

encendido de equipos. El control de elementos como el variador de frecuencia y la válvula proporcional de 3 vías, se realizó con un controlador Proporcional, Integral y Derivativo, implementando la librería Beauregard (2012), por último se modeló el actuador de la manera más sencilla posible, se configura el tipo de actuador, el canal de salida, ya sea digital o análogo, para ejecutar la acción se llama al método actuar, el cual regularmente recibe la señal de salida del algoritmo de control, logrando manipular la variable de control.

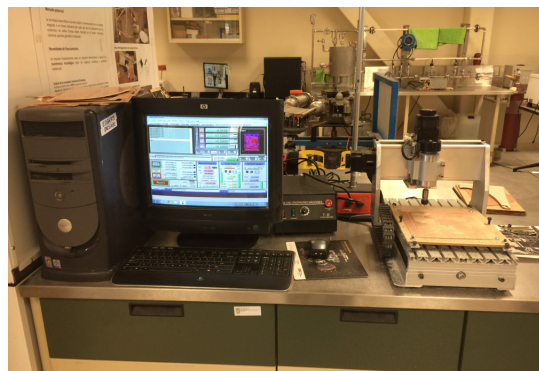
Los objetos de utilidad (sensor, algoritmo y actuador) se incluyen en cada objeto que representa un controlador, de esta forma se programa de una manera más ordenada y con el enfoque de automatización y control.

4.2.5. Fabricación de los circuitos impresos

Una vez terminado el diseño electrónico computarizado del circuito impreso, da como resultado la plantilla de cada circuito mostradas anteriormente. A partir de esas plantillas hay varios métodos de fabricación, en este trabajo se explicará la fabricación de circuitos impresos con un equipo CNC. El primer paso es crear el Código-G (G-Code), ya que son las instrucciones que indican al equipo CNC donde debe grabar las pistas (rutear), con la ayuda del software Eagle 6.6 y la librería pcb-gcode-3.6.0.4, se presiona el botón para correr un archivo UPL en modo tablero (board), se selecciona el archivo pcb-gcode-setup.upl en el cual desplegó la ventana de configuración como se muestra en la figura 4.27a, aceptado y procesado la librería genero tres archivos, el primero de ellos es el ruteo de las pistas (proyecto.etch.tap), el segundo indica las perforaciones del tablero (proyecto.drill.tap), y el tercero indica los cortes o contorno del circuito impreso (proyecto.mill.tap). En la figura 4.27 se muestra la mesa de trabajo que contiene la CNC CNC3020 y el equipo de computo con el software Match3, es importante recalcar que el proceso de nivelación de la cama donde se colocara la CNC es de vital importancia, ya que pueden quedar rutas sin marcar.



(a)



(b)

Figura 4.27: Software y hardware en mesa de maquinado de PCBs.

En la Figura 4.28a se muestra la fase de ruteado de la placa de cobre, que dio vida a las etapas de acondicionamiento de los sensores, en la figura 4.28b se ve como es necesario limpiar la rebaba para verificar el proceso de maquinado. Una vez terminado el grabado de pistas, se cargo el archivo de perforación y el cambio de su respectiva broca, una vez que el equipo realizó todas las perforaciones del mismo diámetro, se posiciono en pose de descanso para el cambio de broca, finalizado el proceso se cargó el archivo de corte y el cambio de su respectiva broca para dar el acabado final de la fabricación de la placa.



Figura 4.28: Grabado de las placas de las etapas de acondicionamiento y módulo genérico de monitoreo y control.

El último paso es el ensamble de conectores y terminales que se soldaron manualmente, se verificó que la superficie estuviera libre de impurezas, la soldadura con alma de resina ayuda a la fluidez y adherencia de la soldadura, el cautín con temperatura regulable evita el sobre calentamiento de las pistas del circuito y su desprendimiento de la baquelita. En la figura 4.30a se muestra la imagen final de las diferentes etapas de acondicionamiento de señales, en la figura 4.30b se ilustra el acabado final y el ensamble de las etapas de acondicionamiento del módulo genérico de monitoreo y control, que cuenta con 16 entradas analógicas de 10 bits y su respectivo espacio para las etapas de acondicionamiento, 8 en la placa principal y 8 más en una extensión llamada segundo piso, 6 salidas moduladas por ancho de pulso y 14 entradas-salidas digitales de uso general, en estas ultimas el acondicionamiento se realiza individual y por fuera de la placa principal.

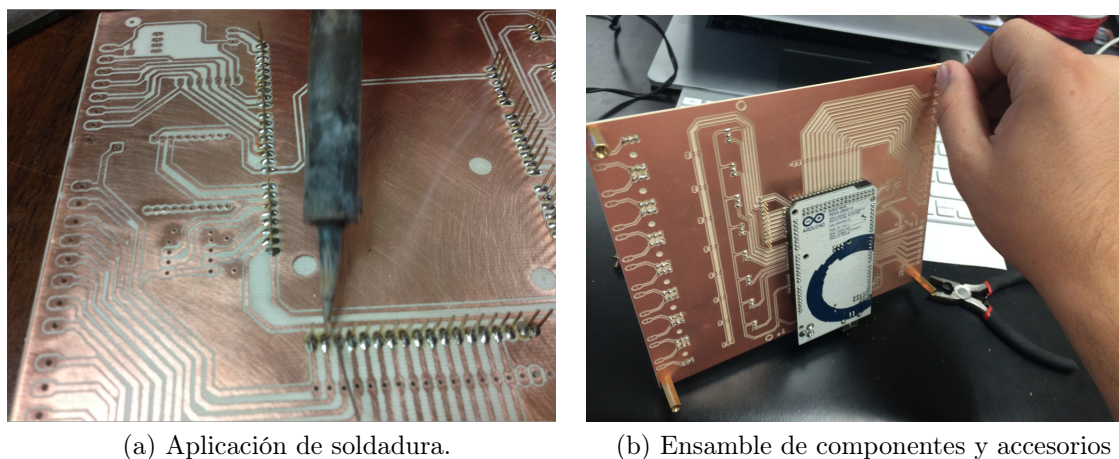


Figura 4.29: Soldado y ensamble de componentes del módulo genérico de monitoreo y control.

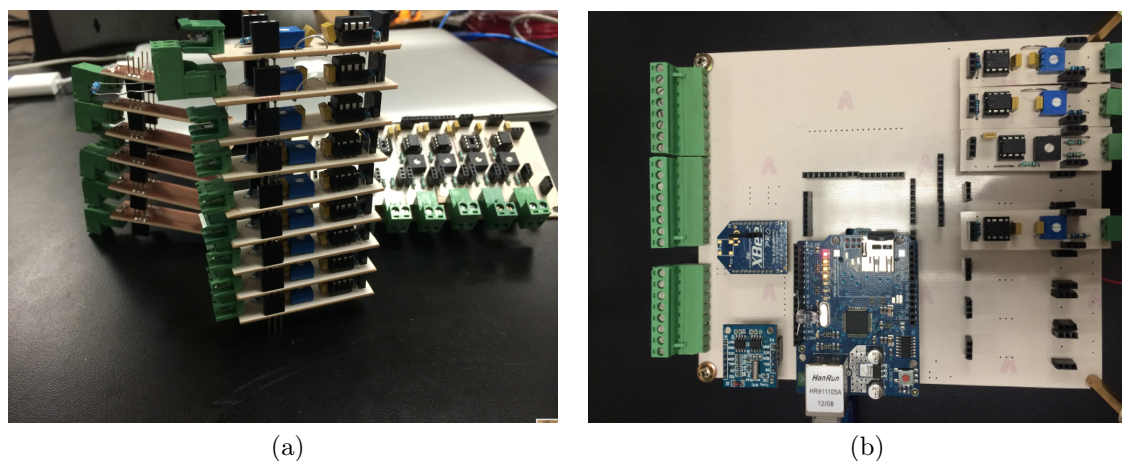


Figura 4.30: Etapas de acondicionamiento y módulo genérico de monitoreo y control terminados.

4.3. Sistema de seguimiento solar

El sistema de seguimiento es un dispositivo electrónico que permite controlar una estructura electromecánica en uno o dos ejes, con el fin de seguir el movimiento aparente del sol. La implementación de hardware se lleva a cabo con el arduino mega 2560, Atmel (2011). En la figura 4.31a se ilustra como la arquitectura del sistema de seguimiento solar se interconecta a una serie de periféricos que conforman la interfaz de usuario, sensores y una etapa de potencia. En la figura se ilustra el tablero o shield de SSS para arduino Mega, que permite conectar los diferentes elementos ya mencionados.

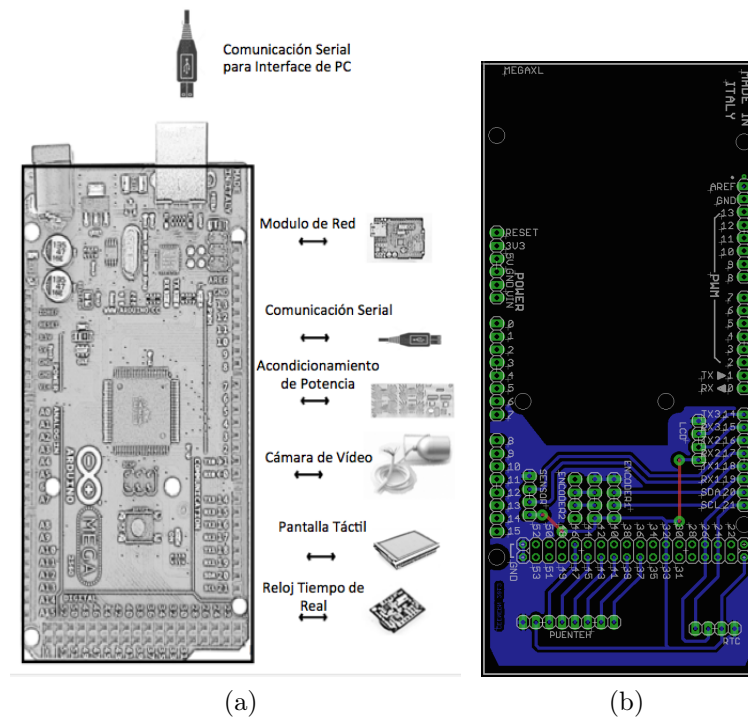


Figura 4.31: Arquitectura del sistema de seguimiento.

4.3.1. Interfaz de usuario

La interfaz de usuario consiste en una pantalla táctil de cristal líquido, que se comunica por el puerto serie con el microcontrolador para visualizar y navegar por el siguiente menú de opciones :

1. Marcha automática del seguimiento solar.
2. Modo manual para operar en eventos aislados, ya sea para el mantenimiento o el ajuste de la electromecánica estructura .
3. El ajuste de parámetros tales como el tiempo, fecha, velocidad del motor y datos de la red .

Con el fin de facilitar el establecimiento de parámetros y la selección de opciones de control del ordenador a la interfaz de usuario, se realiza a través del puerto USB o un módulo de red (Ethernet o Wi-Fi). La interfaz se puede controlar de forma local o remota a través de una aplicación con el protocolo de petición y respuesta descrito previamente, que permite al dispositivo ser adaptado a nuevas aplicaciones, por ejemplo, en el caso de un sistema fotovoltaico, el microcontrolador puede leer todos los sensores y enviar datos a través del puerto serie de trabajo como un esclavo manipulado por una segunda o tercera controlador principal. El reloj de tiempo real (RTC) para ejecutar con exactitud algoritmos de posicionamiento del Sol basados en ecuaciones, sincronizar dispositivos de almacenamiento de datos y los dispositivos de comunicación en serie.

4.3.2. Etapa de potencia

Los motores que mueven la estructura que proporciona el seguimiento, se mueven a través de una etapa de potencia que contiene 3 entradas, las primeras dos controlan el encendido y giro, la tercera es una señal PWM (Pulse With Module) que se utiliza para variar la velocidad de los motores. Dichas señales se envían a un arreglo de circuitos integrados que verifican un un encendido valido, en la siguiente etapa se tiene optoacopladores para aislar la señales digitales de los circuitos de potencia, por último se tiene un tradicional puente H basado en transistores mosfet(ver. Fig. 4.32).

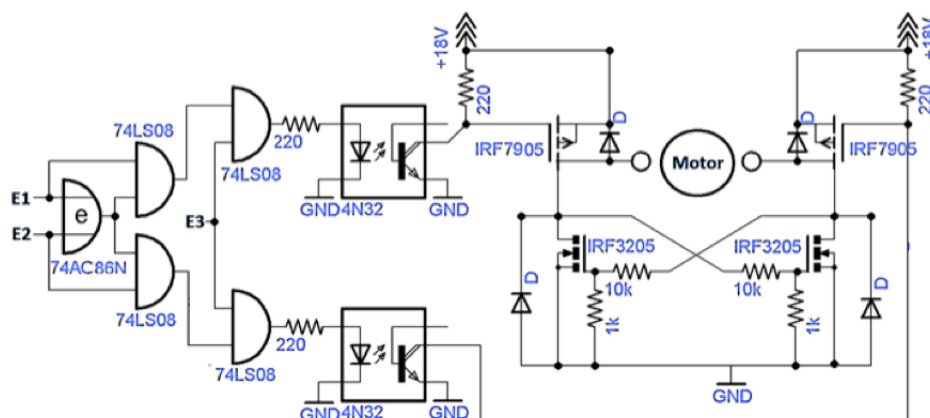


Figura 4.32: Diagrama esquemático de la etapa de potencia del SSS.

4.3.3. Sensor de seguimiento solar

En la Figura 4.33 se puede observar que el sensor de seguimiento solar se compone de una cámara de video NTCS, conectada al separador de vídeo LM1881 que detecta el tiempo de sincronización vertical y horizontal de la señal de vídeo compuesta. El comparador analógico del microcontrolador ATmega328 en el Arduino nano, es utilizado para detectar el brillo de la señal de vídeo en cualquier punto dado en el tiempo, con esta información se captura en memoria los pixeles que representan la imagen en un formato monocromático a baja resolución, como resultado se obtiene una matriz de 128x96 descrita como $img(x,y)$ Krumpus (Krumpus). En el lado izquierdo se observan 4 fototransistores con una resistencia de carga, el divisor de voltaje conectado a los canales análogos de microcontrolador es capaz de detectar la magnitud de radiación solar incidente sobre ellos..

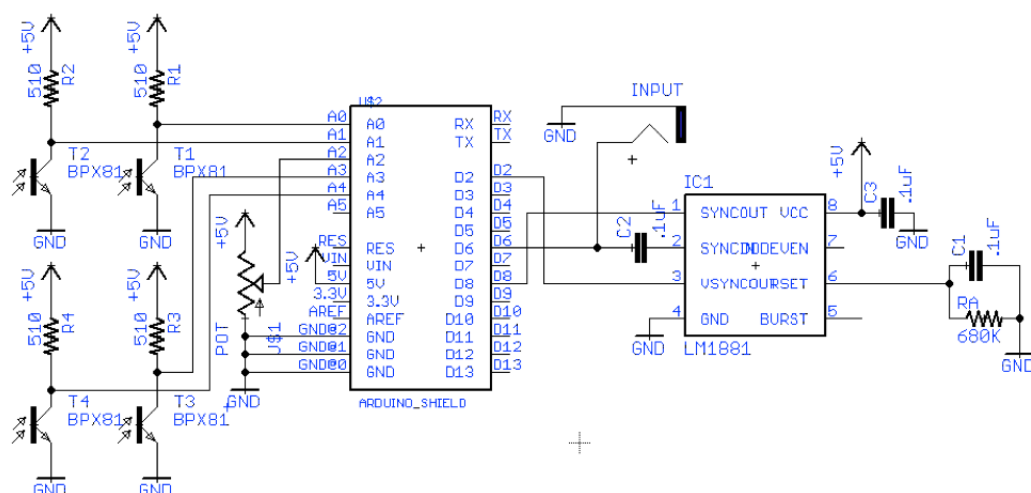


Figura 4.33: Circuito esquemático del sensor basado en procesamiento de imagen.

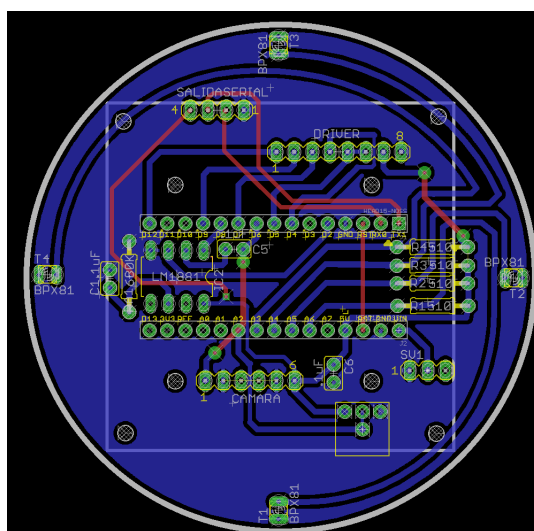


Figura 4.34: Circuito esquemático del sensor basado en procesamiento de imagen.

La figura 4.35 muestra un diagrama esquemático de la configuración física del sensor. La cámara de vídeo NTSC se encuentra dentro de una carcasa circular a prueba de agua para proteger contra condiciones ambientales. En la parte superior se colocó un filtro contra sol (darkening welding filter) para evitar la exposición directa de la radiación, ya que puede dañar o degenerar la vida útil del chip de video. En los costados se colocaron dos fototransistores por cada eje, para determinar la posición del sol cuando se encuentre fuera del ángulo de visión de la cámara.

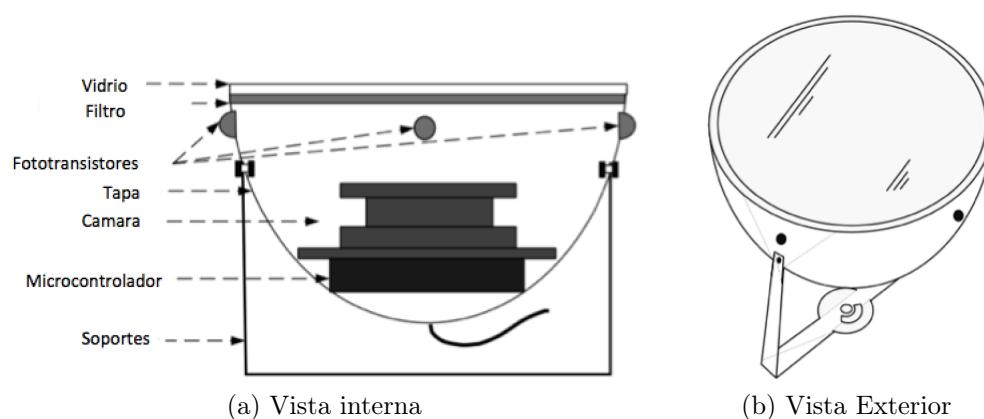


Figura 4.35: Descripción física del sensor

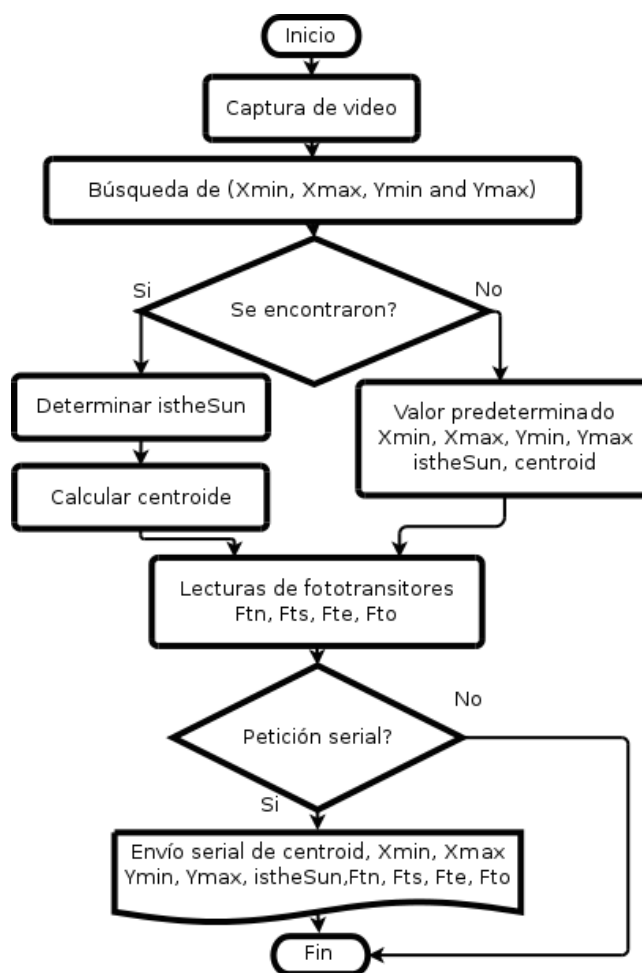


Figura 4.36: Diagrama de flujo de la operación del sensor basado en procesamiento de video.

El sensor de seguimiento solar consta de un microcontrolador atmega328 que ejecuta el algoritmo de la figura 4.36, en el primer paso se captura el frame de video actual, enseguida se determinan las cuatro posiciones (X_{min} , X_{max} , Y_{min} y Y_{max}) que definen la posición exterior del patrón reconocido en la imagen captada por la cámara, si dichos puntos son encontrados, se verifica si el patrón encontrado corresponde a la imagen del sol, para ello se verifica el ancho y largo del patrón, para corroborar si se trata de una geometría circular y diámetro adecuado, el cálculo del centroide $c(x,y)$ se realiza con promedios del área de interés, para calcular "X" se busca la posición central de cada renglón del patrón dentro de la matriz, después un promedio de ellos, para calcular "Y" se hace la misma operación para las columnas. Después del proceso de imagen, se captura el voltaje brindado de los fototransistores, por último se comprueba si hay una petición por el puerto serial, si la hay, se hace el envío de información. Este algoritmo se ejecuta de manera repetitiva para proveer de información en tiempo real.

4.3.4. Algoritmo de posicionamiento

La operación de algoritmo se basa en el diagrama de flujo mostrado en la figura 4.37. En la primera etapa, el microcontrolador envía una solicitud de comunicación en serie al controlador del sensor. Una vez establecida la comunicación, el Arduino Mega 2560 recibe del controlador de sensor de un paquete de información que contiene el centroide $c(x, y)$, y las posiciones exteriores (X_{min} , X_{max} , Y_{min} e Y_{max}), el valor de la variable "istheSun" y los valores de radiación solar tomadas por los fototransistores F_{tn} , el F_{ts} , F_{te} y F_{to} . Si la variable "istheSun" es el valor booleano "falso" el algoritmo utiliza los valores de los fototransistores para rastrear el sistema hasta que se alcanza el ángulo de visión de la cámara.

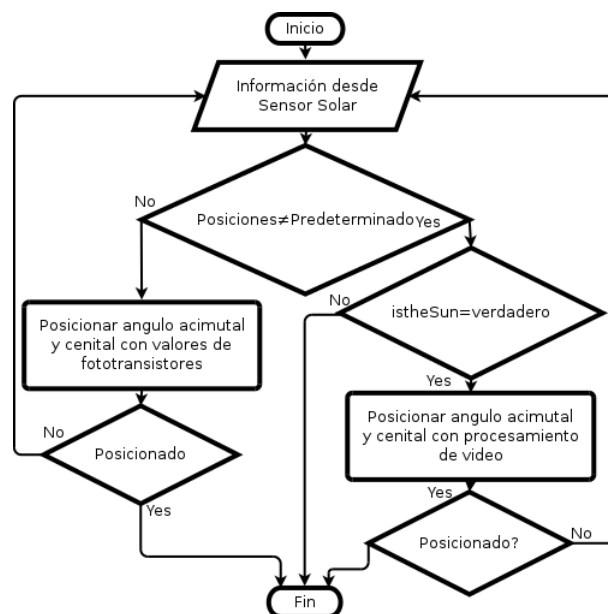


Figura 4.37: Algoritmo de posicionamiento solar.

4.3.5. Fabricación

En la fabricación de los circuitos impresos del SSS, se llevo a cabo el mismo proceso que en la sección 4.2.5, en la figura 4.38 se ilustra la inserción de componentes la placa del circuito del sensor del SSS maquinada en el equipo CNC, se el acabado del contorno, perforaciones y el grabado del impreso.

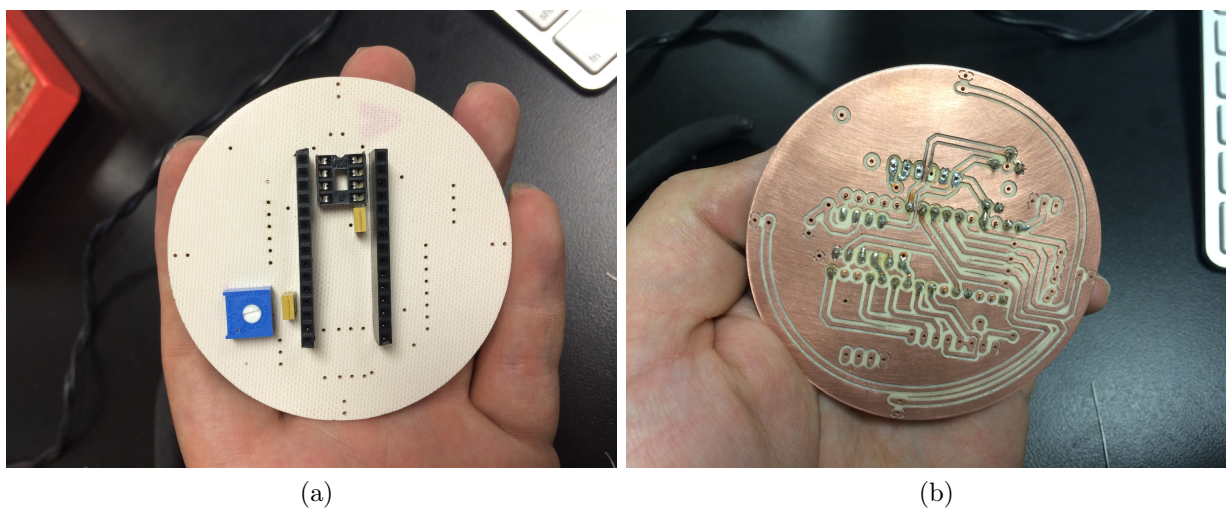


Figura 4.38: Inserción de componentes y aplicación de soldadura

En la figura 4.39 se observa la vista isométrica y de planta del sensor ya ensamblado, listo para insertarlo en la carcasa para petición del medio ambiente y su conexión con la interfaz de usuario y control.

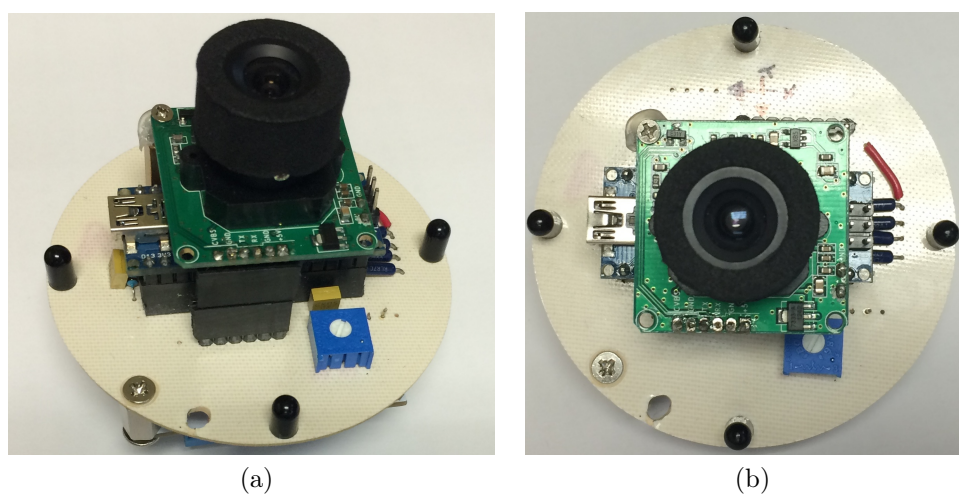


Figura 4.39: Vista isométrica y de planta del sensor del SSS.

En la figura 4.40 se ilustra el arduino Mega2560 que es el dispositivo que ejecuta el algoritmo de control, ensamblado con el shield de seguimiento solar, que permite conectar los sensores, la etapa de potencia y la pantalla táctil.



(a)



(b)

Figura 4.40: Dispositivo de control e interfaz de usuario del SSS.

Capítulo 5

Construcción e instrumentación de la planta piloto

En esta sección se explica la construcción de la planta experimental de la unidad de aire acondicionado solar, se detalla por medio de un diagrama de tuberías e instrumentación la ubicación e interconexión de los componentes, así como la instalación de actuadores y accesorios. Además se incluyen las pruebas, correcciones y modificaciones que se llevaron a cabo para poner a punto la planta experimental.

5.1. Diagrama de tuberías e instrumentación

En la figura 5.1 se observa el Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI, del acrónimo en inglés Piping and Instrumentation Diagram/drawing, P&ID) de la planta piloto del SAAS, en el cual se muestra el flujo del proceso en las tuberías, así como los equipos instalados e instrumentación de las configuraciones del campo de colectores, circuito hidráulico e instalación de biogás. En el diagrama se aprecian válvulas de cierre y tuercas unión en la entrada y salida de cada equipo, componente o sensor, de tal forma que estos fueran intercambiables, con el objetivo de que el SAAS funcione como planta piloto y banco de pruebas, es decir, si se requiere probar un nuevo prototipo de generador, absorbedor o en el caso de algún mantenimiento, este pueda ser instalado o retirado de una manera sencilla. En la salida de cada componente se consideró la instalación de sensores de temperatura, presión y flujo, que recolectan la información necesaria para realizar balances de energía, si un sensor se encuentra en la salida de un componente y a la entrada de otro, este sensor se utiliza para cumplir ambas funciones. En el sistema se encuentran equipos que realizan esfuerzo mecánico, por ello se hace uso de mangueras flexibles para desacoplar las vibraciones generadas. En el circuito hidráulico y aire se observa un tanque de expansión para absorber el incremento de presión del agua debido a la temperatura, y evitar que con ello se pueda dañar algún equipo.

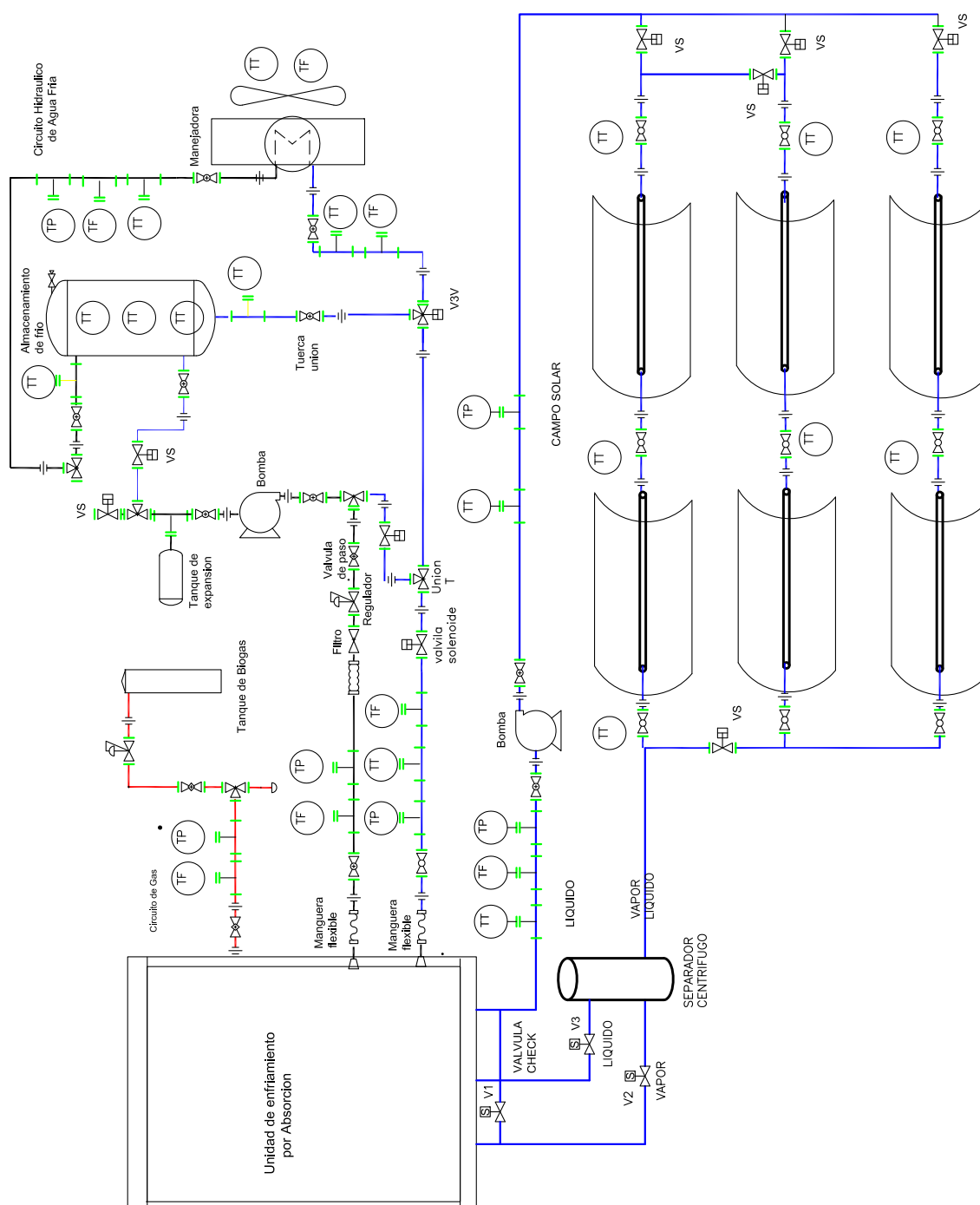


Figura 5.1: Diagrama de tubería e instrumentación del SAAS.

Un elemento indispensable cuando se habla de sistemas hidráulicos, es la toma para purgar el circuito, siempre ubicada en el punto más alto, tal como se ve en el tanque de almacenamiento de frío. Por último se ilustran tres de los cuatro lazos propuestos, el primero de ellos sensa la temperatura de la vivienda, para manipular gradualmente la apertura de la válvula de tres vías, con ello controlar el flujo de agua hacia la manejadora y por lo tanto su capacidad. El segundo se encuentra en el campo de colectores, el cual sensa la temperatura de salida de los colectores para variar el flujo de la bomba, traduciendo en la manipulación de la temperatura de la salida de los colectores. El tercero controla la capacidad de la unidad de absorción, manipulando el enfoque gradual de los colectores, por lo que si se desenfoca aporta menos energía de entrada a la unidad de absorción.

5.2. Unidad de absorción

En la figura 5.2 se ilustra el diagrama de tuberías e instrumentación de la unidad absorción, el cual es una ampliación de la figura 5.1. Las tuberías de color rojo que abarcan desde el generador hasta la primer y tercera válvula de expansión corresponde a la presión alta, las tuberías verde que va de la primera a la segunda válvula de expansión indica el nivel de presión intermedio, la tubería azul conectada de la segunda válvula de expansión hasta la tercera y la bomba de solución indican la zona de baja presión. En el generador se realiza el aporte energético con energía solar o fuego directo, el cual se genera vapor de amoníaco que a través de la conexión ($1A \rightarrow 1B$) llega al rectificador, el condensado regresa por ($1C \rightarrow 1D$), el vapor de amoníaco rectificado se traslada al condensador en forma de U por la tubería ($2A \rightarrow 2B$), el condensado que sale por ($3A$) puede ser observado por una mirilla de vapor que permite observar el funcionamiento del condensador, la conexión ($3A \rightarrow 3B$) interconecta el condensador con la válvula de expansión ($Vexp1$), esta tiene una válvula de expansión regulable adicional en paralelo, que por medio de válvulas se bloquea ($Vexp1$), de este modo el flujo se redirecciona por el puente (baipás) para controlar manualmente la expansión. El refrigerante expandido llega al preenfriador ($4A \rightarrow 4B$) y sale por ($5A$) para dirigirse a la válvula de expansión ($Vexp2$), entre ($5A - 5B$) se encuentra un transmisor de flujo magnético para medir la cantidad de vapor que llega al generador. El refrigerante de la tubería ($6b$) entra al evaporador para intercambiar calor a contracorriente con el agua refrigerada ($chin \rightarrow chout$), siendo *chin* el agua entrante y *chout* el agua de salida, en la salida del evaporador ($7A$) se instaló una mirilla para verificar en campo la calidad del refrigerante después de su intercambio de calor. Antes de absorberse con la solución el refrigerante intercambia calor en el preenfriador ($7A \rightarrow 7B$) y sale por ($8A$) para dirigirse al absorbedor/mezclador, formado por un intercambiador de tubo y coraza con película descendente, el amoníaco ingresa por ($8B$ y $8C$) para mezclarse con la solución pobre que viene del generador ($14A \rightarrow 14B$), su fase de absorción continua al ingresar en el absorbedor/condensador ($9A \rightarrow 9B$) y termina al salir por ($10A$), para observar la ausencia de vapor que garantiza la absorción de la mezcla se instaló una mirilla de

vapor, adicionalmente un transmisor de flujo magnético para medir el flujo del circuito solución. La solución entra a la bomba por la tubería (10B) y sale por (11A) para para llegar de nuevo al generador, en el trayecto intercambia calor en el rectificador (11A $\rightarrow$ 11B) y después en el intercambio de calor GAX (12A $\rightarrow$ 12B), en el cierre de ciclo se instaló una mirilla de vapor para ver el efecto GAX, después de ello la solución regresa al generador (13A $\rightarrow$ 13B). La máquina de absorción originalmente se alimentaba de energía térmica proveída por el quemador a fuego directo, la modificación consistió en extender fuera del equipo la conexión del generador hacia el absorbedor, con V1 cerrada y V2 y V3 abiertas la solución rica en amoníaco (tubería LIQUIDO) pudo ser succionada por la bomba del campo de colectores, en el cual se lleva el proceso de generación de vapor el cual retorna por la tubería (VAPOR/LIQUIDO), con el separador centrifugo se envía el vapor al seno de la solución del generador, el liquido es enviado al absorbedor. En caso de ser operado con fuego directo se invierte la alineación de las válvulas (V1 abierto y V2 y V3 cerradas), con ello el quemador de fuego calienta la solución rica y el vapor emerge desde seno de la solución rica y la solución pobre pasa a través de la válvula V1 para llegar al absorbedor.

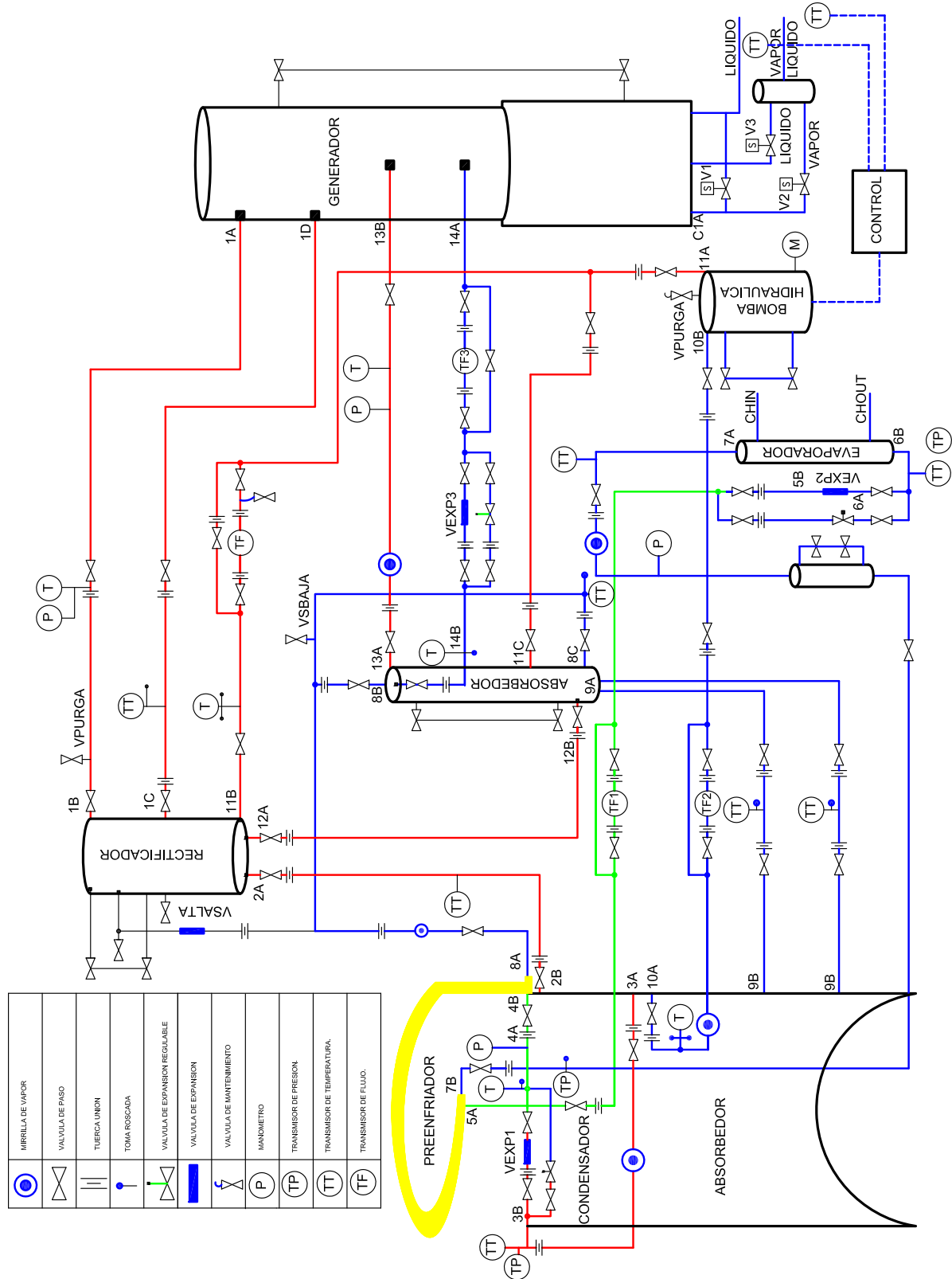


Figura 5.2: Diagrama de tuberías e instrumentacion de la unidad de absorción.

5.2.1. Ubicación de equipos

Los componentes de la unidad de absorción previamente adquiridos, se acomodaron con soportes dentro de un estante de metal (ver figura 5.3a), fue importante respetar la altura que se tiene de un equipo a otro, como el generador y el rectificador (ver figura 5.3b), además de considerar el espacio para instalar accesorios e instrumentación (ver figura 5.3c y 5.3d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.3: Instalación de tomas para la instrumentación en la unidad de enfriamiento.

5.2.2. Mejoramiento y adaptaciones de equipos

La unidad de enfriamiento sufrió deterioros con la exposición al medio ambiente y al proceso de soldadura, por lo que se tuvo la necesidad de limpiar, resanar y aislar algunas tuberías y equipos. En la figura 5.4a se observa físicamente el generador de la unidad de enfriamiento, se aprecia que la parte baja se encuentra aislada con fibra mineral y cinta de aluminio reforzada para evitar pérdidas de calor, aunado se ve la instalación del quemador a fuego directo con su electroválvula de gas y el abanico de ventilación, además en la caja d el lado izquierdo se encuentra el módulo de chispa, interruptor de temperatura y presostato.

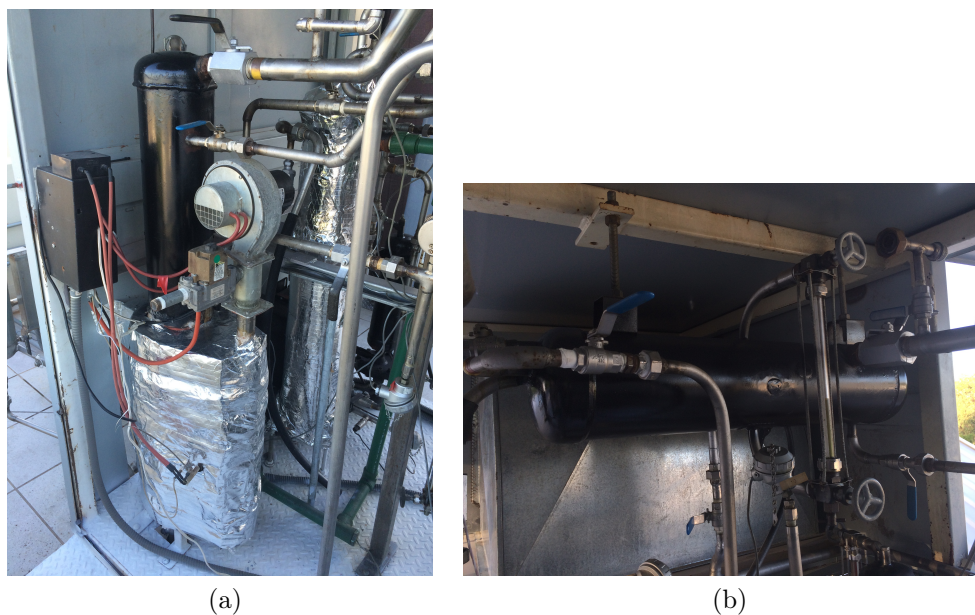


Figura 5.4: Instalación del generador y rectificador de la unidad de absorción.

En la figura 5.5a se puede ver el evaporador de la unidad de enfriamiento completamente aislado con material armaflex y cinta de aluminio reforzada, se puede ver la entrada de agua refrigerada conectada a la tubería color verde de tuboplus, con un rotámetro vertical para realizar la lectura de flujo localmente.

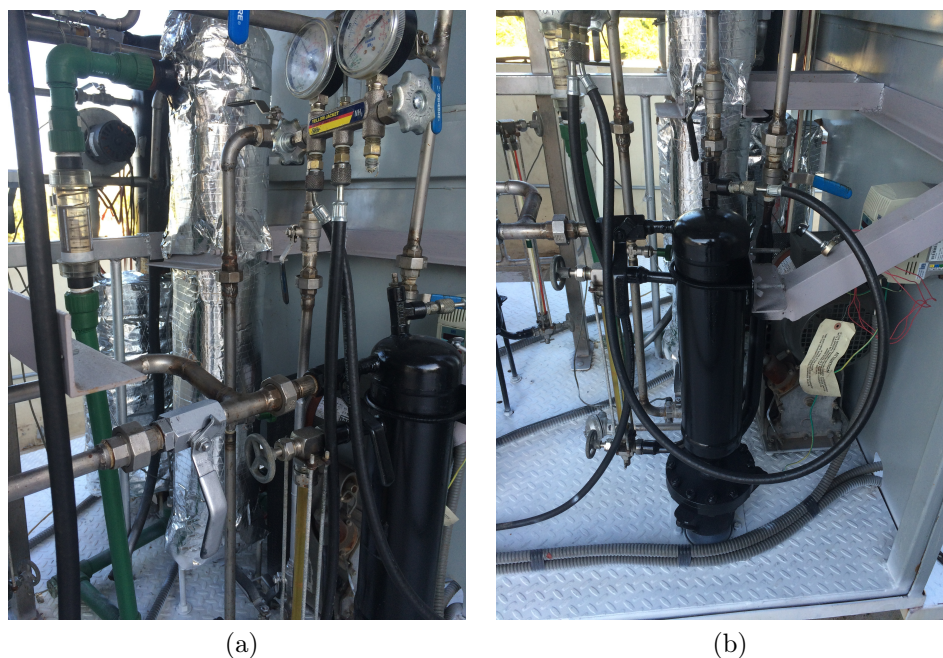


Figura 5.5: Evaporador y bomba de solución de la unidad de absorción.

La bomba del circuito solución se puede ver en la figura 5.5b, la cual esta soportada firmemente en la estructura de metal ya que es el componente que genera más vibración, la bomba contiene una mirilla de nivel y una válvula de mantenimiento.

El condensador se encuentra dentro de la caja de metal, debido a ello se realizó una adaptación para aislar la succión inducida (figura a) y la emisión de aire (figura B), fue importante realizar esta adaptación para evitar que el aire se ponga en contacto con la instrumentación u otros componentes del sistema.

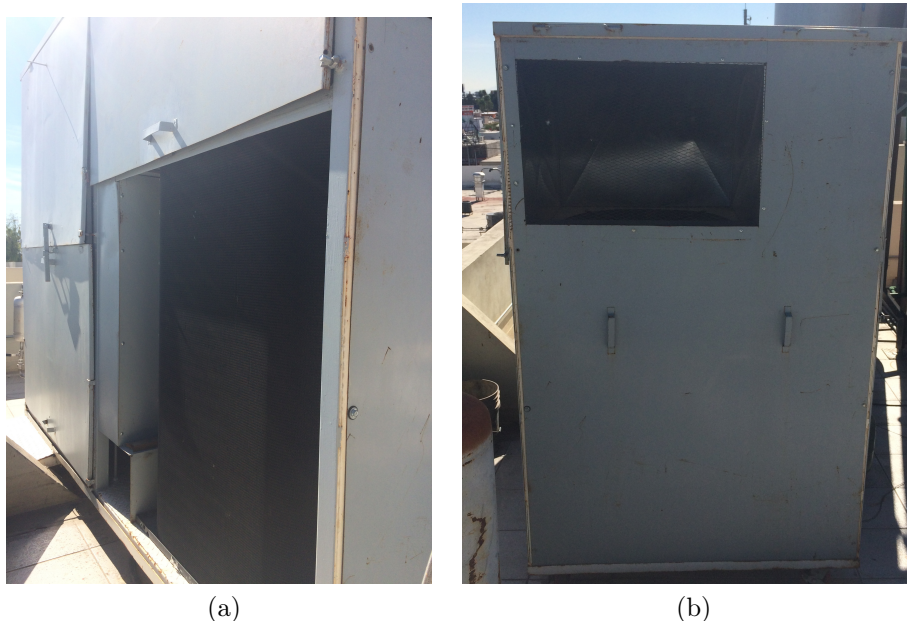


Figura 5.6: Aislamiento de aire de la succión y emisión del condensador.

5.2.3. Instalación de instrumentación

La instrumentación en la planta experimental es de vital importancia para observar del proceso, por ello se instalaron transductores de los distintos tipos de señales, de acuerdo al diagrama de tuberías e instrumentación de la figura 5.2 y 5.1, En la figura 5.7a se ilustra una toma doble preparado para la instalación de un transmisor de temperatura RTD tipo termoposo y un indicador local de presión, en la figura 5.7b se ilustra la instalación del transductor de presión, instalado en un punto diferente debido a que el indicador local requiere estar en un punto de acceso visual cómodo para el usuario.

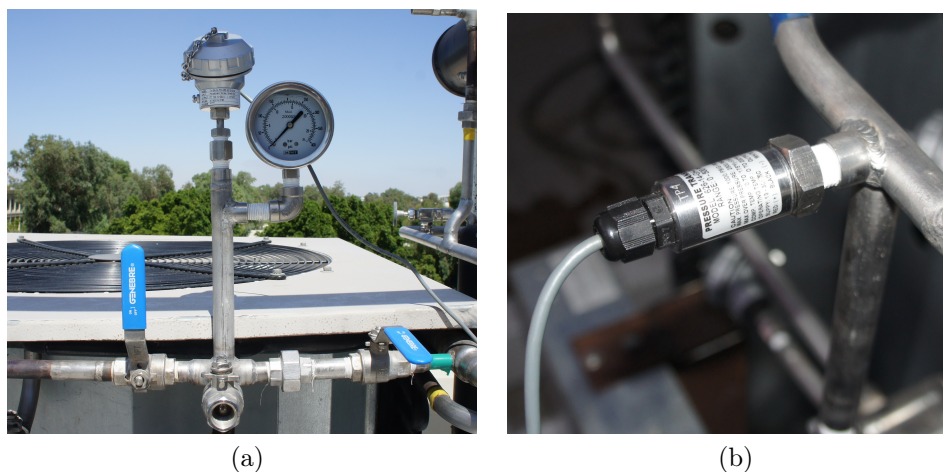


Figura 5.7: Instalación de los sensores de temperatura, manómetro y transmisores de presión.

El flujometro de efecto coriolis esta compuesto por el sensor y transmisor, en la figura 5.8a se muestra la instalación del sensor de efecto coriolis en una tubería de 1/2" con bridas, el cable transmite la alimentación del transmisor al sensor y la información de las variables del sensor a transmisor, en la figura 5.8b se visualiza el montaje de el transmisor de efecto coriolis (azul/negro) con dirección a la vista del operador, así como los transmisores de flujo magnético (azul/blanco) montados en línea sobre las tuberías del sistema

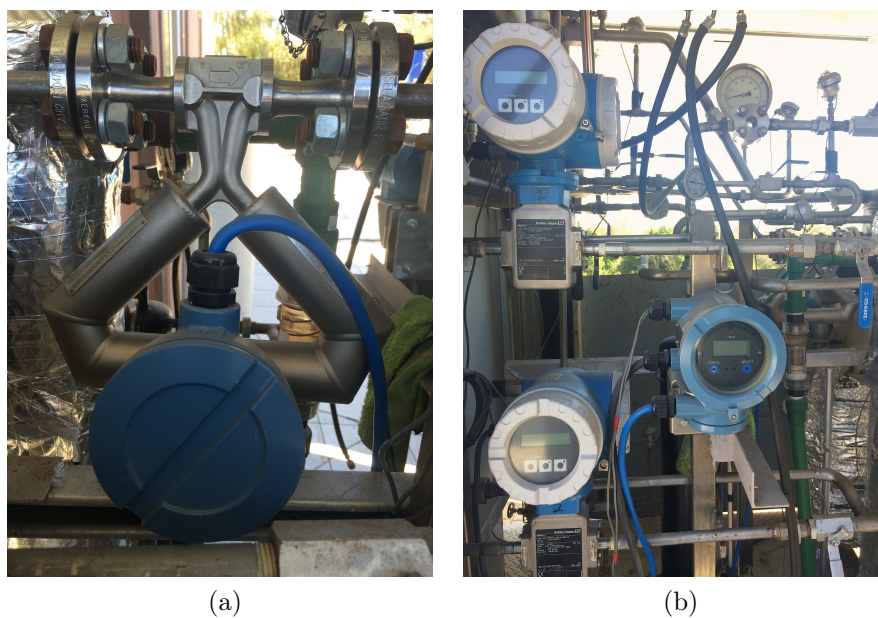


Figura 5.8: Instalación de los transmisores de flujo a) efecto coriolis y b) magnéticos.

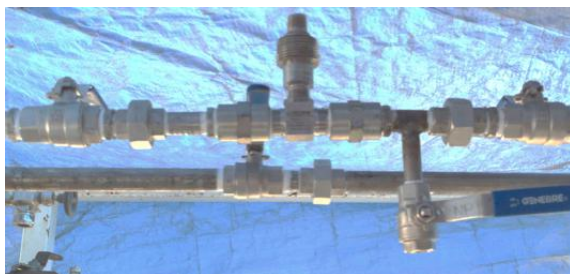
Cuando se realiza el estudio experimental resulta de gran ayuda la instalación de indicadores locales, que permiten observar el proceso físicamente, tal es el caso de las mirillas de vapor (ver figura 5.9a) que permiten ver cualitativamente la calidad de la mezcla de trabajo, otro indicador se trata de las mirillas de nivel (ver figura 5.9a), que juegan un papel importante durante la estabilización de el equipo de absorción. En la figura 5.9d se ilustra la instalación de la válvula de expansión regulable, que permite un estudio de exploración en combinaciones a diferentes caídas de presión o expansión en el equipo.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.9: Instalación de instrumentación en la planta piloto

5.2.4. Instalación del SACMAD

La instalación del SACMAD se realizó por módulos independientes cada uno compuesto por el módulo genérico descrito en el capítulo 4, en la figura 5.10 se observa en el centro el módulo CAF, con la fuente de alimentación para el módulo y sensores, en la parte superior se ve el bus de cables de sensores, cada uno identificado con etiqueta roja, el módulo se interconecta via ethernet a un airport extreme el cual extiende la red CEENER en la plataforma solar.

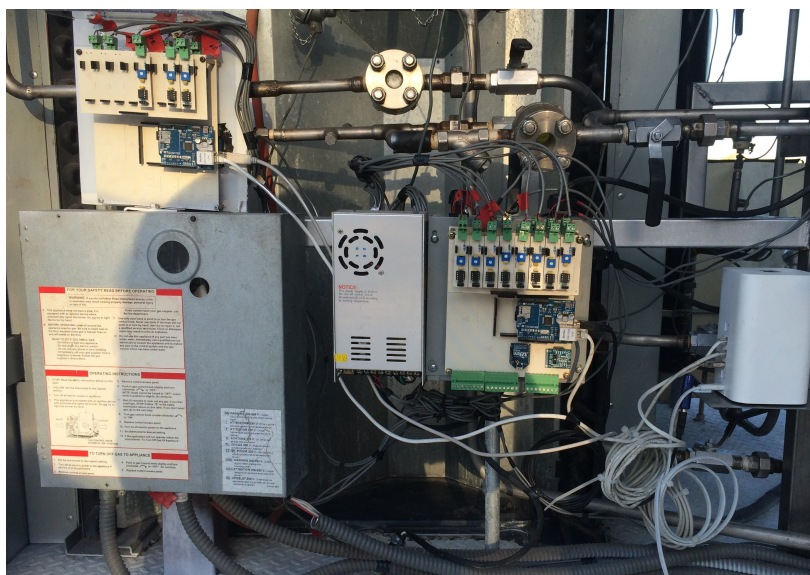


Figura 5.10: Instalación SACMAD en la unidad de absorción.

En el lado derecho se visualiza el SCUA conectado del mismo modo que el CAF, en la caja de metal de la parte inferior, se encuentran conexiones, elementos de potencia y el módulo del quemador de fuego directo CFD, debido a que en el mercado se encuentra una variedad de controladores para calderas que se ajustan a los requerimientos de nuestra aplicación según el algoritmo del capítulo 3, se acoplo el módulo de la figura 5.11, en la imagen se visualiza la configuración elegida de las ofertadas en la hoja de datos, los círculos rojos indican los puntos de medición del SCUA para detectar si se genera alguna alarma.

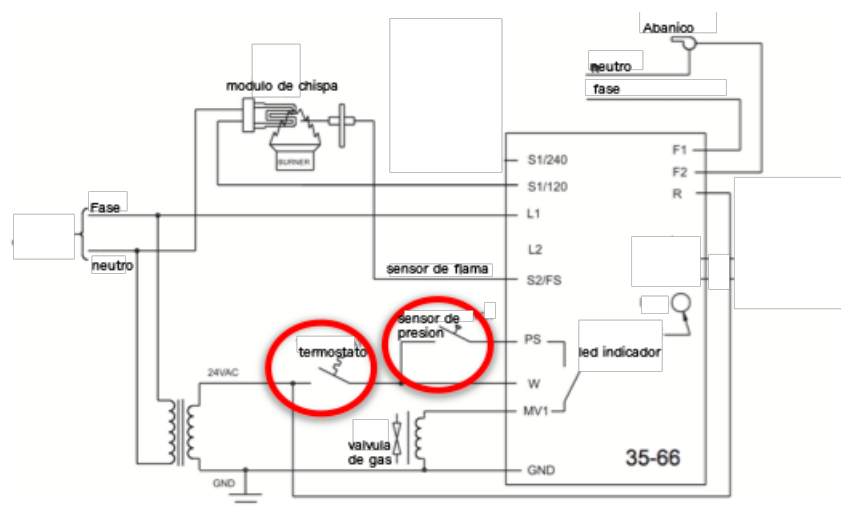


Figura 5.11: Controlador para el encendido en el quemador de la máquina de absorción.

En la figura 5.12 se observa la instalación del motor trifasico en la bomba hidráulica

del circuito de solución, con su instalación de potencia y control (variador de frecuencia).



Figura 5.12: Instalación de bomba hidráulica y variador de frecuencia.

5.2.5. Acoplamiento con campo solar

En la figura 5.13 se visualiza el separador centrífugo que acopla el campo solar con la máquina de absorción, en la parte central del cilindro se encuentra la entrada de solución rica en amoníaco fase líquida/vapor, el vapor se expulsa por la tubería inferior la cual se conecta al centro del generador para inyectarse al seno del fluido, el líquido se interconecta al intercambio GHX para dirigirse al absorbedor.



Figura 5.13: Separador de vapor de amoníaco proveniente del campo de colectores.

5.3. Circuito hidráulico y de aire

El circuito hidráulico y aire es el medio por el cual intercambia calor el espacio a climatizar y el agua refrigerada.

5.3.1. Circuito de agua fría

Se compone de tubería tuboplus porqué soporta la radiación solar de 1" tiene grandes prestaciones tal como la radiación, en el cual se instaló la tubería, las válvulas solenoides y de 3 vias y tanque de almacenamiento.

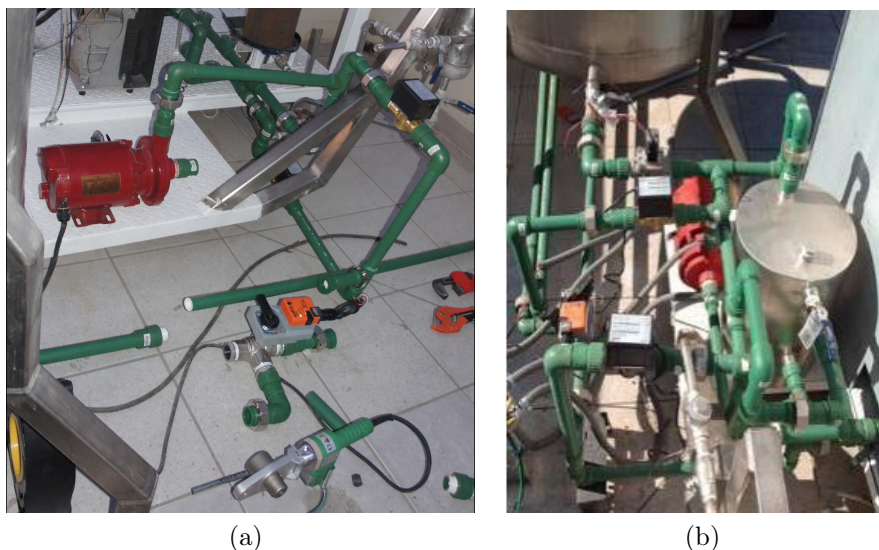


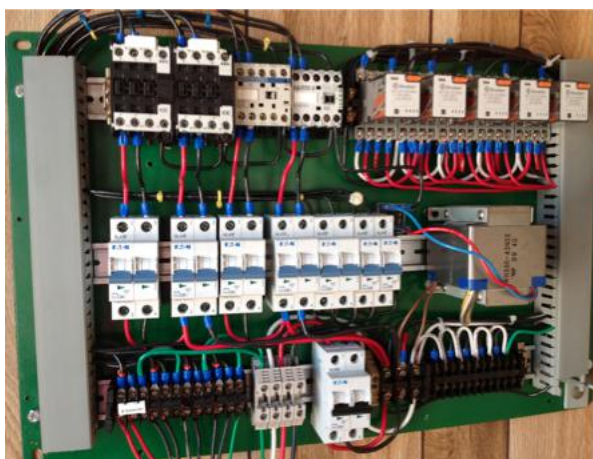
Figura 5.14: Construcción de circuito hidráulico de agua fría.

5.3.2. Cuarto de control

El cuarto de control se compone de un espacio a climatizar de alrededor de $10 m^3$, con una manejadora de aire de 3 toneladas, en el cual se tiene instalado el tablero con las conexiones a los elementos de potencia y control manual, de las válvulas solenoide, manejadora de aire, máquina de absorción, módulo de ignición del quemador campo solar.



(a)



(b)

Figura 5.15: Instalación de componentes, manejadora de aire y circuito de potencia

5.4. Puesta a punto de la planta piloto

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:

5.4.1. Localización y reparación de fugas

Una vez instalados los componentes se procedió con la fase de prueba de fugas, en la cual se utilizó un compresor para insertar aire a presión, e ir probando si la fuga por alguna unión. En este paso se utilizó el método más sencillo que es aplicar agua con jabón en los posibles lugares de fugas, teniendo buenos resultados con fugas considerables, más no obstante se notó la pérdida de presión a través con las transmisores de presión en el SACMAD, para ello se recurrió a un detector de fugas especializado, el cual detecta esas microfugas, reforzando la búsqueda con mechas de

azufre y papel indicador. En la Figura 5.16 se observa como se forma una burbuja debido a la fuga de aire.

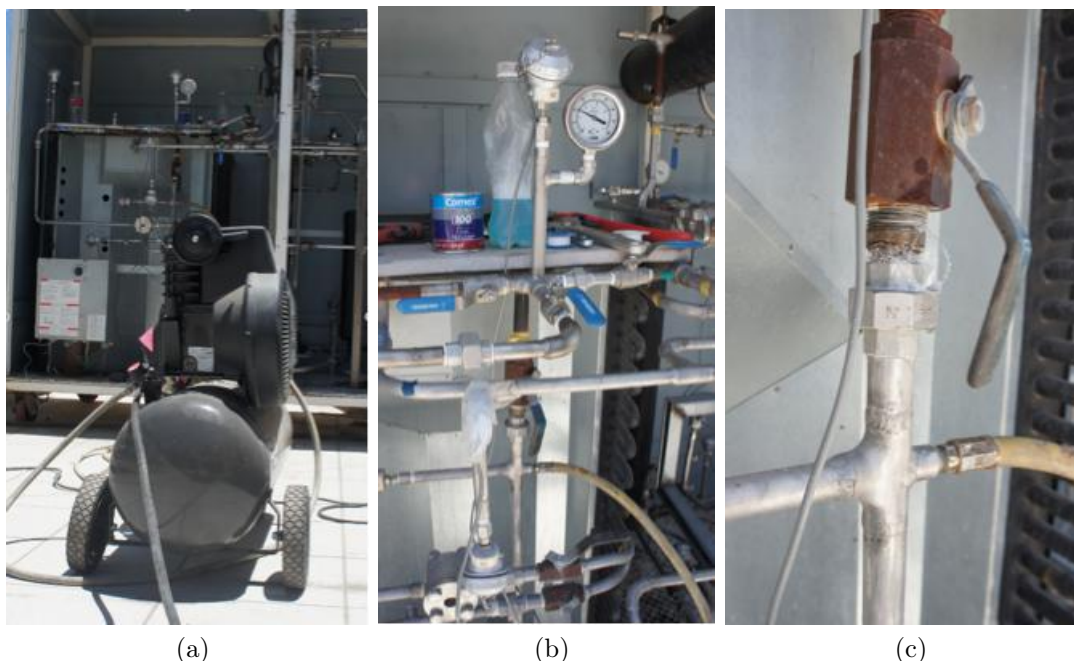


Figura 5.16: Prueba de fugas en las tuberías de la unidad de absorción.

5.4.2. Verificación de conexiones eléctricas y electrónicas

En este paso se aseguraron los voltajes requeridos 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.

5.4.3. Prueba de elementos finales de control

Antes de instalar algunos componentes como el quemador de gas fue necesario verificar su funcionamiento y evitar retrabajos, en el caso de que no funcionara ya instalado, para ello se alimentó la electro válvula de gas y el ventilador para encender el quemador, tal como se observa en la Figura 5.17, una vez completamente instalado, se realizaron las mismas pruebas de manera automática con el módulo de ignición y detección de flama.

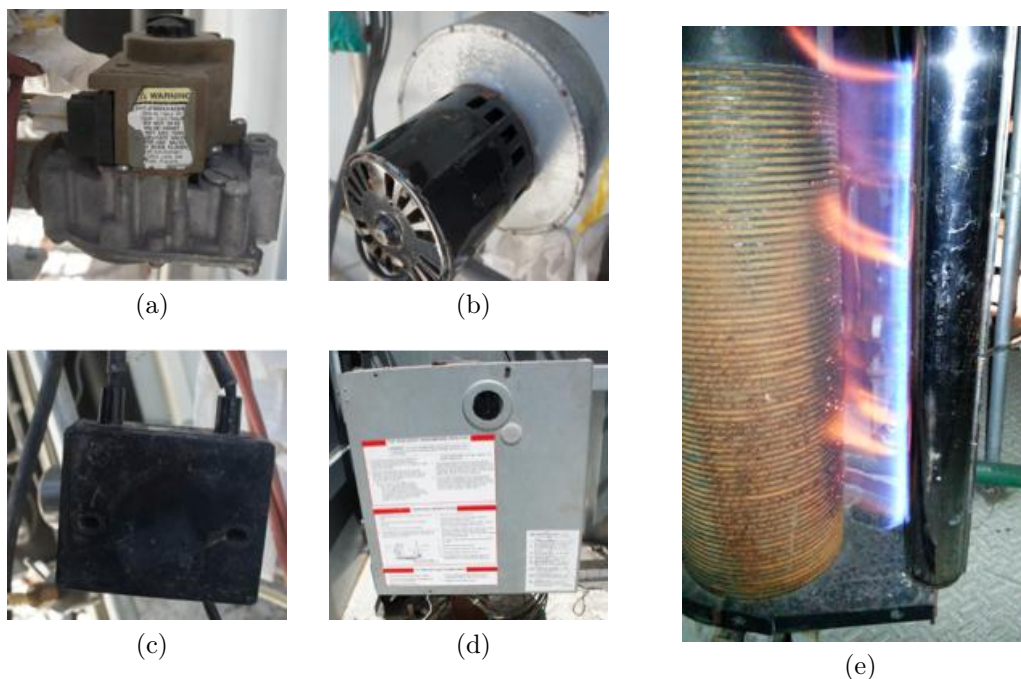


Figura 5.17: Componentes del quemador de gas de la unidad Robur.

Por otro lado probó la apertura de cada válvula solenoide a través del tablero manual, revisando la conmutación de ellas mediante el sonido que provoca el solenoide, el mismo procedimiento se realizó para las bomba de circulación y manejadora de aire.

5.5. Mecanismo de seguimiento solar

Antes de instalar el sistema de seguimiento solar en el campo de colectores cilindro parabólico de la unidad de aire acondicionado solar, fue necesario construir un banco de pruebas para probar y validar el seguimiento solar en dos ejes, además de obtener cuantitativamente el error máximo o promedio del seguimiento solar. Además se desarrollo el sistema para valuar el sistema de seguimiento.

5.5.1. Banco de pruebas

El sistema de seguimiento consta de un dispositivo electrónico interconectado a una estructura electromecánico, que permite la colocación de una superficie de referencia. La figura 5.18 muestra una unidad de giro de doble eje, lo que significa dos motores de 24 voltios de corriente continua, que permite el seguimiento en ángulos acimutal y cenital. En la parte superior de la figura 5.18 se puede observar el sensor solar de seguimiento, la cámara web que se utiliza para la evaluación del error de seguimiento

solar, y una herramienta de hecha tubería de PVC utilizada para comprobar el enfoque (indicador local).

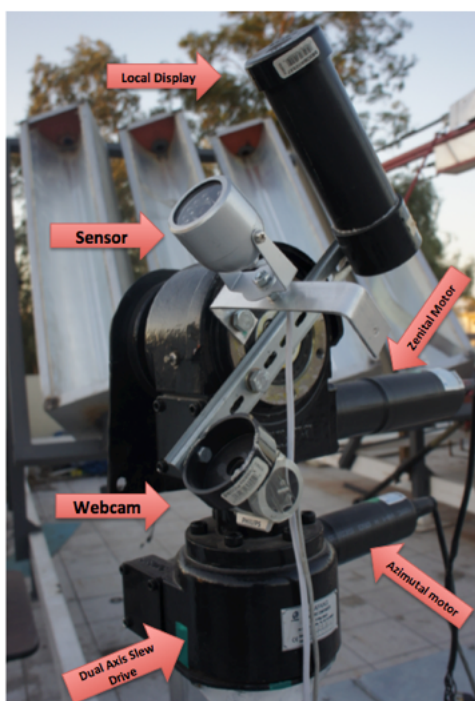


Figura 5.18: Banco de pruebas del sistema de seguimiento solar.

5.6. Limpieza, presentación y acabado final

En la figura 5.19 e ilustra la presentacion final de la construcción de la unidad de absorción, con su instrumentación, actuadores, sistema de monitoreo y control.



Figura 5.19: Vista final de la unidad de absorción.

En la figura 5.20 se observa la plataforma solar del CEENER y la instalación del sistema de aire acondicionado solar, de izquierda a derecha se visualiza el campo solar conformado por un arreglo de CPC's, frenel y arreglo cilindro parabólico. La unidad de enfriamiento se encuentra en la estructura metálica con puertas levantadas, la vista frontal se visualiza en la figura 5.20. Por último en el lado izquierdo se visualiza el cuarto de control y espacio a climatizar de prueba.



Figura 5.20: Instalación del sistema de aire acondicionado

Capítulo 6

Estudio experimental

En este capítulo se se muestra los ajustes finales de la puesta en marcha, evaluación y estudio experimental de la planta piloto de aire acondicionado solar. En la primera sección se describe el proceso de carga de solución y refrigerante, en la segunda las pruebas realizadas y sus objetivos de las mismas. En la última sección se muestra los resultados de la evaluación del sistema de seguimiento solar.

6.1. Carga de refrigerante y solución en la unidad de absorción

A continuación se detalla el procedimiento la preparación de la solución y su procedimiento de carga, así como el ajuste de concentración y purga de la unidad de enfriamiento.

6.1.1. Preparación de solución

Para preparar la solución fue necesario contar con el equipo de seguridad que consta de lentes, guantes, mascarilla y una toma de agua para lavarse algún área del cuerpo que tenga contacto con el amoniaco. El equipo e instrumentos necesarios consta, de un cilindro para hacer la mezcla de la solución de 5 galones de agua destilada, a la cual se le agrega un inhibidor anticorrosivo (cromato de sodio tetrahidratado), un tanque de refrigerante (amoniaco), una báscula para determinar la cantidad refrigerante que se suministra a la solución, un valde con agua para purgar líneas de trabajo, y un juego de manómetros con líneas de trabajo. Para preparar la solución se realizaron los siguientes pasos:

1. El primer paso fue introducir $14kg$ de agua y 200 gr de anticorrosivo bien mezclados en el tanque de solución.
2. Se montó el tanque solución encima de la báscula y registrar su peso, además realizar las conexiones que se muestran en la figura 6.1a, donde el tanque va

conectado a la conexión central del manómetro, para purgar con la línea izquierda de baja y agregar con la conexión derecha de alta, que a su vez se conecta a la conexión de líquido del tanque, para garantizar la absorción del refrigerante por la parte baja donde se encuentra el agua destilada.

3. Se realizó la apertura del tanque de refrigerante y se purgó la línea.
4. Se registro el valor de la báscula y se abrió la llave derecha del manómetro, con lo que se comienza agregar el refrigerante y mientras se hace es posible abrir la conexión de vapor del tanque de solución conectada al valde de agua para purgar los gases no condensable, esto se realiza hasta que se escuche un sonido que es cuando el amoníaco se absorbe con el agua.
5. Se agregaron $7kg$ de refrigerante.

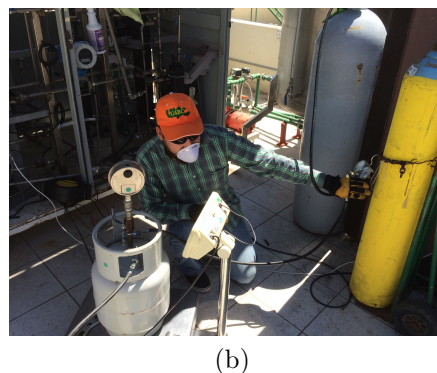
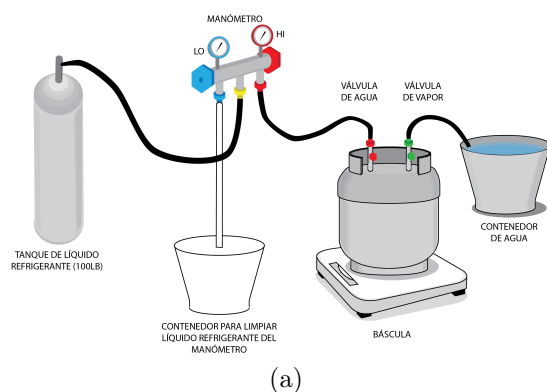


Figura 6.1: Preparando solución a) Esquema de conexión, b) Preparación en campo.

6.1.2. Método de carga de solución

Para realizar preparar la solución fue necesario contar con el equipo de seguridad mencionado anteriormente, en este caso se utilizó el cilindro de la solución previamente preparado, el cilindro de refrigerante y dos manómetros, con ello se realizaron los siguientes pasos:

1. El equipo recién construido se encuentra sin refrigerante y solución, debido a esto es necesario cargar un poco de amoníaco para operar el equipo e introducir la solución, es ideal crear vacío para retirar lo mayor posible de gases incondensables.
2. Se realizaron las conexiones del esquema de la figura 6.2, verificando que el tanque de amoníaco al menos tiene $6.9 Bar$.

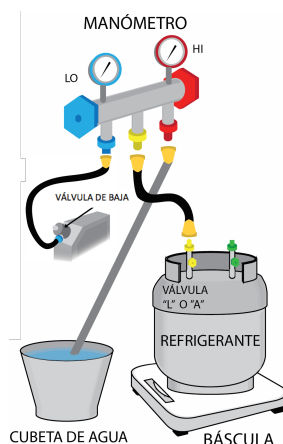


Figura 6.2: Esquema de la carga de refrigerante.

3. Se encendió el equipo de enfriamiento sin suministro de energía térmica.
4. Después de 5 minutos se abrió la válvula de carga de la unidad de absorción y manómetro, para permitir que el refrigerante entre en la unidad de absorción, dejando que la presión de la unidad se iguale al tanque de refrigerante.
5. Se purgó la unidad de enfriamiento según la sección 6.1.4.
6. Se verificó que la presión este sobre los 6.9 bar y se apagó el equipo.
7. Se conecto el manómetro de alta en la toma de servicio en la entrada del absorbedor, la conexión central por donde llegará la mezcla de amoníaco agua líquida se conecta al tanque de solución, que a su vez se interconectan al tanque de amoníaco por la conexión de gas, con el fin de incrementar la presión en el tanque de solución y empuje el líquido a la máquina de enfriamiento, la conexión de baja del manómetro conectada al valde con agua se utiliza como medio de purga de las líneas de conexión, ver figura 6.3a para más detalles.
8. Se abrieron las conexiones del tanque de refrigerante y solución, a través de la conexión izquierda del manómetro se purga los gases no condensables contenidos en las líneas de conexión y se cierra cuando se escucha la salida de amoníaco.
9. Se realizó la conexión de purga de gases no condensables de la unidad de enfriamiento, ver sección 6.1.4.
10. Se registró el valor de la báscula.
11. Se encendió el equipo normalmente y se abrió la conexión derecha del manómetro, lo que permitió que la solución entrara directamente al absorbedor.
12. Se cargó solución hasta que el manómetro de purga dejo de oscilar, si lo hace es señal que hace falta refrigerante.

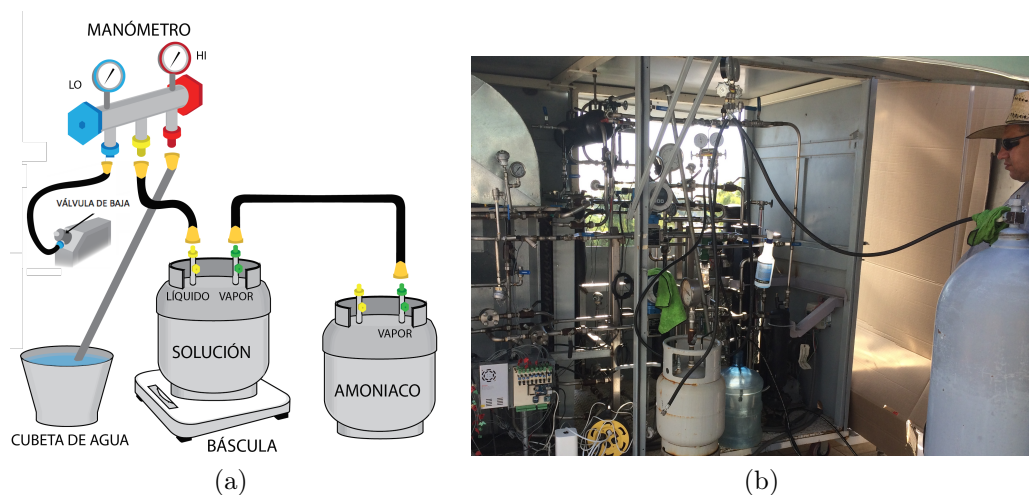


Figura 6.3: Carga de solución a la máquina de absorción, a) Esquema de conexión, b) Carga de solución en campo.

6.1.3. Ajuste de concentración

Una vez que el equipo ya cuenta con la cantidad de solución adecuada, se puede ajustar la concentración o presiones de trabajo en alta, media y baja, para ello se realizaron los siguientes pasos:

1. Se realizaron las conexiones del esquema de la figura 6.2 como en el método de carga de solución.
2. Se encendió el equipo de enfriamiento normalmente.
3. Después de 5 minutos se abrió la válvula de carga de la unidad de absorción y manómetro, para permitir que el refrigerante entre en la unidad de absorción, regulando el flujo de refrigerante con la perillas del manómetro para alcanzar la presión de trabajo en baja de 4 bar y 18.6 bar en alta a 35°C.
4. Se purgó la unidad de enfriamiento según la sección 6.1.4.
5. Se verificó que la presión este sobre los 6.9 bar y se apagó el equipo.

En la figura 6.4 y 6.5 se ilustra el encendido y estabilización de la unidad de absorción, alrededor de 1 hr 10 min se empezó ajustar la concentración, se puede ver como las temperaturas y presiones en general se ven afectadas, conforme incorporamos amoníaco en el sistema se incremento la absorción, por lo que las presiones empiezan a bajar. si se continua agregando refrigerante y sobrepasamos el límite, la solución se satura y el amoníaco agregado solo eleva la temperatura. Es importante encontrar las condiciones de operación antes mencionadas.

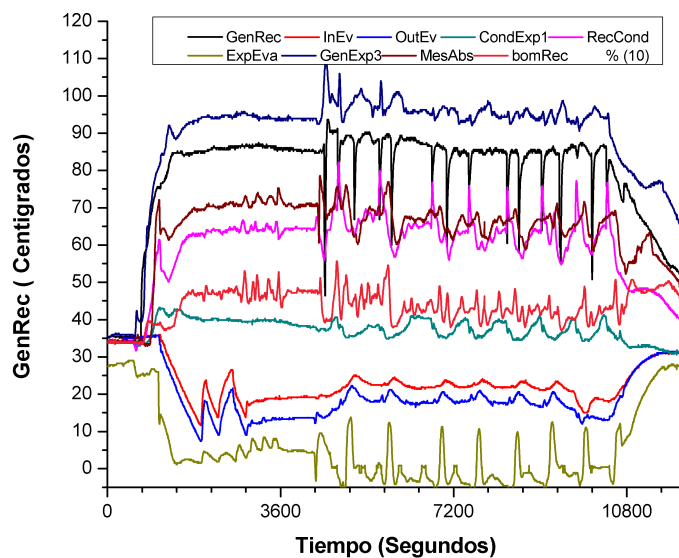


Figura 6.4: Temperaturas de la unidad de absorción durante el ajuste de concentración.

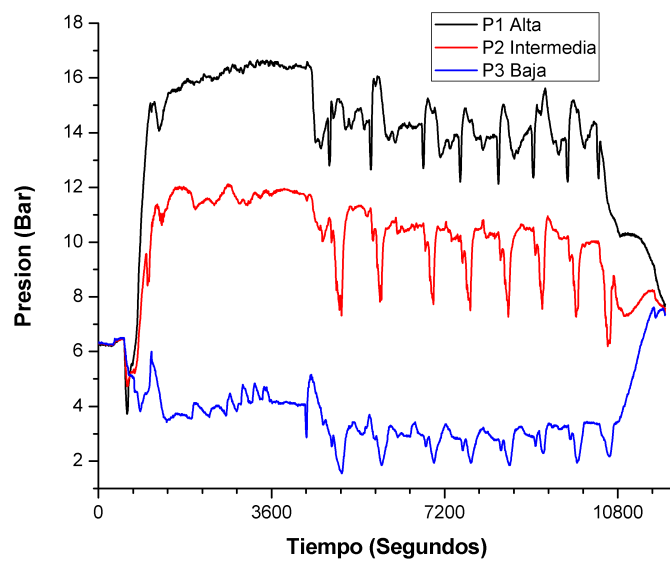


Figura 6.5: Temperaturas de la unidad de absorción durante el ajuste de concentración.

6.1.4. Purga de aire

La unidad debe ser purgada después de ser corregida o manipulada externamente. La purga se debe hacer durante la operación con una entrada de energía térmica disponible, para ello se debe seguir los siguientes pasos:

1. Conectar la conexión del manómetro de baja a la conexión de servicio de la bomba de solución, la conexión central del manómetro a un valde con agua, ver detalles en la figura 6.6.
2. Abrir la válvula de servicio de la bomba y suavemente abrir la perilla de baja, los gases no condensables entrarán en contacto con el agua, lo que creará burbujas que desaparecerán en la superficie. Cuando los gases no condensables hallan sido purgados, saldrá amoníaco o solución, lo que provocará que las burbujas estén marcadas en la superficie del agua acompañadas de un sonido fuerte, inclusive podría verse la solución de color amarillo. La manija del manómetro deberá cerrarse cuando esto suceda.
3. Cerrar válvulas de servicio y desconectar.

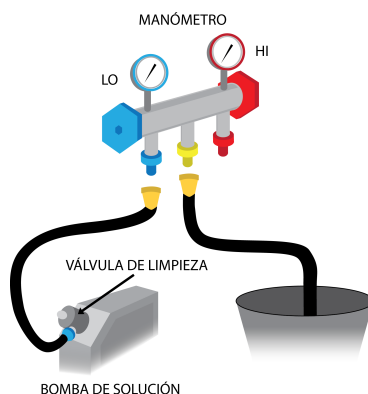


Figura 6.6: Purga de fluidos no condensables en la máquina de absorción.

6.2. Pruebas realizadas en la planta piloto.

Las pruebas realizadas se separaron en tres, la primera de ellas es una estudio de sensibilización que consiste en el arranque estabilización y paro. La segunda es una prueba continua del sistema operado con el algoritmo de automatización y control y lazo de control de temperatura de la vivienda a través de la válvula de 3 vías, cabe mencionar que la sintonización de este lazo de control se realizó en campo, debido que a cada espacio a climatizar es diferente y este tiene que ser ajustado en línea. El tercer experimento se basa en realizar una prueba continua y con perturbaciones de la unidad de absorción, con el fin de obtener información que permita obtener una identificación

del sistema o modelo aproximado, que permita sintonizar teóricamente el lazo de control de capacidad de la unidad de enfriamiento, este lazo se estudia a detalle en el capítulo 7 debido a que la constantes del controlador de este lazo son constantes para cualquier aplicación. En la última prueba se busca variar el flujo del circuito solución, para demostrar experimentalmente la variación de capacidad estudiada teóricamente en el capítulo 3 y sustentar un posible lazo de control.

6.2.1. Arranque, estabilización y paro

La primera prueba obligada de la mayoría de los sistemas experimentales consiste en tres pasos, el primero de ellos es el inicio o encendido del equipo, el segundo verificar que las variables lleguen a sus condiciones nominales de operación, por último realizar el procedimiento de paro. Con estos pasos nos sensibilizamos con el sistema y se cuenta con un punto de referencia que ayuda a detectar alguna operación anormal. En la figura 6.7 y 6.8 se observan las temperaturas de la unidad de absorción durante el arranque, estabilización y paro en alrededor de dos horas de operación, el rango de tiempo está dado en segundos en separación de 3600s para indicar una hora. Las temperaturas comienzan del reposo aproximadamente a temperatura ambiente cuasi estable a 35°C , algunas varían por la elevación y el tipo de fluido con el que se encuentran en contacto, la unidad se enciende e inmediatamente el calor se empieza a manifestar con temperatura en el generador y rectificador y presión en los tres diferentes niveles, alrededor de unos 4 minutos de encendido cuando se alcanza una presión de 14 Bar en alta se empieza a dar el efecto de enfriamiento en el evaporador, 3 minutos el sistema alcanza sus condiciones y capacidad de enfriamiento nominal y empieza a intercambiar calor con el agua refrigerada. Al transcurrir 25 minutos más el sistema alcanza su temperatura estándar de 7°C en el agua refrigerada de entrada y 12°C en la salida. Se debe destacar que la estabilización de la unidad de absorción se da cuando se alcanza su capacidad nominal en alrededor de 6 y 7 minutos, en la prueba de sensibilización se puede resaltar que las temperaturas y presiones realmente no se ven muy afectadas por la temperatura de entrada y salida del agua refrigerada con excepción de la salida del evaporador. El suministro de energía térmica es notable inmediatamente, se ve en el procedimiento de paro se manifiesta el corte en la temperatura del generador y las presiones, consecuencia del paro decae la capacidad y se eleva la temperatura del agua refrigerada y evaporador, que por el fenómeno de equilibrio térmico se igualan al resto de las temperaturas.

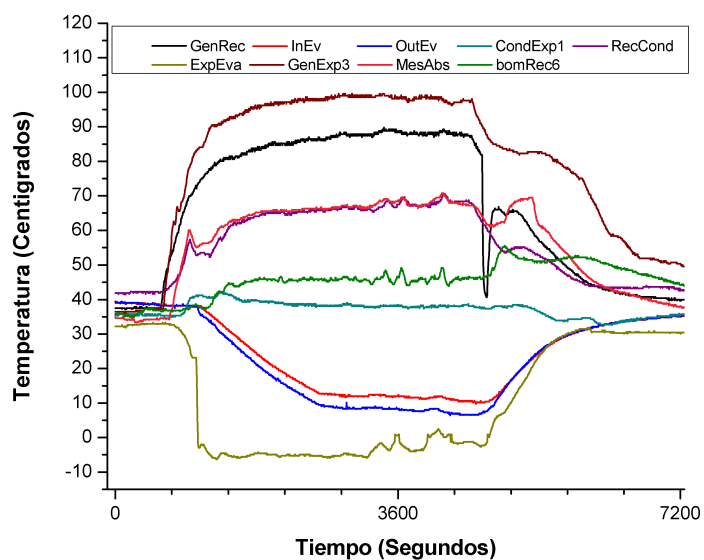


Figura 6.7: Temperaturas del arranque estabilización y paro.

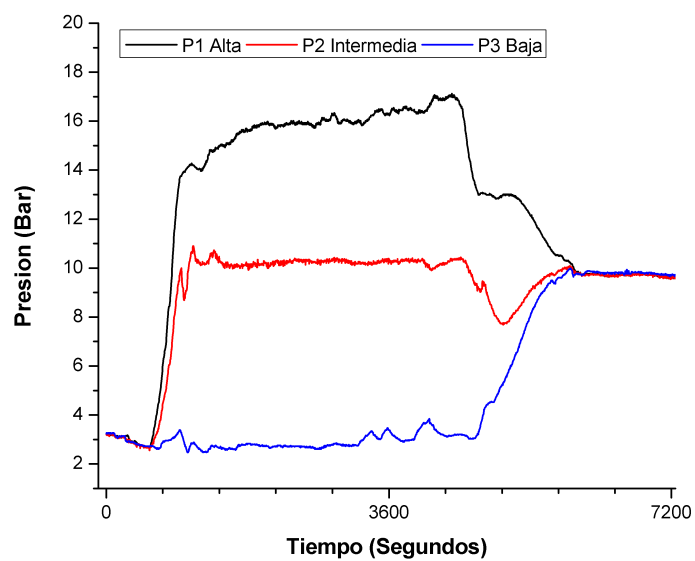


Figura 6.8: Presiones del arranque estabilización y paro.

6.2.2. Control de temperatura de la vivienda

La evaluación de la automatización y control del circuito hidráulico, que contempla los modos de operación descritos en el capítulo 3, y el lazo de control de temperatura a través de la válvula de tres vías, se llevo a cabo a través de un experimento en la planta real. En la figura 6.9 se observa que se cuenta con una radiación de alrededor de $700 W/m^2$, por lo que la unidad de enfriamiento opera con la fuente de energía más Barata disponible, en este caso la solar térmica. La unidad enciende hasta alcanzar el estándar de $7^{\circ}C$ en el agua refrigerada de entrada y $12^{\circ}C$ en la salida, el controlador PI que actúa sobre la válvula de tres vías mantiene el punto de consigna a $15^{\circ}C$, cabe mencionar que la variable controlada es la temperatura de salida de la manejadora. Alrededor de la hora 11 se cambia al punto de consigna, provocando menos demanda de enfriamiento, por lo que el lazo de seguridad controle por histéresis el encendido y apagado del equipo, con el objetivo de que la temperatura de salida del evaporador no descienda de los $5^{\circ}C$, lo que previene el congelamiento no deseado, esto a su vez genera perturbación en el lazo de control PI y evita que se tenga un control fino. La capacidad se puede visualizar indirectamente en la señal de control de la válvula de tres vías, que va de 0 a 10 volts y representa del 0 al 100% de apertura o flujo de agua que entra a la unidad manejadora. Conforme el punto de consigna se eleva, la cantidad de agua requerida en la manejadora desciende, enviando el resto al tanque de almacenamiento. A las 14:30 horas se tapo el sensor de radiación solar para provocar el cambio de modo de operación, el algoritmo decide apagar la unidad de enfriamiento, como medida de seguridad para evitar estancamiento y congelamiento en el evaporador, se opera el flujo de agua unos 15 minutos, como hay disponibilidad de almacenamiento de frío se elige por la selección jerárquica energética. En el modo de enfriamiento con almacenamiento de frío se ve claramente como al extraer agua a temperatura constante y sin perturbaciones se puede lograr un control suave a pesar de que se tiene bajo requerimiento de frío.

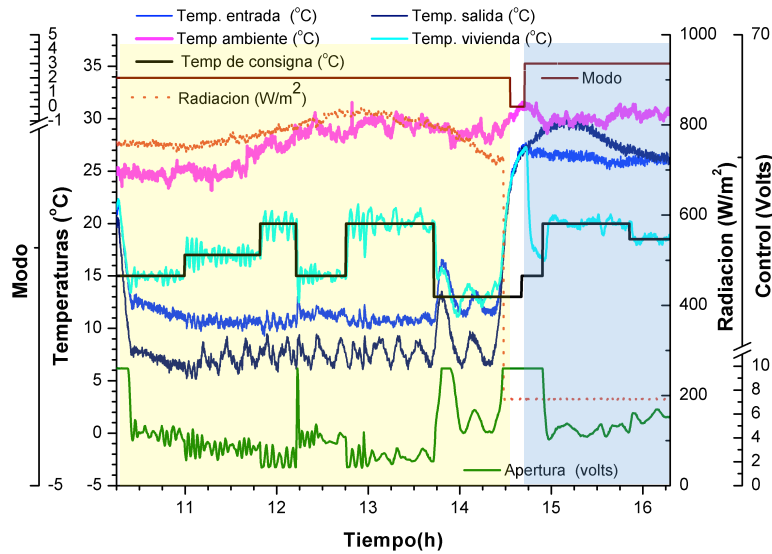


Figura 6.9: Control de la temperatura de la vivienda a través de la válvula de 3 vías, en modo solar y almacenamiento.

En la figura 6.10 se observa un nivel de radiación alto por lo que comienza a trabajar con energía solar, el controlador PI lleva la temperatura de la vivienda a $15^{\circ}C$, una temperatura relativamente baja que exige suficiente capacidad para evitar el apagado de la unidad de absorción por lazo de seguridad de temperatura. Se ve que el control de temperatura del aire de la manejadora prácticamente se traslapa con el punto de consigna. En la gráfica se ve que el voltaje está alrededor de $5V$, lo que indica que se está entregando la mitad de agua a la manejadora y el restante al tanque de almacenamiento. Alrededor de las 15:45 horas la radiación baja del punto de consigna de $400 W/m^2$, ya que no se cuenta con suficiente almacenamiento de frío se trabaja con fuego directo, debido a que la unidad de absorción sigue operando pero con una fuente de energía distinta, no es necesario realizar el procedimiento de paro. Alrededor de las 18:00 horas el punto de consigna baja y para compensar el incremento de requerimiento de capacidad se aumenta el agua refrigerada a la entrada de la manejadora.

En general el controlador mantuvo sin ningún problema el punto de consigna, validando el correcto funcionamiento de los algoritmos de automatización y control propuesto para el circuito hidráulico y aire y el lazo de control de temperatura de la vivienda a través de la válvula de tres vías.

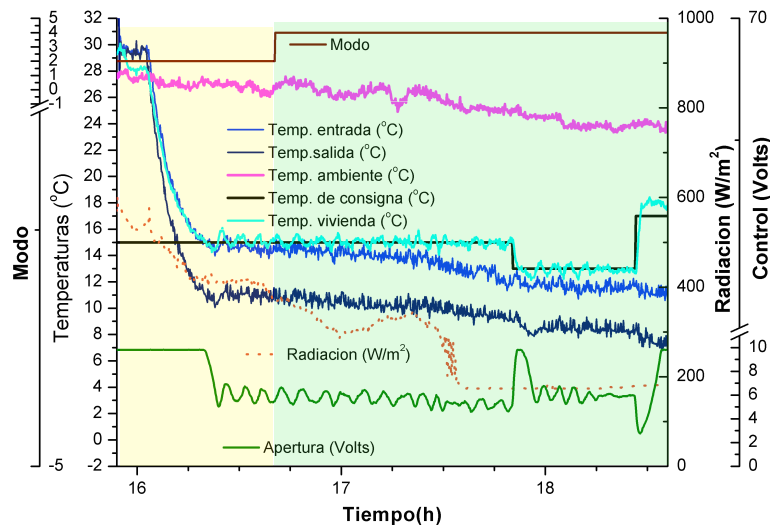


Figura 6.10: Control de la temperatura de la vivienda a través de la válvula de 3 vías en modo solar y fuego directo.

6.2.3. Operación continua con encendido y apagado

En la figura 7.7 se muestran los datos experimentales de agua refrigerada de la operación de la unidad de absorción, en la cual se presentan encendidos y apagados, para ver el tiempo de respuesta cuando el equipo ya cuenta con un preencendido. En la figura 6.11 se observa la acción de control apagada y la unidad de absorción en reposo, cuando la unidad de enfriamiento enciende y alcanza su capacidad de enfriamiento, la temperatura de salida del agua refrigerada empieza a disminuir, la cual intercambia calor en el espacio a climatizar para regresar de nuevo a la unidad de enfriamiento, conforme se le retira calor al espacio y disminuye su temperatura también lo hace el agua refrigerada de entrada a la unidad de absorción, alrededor del minuto 30 la unidad se apaga por un lazo de seguridad el cual se restablece de inmediatamente. En alrededor de 25 minutos la temperatura del agua refrigerada desciende por lo que la unidad de enfriamiento se apaga para evitar congelamiento en el evaporador, se ve como las temperaturas de agua refrigerada aumenta por la falta de capacidad de enfriamiento, cuando la temperatura del agua de entrada alcanza los 15°C , se vuelve a encender la unidad de enfriamiento y nuevamente alcanza su capacidad de enfriamiento para retirar calor de la vivienda, lo que ocasiona que disminuyan las temperaturas del agua refrigerada. El proceso se repite 2 veces más obteniendo un comportamiento similar, después de eso la unidad se apaga y tiende al equilibrio.

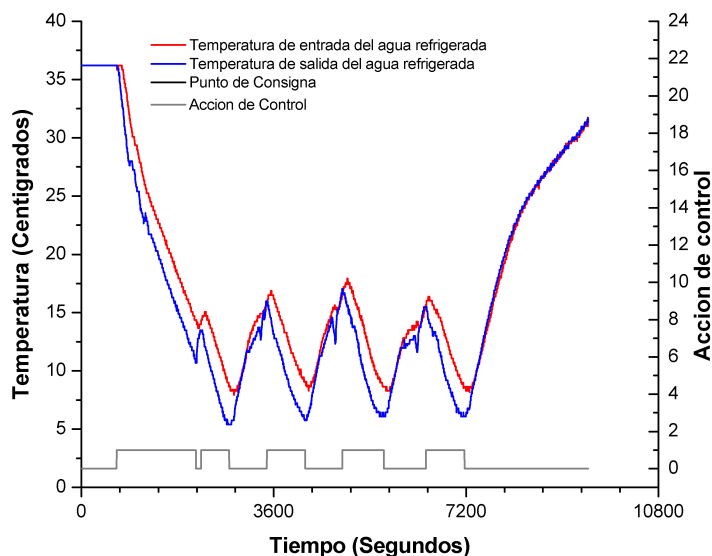


Figura 6.11: Control de la capacidad de la unidad de absorción con controlador On-Off

6.2.4. Variación de flujo en el circuito solución

En base al estudio teórico en Aspen plus del capítulo 3, donde se encontró que para una entrada de calor corresponde un flujo óptimo en el circuito solución, se realizó un experimento con el 100 % de energía de entrada y variando el flujo del circuito solución. En la figura 6.12 se observa una fracción del experimento, donde se ve claramente un flujo 3.5 l/dcm^3 @ 2.8 Ton de capacidad de enfriamiento, con presiones y temperaturas nominales. En el segundo 3960 disminuye el flujo a 3 l/dcm^3 @ 2.5 ton, en el instante 4320 vuelve a bajar otro escalón más a 2.5 l/dcm^3 a 2 ton, hasta llegar a 2 l/dcm^3 @ 1 ton, notando que a medida que decrece el flujo en el circuito solución la capacidad también lo hace, ocasionando que la temperatura de salida del agua refrigerada incremente. Poco antes del segundo 5040 se restablece el flujo a 3.5 l/dcm^3 @ 2.8 ton para terminar con un flujo a 4 l/dcm^3 @ 3 ton, comprobando que al incrementar el flujo también incrementa la capacidad, permitiendo a la unidad disminuir la temperatura de salida del agua refrigerada. En la gráfica se puede ver que al variar el flujo las presiones y temperaturas no se vieron afectadas, con excepción de la temperatura del condensador del absorbedor “MesAbs”, debido a que la pérdida de capacidad lleva al incremento de temperatura del refrigerante la cual se mezcla con la solución para dirigirse a “MesAbs”.

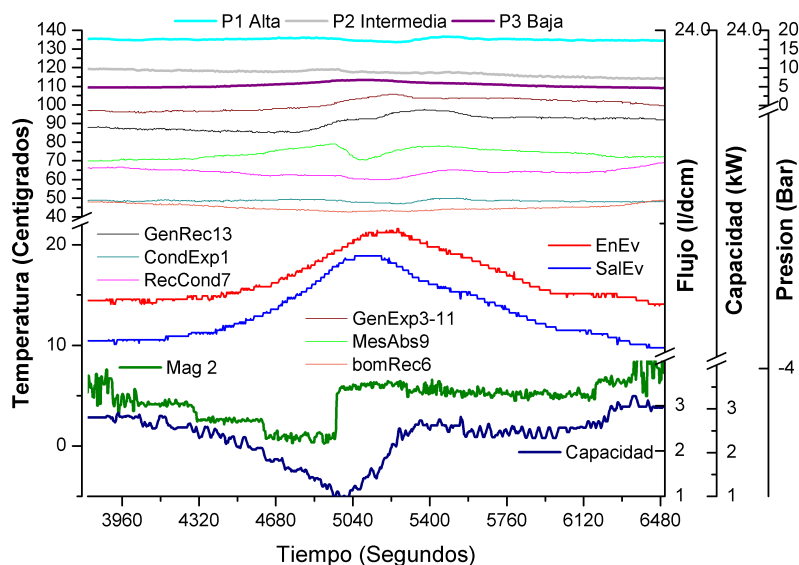


Figura 6.12: Variación de flujo del circuito solución de la unidad de absorción

6.3. Evaluación del sistema de seguimiento solar

Para verificar el comportamiento operativo y la exactitud del sistema de seguimiento, se desarrolló un dispositivo para medir el ángulo de incidencia. Esto se realizó con una cámara conectada a una computadora personal mediante la interface USB, la conexión y captura de la imagen se llevó a cabo con la ayuda de comandos y funciones de la librería “imaqtools” del software MATLAB. La cámara se configuró con una resolución VGA de 640x480 píxeles y se llevó a cabo el mismo procesamiento de imagen que en el sensor de seguimiento solar, sin embargo para cuantificar el enfoque se convirtió el valor de píxeles a grados. El centroide de la imagen solar es el parámetro que indica en que punto se está moviendo el sol, o en que dirección está fuera de enfoque la estructura. Para formar un plano cartesiano los ejes “x” y “y” toman como referencia el punto $f(0,0)=f(\text{ANCHO}/2, \text{ALTO}/2)=f(640/2, 480/2)$. La caracterización experimental consistió en posicionar la estructura hasta que el centroide de la imagen solar converja en $f(0,0)$ (enfoque perfecto), a partir de ahí la estructura se empezó a mover en el eje “x” y “y”, con la ayuda de un inclinómetro se registraron los valores equivalentes de píxeles a grados, repitiendo el mismo procedimiento para cada 0.25 grados de cada eje y signo, dando como resultado una resolución por píxel de 0.0176. La evaluación se efectuó el 14 de abril del 2013, en Mexicali Baja California, México con latitud de 32.63 grados y longitud de 115.44 grados. El software en la computadora se configuró para registrar cada 5 segundos el enfoque separado en “x”, “y” y el vector solar. Cabe mencionar que la cámara USB solo se utiliza para evaluación y que el sistema de seguimiento funciona por sí solo.

Una de las primeras pruebas fue analizar y caracterizar el sensor de la figura 6.13a

que muestra la imagen real del sol, el cual se puede ver con un radio mayor que convencional debido a la radiación difusa generada por las nubes. En la figura 6.13b se muestra la visión desde el sensor, y claramente se ve como el filtro físico hace su trabajo y sólo permite el paso de la luz solar más intensa. En el tercero 6.13c se observa la imagen del sol en memoria del microcontrolador, la cual se representa en una matriz booleana img [28x96], destacando la presencia de sol en valor verdadero. La prueba se llevó a cabo en la presencia de una nube, sin embargo, el sensor no se ve afectado, en el caso de un día claro la imagen real del sol se puede observar con una circunferencia más pequeña, pero después del filtro y vista desde el sensor es la misma imagen.

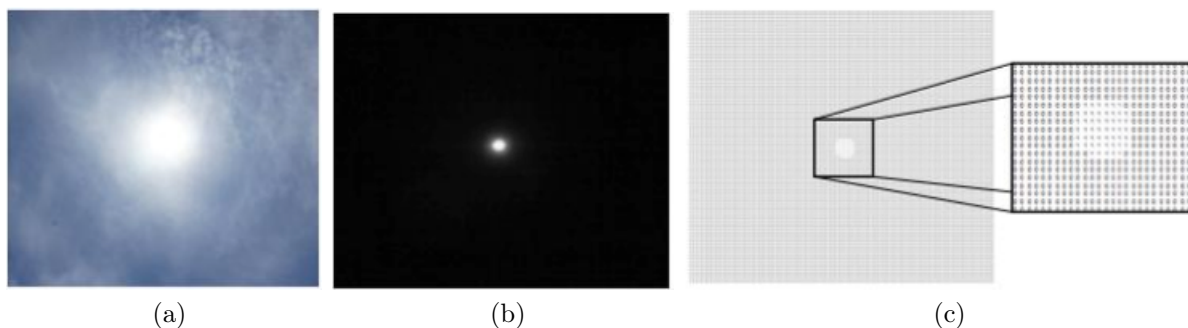


Figura 6.13: Procesamiento de imagen por pasos. a)Imagen real. b) Imagen desde el sensor. c)Imagen desde la memoria del microcontrolador.

En la Figura 6.14 se puede observar el comportamiento del ángulo acimutal, cenital y vector solar durante el periodo de evaluación. Los dos primeros ángulos cambian su valor en múltiplos de 0.0176, debido a que es la resolución en grados de la cámara que mide el ángulo de enfoque. Los resultados arrojan que el seguimiento en el ángulo acimutal obtuvo un error máximo de 0.0353 grados y un promedio de ± 0.0135 grados, lo que indica que el colector estuvo enfocado la mayor parte del tiempo. Por su parte el ángulo cenital tuvo algunos máximos de 0.0531 grados con un promedio 0.0196 grados. En este caso se obtuvo un error mayor, debido a que el sol tiene una velocidad y recorrido menor, por lo que tarda más en rebasar la histeresis del controlador on-off y este a su vez tarda más en realizar la acción de control. En la gráfica también se puede observar que el cambio de signo del ángulo cenital, se debe a que la estructura electromecánica se levanta para seguir al sol, hasta alrededor de las 11:10 horas, donde la altura solar baja a tal grado que rebasa la altura de la estructura, lo que obligó a que la superficie disminuyera su altura para seguir al sol. Alrededor de las 12:37 horas sucedió el mismo fenómeno pero en forma inversa. El error total puede determinarse por el vector solar y resultó con un error máximo de 0.0559 grados y un promedio 0.0269 grados, viéndose afectado mayormente por el ángulo cenital. En la tabla 6.1 se muestra el resumen de algunos valores importantes de la gráfica. La operación en campo probó que los fototransistores son capaces de realizar un seguimiento de apoyo mientras que el sol este fuera del ángulo de visión del sensor (cámara), una vez alcanzado el sensor

es capaz de hacer un ajuste fino. Además el sensor basado en procesamiento de video mostró el mismo comportamiento ante diferentes intensidades de radiación solar.

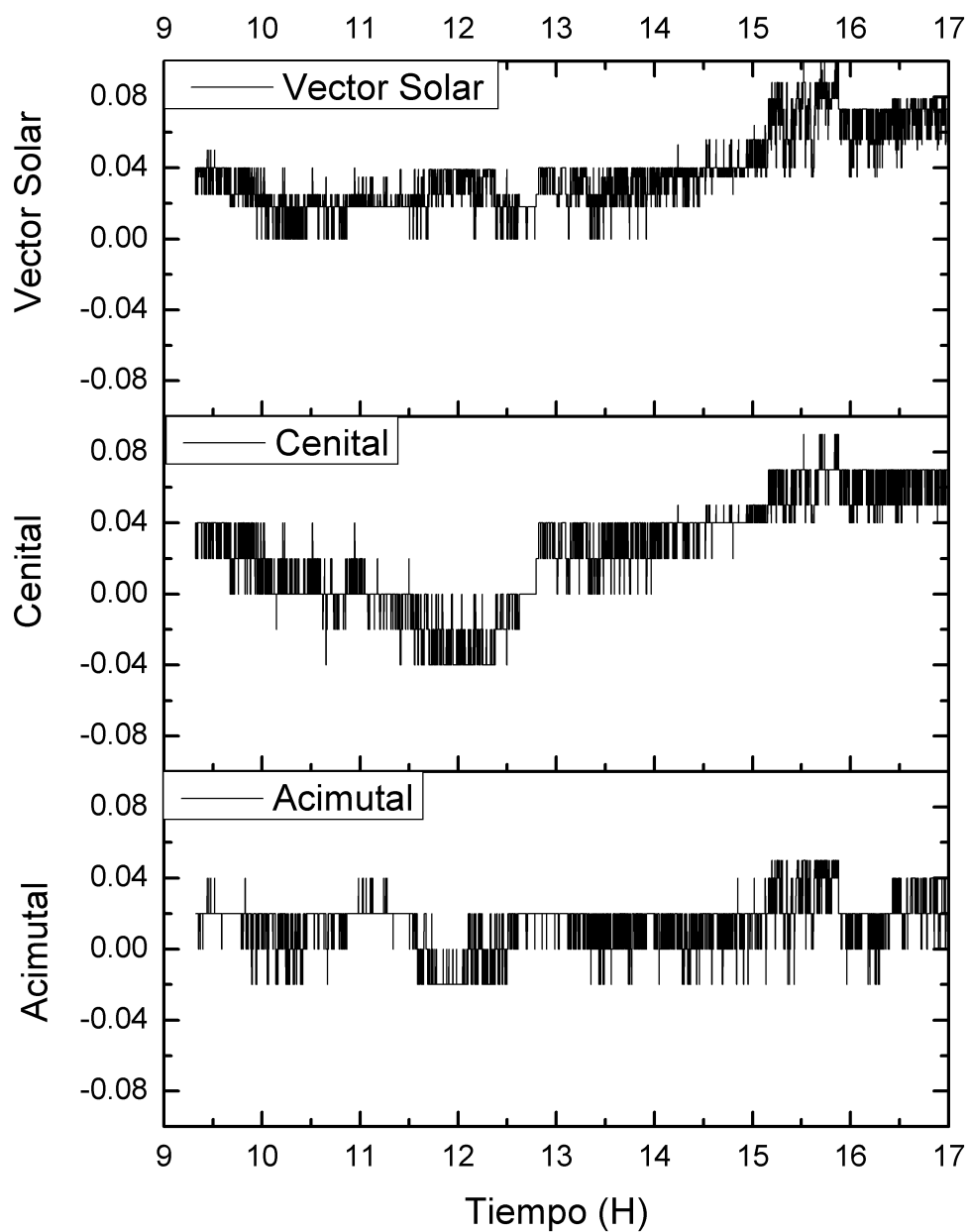


Figura 6.14: Resultados de la medición del sistema de seguimiento.

	Acimutal	Cenital	Vector Solar
Valor máximo	0.0353	0.0531	0.0559
Promedio	0.0135	0.0196	0.0269
Mediana	0.0176	0.0176	0.0250
Moda	0.0176	0.0353	0.0176

Cuadro 6.1: Resumen de los resultados experimentales del error para el ángulo acimutal, cenital y vector solar, expresado en grados.

Los resultados de la evaluación demostraron que los fototransistores son capaces de seguir el sol cuando se está fuera del ángulo de visión de la cámara. Además esta puede realizar un seguimiento fino del sol. Por otra parte, se observó el mismo comportamiento cuando diferentes intensidades de radiación solar irradian a la cámara de vídeo.

Capítulo 7

Diseño del sistema de control

En los capítulos anteriores se habló de la arquitectura de control y hardware, diseño electrónico y construcción de los dispositivos electrónicos, inclusive de un estudio experimental de la unidad del sistema de aire acondicionado solar, sin embargo la sintonización y evaluación del sistema de control requiere de un modelo matemático de la planta para sintonizar la estrategia de control, y así completar la propuesta de control. En esta sección se realiza un análisis de la respuesta transitoria de los datos experimentales de la unidad de absorción, se utilizan algoritmos de la literatura y herramientas de identificación de sistemas de Matlab, para obtener una función de transferencia de primer y segundo orden que represente la unidad de absorción, con el objetivo de evaluar la estrategia de control todo o nada y Proporcional Integral y Derivativo (PID) para determinar la que mejor se ajuste al tipo de proceso, además la función de transferencia permite sintonizar y ajustar constantes de los controladores. Finalizando con la propuesta completa del controlador de la unidad de absorción.

7.1. Análisis de respuesta transitoria de la unidad de absorción

El primer paso para analizar y diseñar un sistema de control, es obtener un modelo matemático de la planta que se considera. Para ello existen dos caminos, el primero de ellos se basa en un modelo dinámico expresado en ecuaciones diferenciales, sin embargo, la obtención analítica puede complicarse debido al tipo de sistema a modelar. El segundo método se basa en describir el comportamiento del sistema en una relación entrada-salida llamada respuesta transitoria, con este método se elige una estructura de una ecuación de primer o segundo orden según sea el caso de la planta a modelar, la cual contiene constantes que caracterizan el tipo de proceso o planta, dichas constantes se determinan analizando la respuesta del sistema real ante entradas conocidas. Esta es una de las formas más prácticas de caracterizar sistemas y popularmente es conocido como identificación de sistemas.

Una vez obtenido o identificado el modelo de la planta, es necesario analizar su

desempeño. La entrada al sistema en la operación real regularmente es impredecible y no puede expresarse analíticamente, debido a esto se definen o especifican señales de entrada estándares para comparar la respuesta de diferentes sistemas de control sobre la misma base. Estas señales de prueba se justifican porqué hay una relación entre la respuesta del sistema y su respuesta ante señales reales. Las señales de prueba que se usan regularmente son funciones escalón, rampa, parábola, impulso, senoidales, etc. Con estas señales de prueba, es posible realizar con facilidad análisis matemáticos y experimentales de sistemas de control, dado que las señales son funciones del tiempo muy simples.

7.1.1. Modelo de primer orden

La estructura de primer orden de la ecuación 7.1 puede representar un sistema térmico

$$G(s) = \frac{1}{Ts + 1} R(s), \quad (7.1)$$

la función de transferencia que relaciona la entrada-salida se obtiene mediante la ecuación 7.2,

$$\frac{G(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1}, \quad (7.2)$$

el sistema se analizara con la entrada de escalón unitario, ya que es una entrada típica a sistemas térmicos y puede interpretarse como un experimento real en el encendido y estabilización de la unidad de enfriamiento, la señal es fácil de generar, además tiene como característica que si se conoce la respuesta a una entrada escalón, es matemáticamente posible calcular la respuesta para cualquier entrada. Con condiciones iniciales en cero y transformada de Laplace de la función escalón unitario igual a $\frac{1}{s}$, entonces se sustituye $R(s) = 1/s$ en la ecuación 7.2 y se expande en fracciones parciales

$$G(s) = \frac{1}{Ts + 1} \frac{1}{s} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{T}}, \quad (7.3)$$

efectuando la transformada Laplace resulta que:

$$g(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}}, \quad (7.4)$$

considerando que el objetivo de control es regular la temperatura de salida de agua refrigerada (t_s) de la unidad de absorción en base a la energía térmica de entrada Q_e , la temperatura de salida se ve afectada por la capacidad de enfriamiento Q_s y la temperatura de entrada del agua refrigerada (t_e), esta relación se puede encontrar en el siguiente balance de energía

$$Q_s = \dot{m}c_p(T_e - T_s),$$

donde $\dot{m}$ es el flujo del agua refrigerada y c_p es el calor específico del agua refrigerada, despejando T_s

$$T_s = T_e - \frac{Q_s}{\dot{m}c_p} \quad (7.5)$$

considerando que en el sistema real se obtuvo la respuesta de salida $\frac{Q_s}{Q_e} = \frac{G(s)}{R(s)}$ se sustituye la ecuación 7.4 en 7.5 dando como resultado

$$T_s = T_e - \frac{1 - e^{-\frac{t}{T}}}{\dot{m}c_p}, \quad (7.6)$$

donde t es el tiempo en el que se evalúa el sistema y T es la constante de tiempo que define al sistema y físicamente puede interpretarse como un único valor de coeficientes de transferencia globales. Hasta este punto se tiene la estructura general de la función de transferencia de primer orden que puede representar el comportamiento dinámico de la unidad de absorción. Para encontrar T haremos uso de la característica que tiene la curva de respuesta exponencial $g(t)$, que dice que para $t = T$, el valor de $g(t)$ es 0.632, o que la respuesta $g(t)$ alcanzó 63.2 de su cambio total. Esto se aprecia con facilidad sustituyendo $t = T$ en $g(t)$.

Aprovechando esta característica se elaboró un script en Matlab para determinar el parámetro T de la función de transferencia, sin embargo antes de realizar el proceso de identificación del sistema es necesario obtener la respuesta al escalón real de la máquina de absorción. En la figura 7.1 se puede observar la respuesta al escalón de tres corridas experimentales, con el fin de obtener un modelo más aproximado se realizó un promedio de las 3 pruebas anteriores.

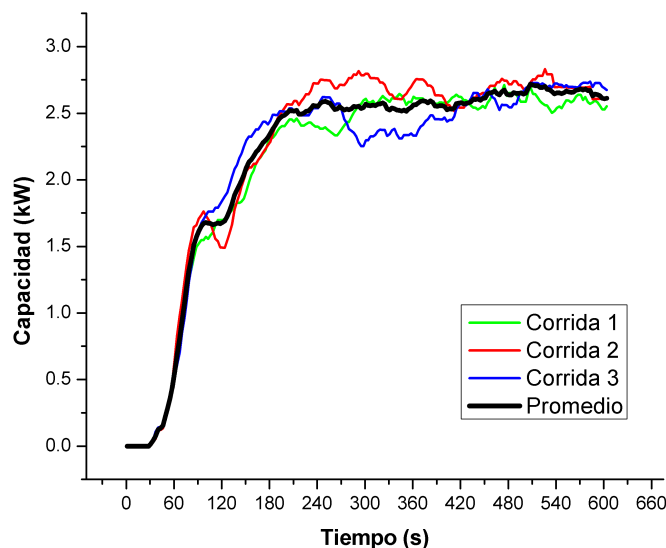


Figura 7.1: Promedio de la respuesta al escalón real de la unidad de absorción.

El script de Matlab que se muestra continuación, inicia cargando la respuesta al impulso experimental de la unidad de absorción en la variable “y1”, la cual se divide entre una ganancia K para ajustar los valores al escalón unitario, se continua en un ciclo que busca cuando el valor de la capacidad (y) alcanza el valor de 0.632 que es equivalente al 63.2 % de su valor final. En la ultima sección se define un tiempo de n muestras multiplicado por tres segundos, ya que fue el tiempo con el que se realizó la adquisición de los datos experimentales, con la función “plot” se grafican los datos reales, con la función “step” se traslapa en la gráfica la respuesta al escalón de la función de transferencia.

Código para obtener la constante T de la función de transferencia de primer orden.

```
clc
load('promedio.mat'); % Se carga archivo con información experimental en variable y1
K=2.6; % Se define ganancia
y=y1/K; % Ajuste al Escalon Unitario
T=1; % se inicializa T;
while y(T)<.632 T=T+1; end % Se encuentra T
t=0:3:(length(y1)*3)-1; % Se define el tiempo con intervalos de 3 segundos
plot(t,y1); hold on; % Se grafican datos Experimentales
sys=tf([0 1*K],[t(T) 1]) % Se crea función de transferencia
step(sys,t); % Se obtiene respuesta al escalon
```

En el proceso de la información experimental con el script de Matlab, resultó una ganancia $K = 2.6$ y una constante de tiempo $T = 92$, con una función de transferencia

$$\frac{G(s)}{R(s)} = \frac{K}{Ts + 1} = \frac{2.6}{92s + 1}. \quad (7.7)$$

En la figura 7.2 se ilustra en azul la capacidad de la unidad de absorción, en negro se visualiza la respuesta de la función de transferencia, se puede ver que en el transitorio que los datos experimentales tienen un comportamiento no lineal, sin embargo en estado estable se mejora la predicción.

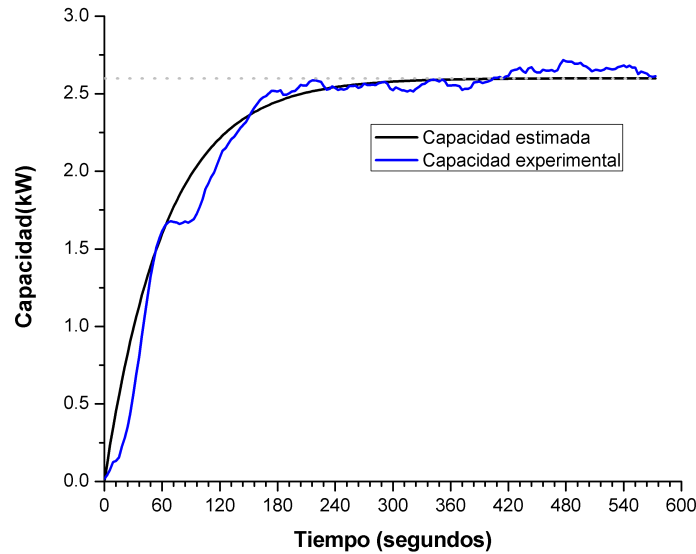


Figura 7.2: Respuesta al escalón de la unidad de absorción con una función de transferencia de primer orden.

7.1.2. Modelo de Segundo orden

En muchos casos prácticos, las características de desempeño deseadas del sistema de control se especifican en términos de cantidades en el dominio del tiempo. Los sistemas que pueden almacenar energía no responden instantáneamente y exhiben respuestas transitorias cada vez que están sujetos a entradas o perturbaciones. Con frecuencia, las características de desempeño de un sistema de control se especifican en términos de la respuesta transitoria para una entrada escalón unitario, dado que ésta es fácil de generar y es suficientemente drástica, (si se conoce la respuesta a una entrada escalón, es matemáticamente posible calcular la respuesta para cualquier entrada). La respuesta transitoria de un sistema para una entrada escalón unitario depende de las condiciones iniciales. Por conveniencia al comparar respuestas transitorias de varios sistemas, es una práctica común usar la condición inicial estándar de que el sistema está en reposo al inicio, por lo cual la salida y todas las derivadas con respecto al tiempo son cero. De

este modo, las características de respuesta se comparan con facilidad. Si se considera un sistema de segundo orden con la siguiente estructura:

$$\frac{G(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2},$$

en la cual hay que encontrar las constantes que definen al sistema ζ y ω_n , para ello hay que determinar ciertas características de desempeño del sistema que se especifican en el dominio del tiempo, con una entrada $R(s)$ escalón unitario se pueden especificar las características de la figura 7.3.

1. Tiempo de retardo, t_d : es el tiempo en el que la respuesta alcanza por primera vez el 50 % del valor final. Se buscando la posición en el vector de la información de la respuesta al escalón cuando se alcanza 0.5, se obtiene el valor de esa posición en el vector de tiempo para encontrar t_d , analíticamente se obtiene por:
2. Tiempo de levantamiento, t_r : existen varios criterios, pero se utilizara el tiempo en que la respuesta alcanza 0 al 100 % de su valor final con una tolerancia del 0.0001, Se busca la posición en el vector de la información de la respuesta al escalón cuando se alcanza un valor menor a 1.0001, se obtiene el valor de esa posición en el vector de tiempo para encontrar t_r , analíticamente se obtiene por:

$$t_r = \frac{\pi - \beta}{\omega_d} = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{w_d}{-\sigma}\right)}{\omega_d}.$$

3. Tiempo pico, t_p : es el tiempo en el que la respuesta alcanza por primera el primer pico de sobrelongacion (M_p), se busca la posición en el vector de la información de la respuesta al escalón cuando se alcanza el valor máximo, se obtiene el valor de esa posición en el vector de tiempo para encontrar , analíticamente se obtiene por:

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (7.8)$$

4. Sobrepaso máximo, M_p : es el máximo valor alcanzado del pico de la respuesta partir de la unidad, se busca la posición en el vector de la información de la respuesta al escalón cuando se alcanza el valor máximo, analíticamente se obtiene por:

$$M_p = e^{-(\zeta/\sqrt{1-\zeta^2})\pi} \quad (7.9)$$

5. Tiempo de asentamiento, t_s : es el tiempo en que se alcanza el valor final cuasiestable, se obtiene cuando el valor final sale de un rango con el criterio del 2 %, en este caso se recorrió el vector de la información de la respuesta al escalón de fin a inicio, cuando el valor excede el valor absoluto de 0.002, se obtiene el valor de esa posición en el vector de tiempo, analíticamente por el criterio del 2 % se obtiene por:

$$t_s = \frac{4}{\sigma}$$

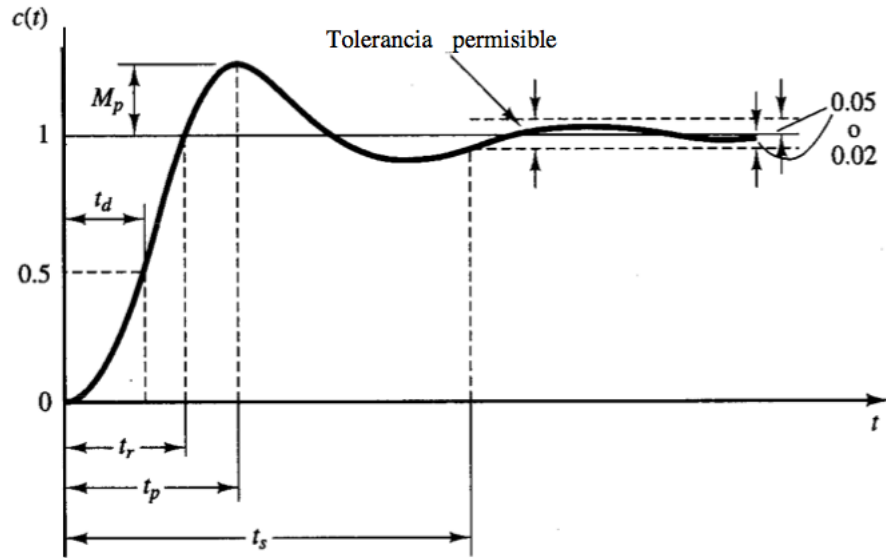


Figura 7.3: Especificaciones de la respuesta transitoria de un sistema de segundo orden.

el factor de amortiguamiento relativo se obtiene resolviendo ζ de la ecuación 7.9, dando como resultado:

$$\zeta = \frac{\log(M_p)^2 + \log(M_p) \sqrt{\log(M_p)^2 + 4\pi^2}}{2\pi^2},$$

la frecuencia natural no amortiguada se puede dar por:

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1 - \zeta^2}},$$

donde frecuencia natural amortiguada se obtiene a partir de la ecuación 7.8:

$$\omega_d = \frac{\pi}{t_p}.$$

En base a esta descripción se elaboró y código un script en Matlab para determinar el factor de amortiguamiento y la frecuencia natural a partir de la respuesta al escalón experimental.

Código para obtener la constante T de la función de transferencia de segundo orden.

```
load('promedio.mat');
K=2.6; y=y1/K;
td=y(min(find(y1>0.5&y1<0.6))) %Tiempo de retardo
k=1; while y(k)<1.0001;k=k+1; end; %Tiempo de levantamiento
tr=t(k-1);
[ymax,tp]=max(y);
tp=t(tp); %Tiempo pico
Mp=ymax-1; %Sobre paso Maximo
[k,ymax]=size(y);
k=k;
while y(k)>0.98 && y(k)< 1.02; k=k-1; end;
ts=t(k); % tiempo de asentamiento
wd=3.1416/tp; %Frecuencia natural amortiguada
z=sqrt((log(Mp)/3.1416)^2/(1+(log(Mp)/3.1416)^2)) %factor de amortiguamiento
relativo
wn=wd/sqrt(1-z^2) %frecuencia natural no amortiguada
hold on [num,den]=ord2(wnp,zp); % % % Graficar
num=wnp^2*num; printsys(num,den,'s')
step(num,den) plot(t,y)
```

Con el cual se obtuvo una $\omega_n = 0.0074$ y una $\zeta = 0.5318$, con una función de transferencia como se muestra a continuación

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n^2 + \omega_n^2} = \frac{7.5699e - 05}{s^2 + 0.012215s + 7.5699e - 05}. \quad (7.10)$$

En la figura 7.4 se ilustra en azul la capacidad de la unidad de absorción, en rojo se visualiza la respuesta de la función de transferencia, se puede ver que la predicción del modelo de segundo orden es pobre en comparación con el de primer orden, lo que indica que el método empleado para obtener el modelo experimental de segundo orden no es aconsejable debido a que la forma de los datos experimentales resultó sobreamortiguada, y el algoritmo considera un sistema subamortiguado.

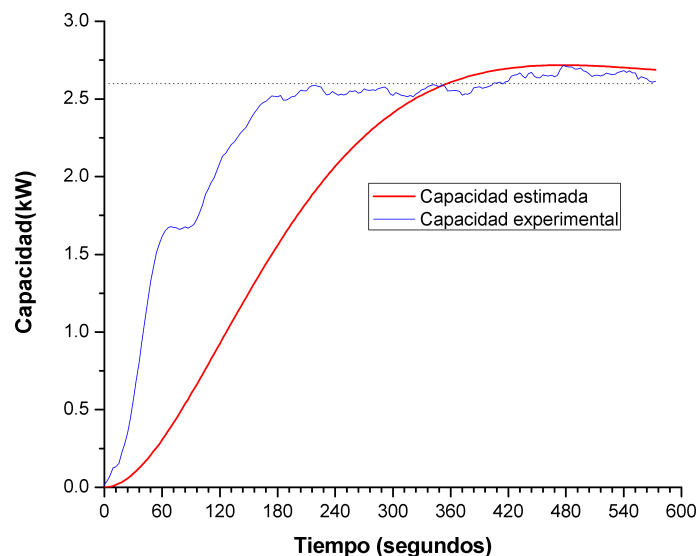


Figura 7.4: Respuesta al escalón de la unidad de absorción con una función de transferencia de segundo orden.

7.1.3. Identificación de sistemas con Matlab

Actualmente Matlab cuenta con una herramienta para la identificación de sistemas, el cual puede utilizarse ejecutando el comando “ident” en la consola de Matlab. En la figura 7.5 se ilustra la interfaz gráfica de la herramienta de identificación de sistemas, donde se introdujo como datos de entrada la señal de encendido (escalón unitario) del la unidad de absorción y su respuesta transitoria experimental, como parámetros el tiempo en que empezó el experimento y el periodo de adquisición de datos.

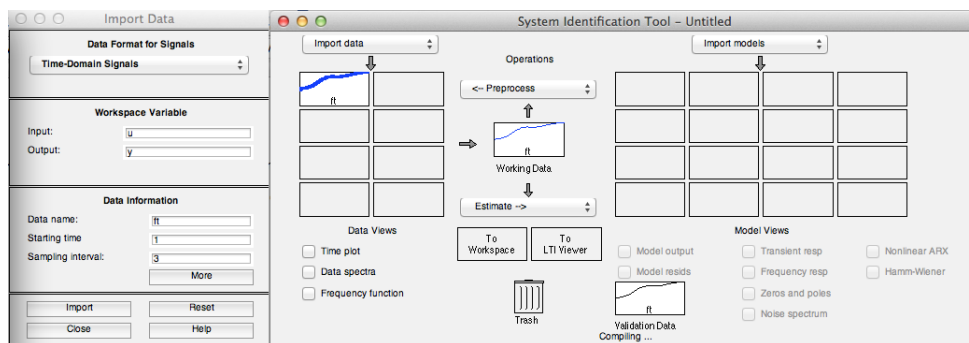


Figura 7.5: Interfaz gráfica de la herramienta “ident” de Matlab.

Con el proceso de la información se estimó una función de transferencia de primer y segundo orden, en la ecuación 7.11 se ilustra el modelo de primer orden con un

coeficiente de ajuste 87.23 %,

$$G(s) = \frac{-0.2688s + 0.03787}{s + 0.01437}, \quad (7.11)$$

el modelo de segundo orden se representa por la ecuación 7.12 con un ajuste del 88.42 %

$$G(s) = \frac{-0.008578s + 0.006403}{s^2 + 0.1726s + 0.002438}. \quad (7.12)$$

7.1.4. Respuesta transitoria del modelo ante datos experimentales

Los modelos de primer orden obtenido con el algoritmo de la sección 7.1.1 y el modelo de primer y segundo orden obtenido con la herramienta de identificación de sistemas, tienen una variancia de alrededor del 1 %, que para el propósito utilizado y por simplicidad, se utilizó el modelo de primer orden de la ecuación 7.7. La validación completa de la función de transferencia se baso en comparar la salida experimental del comportamiento del sistema y la estimada por el modelo elegido, bajo las mismas condiciones que las pruebas experimentales.

7.1.4.1. Arranque y paro

En la figura 7.6 se puede ver que el sistema se encuentra apagado, alrededor de los 30 minutos el estado de encendido cambia a uno, la temperatura de entrada al evaporador (roja) y la de entrada (azul) permanecen en el mismo valor, hasta que el equipo alcanza su capacidad nominal de enfriamiento en alrededor de 5 minutos, la máquina tarda otros 15 min en alcanzar sus condiciones de operación en cuanto al estándar $7^{\circ}C$ en temperatura del agua refrigerada de salida y $12^{\circ}C$ de entrada. Alrededor de los 90 minutos el equipo cambia de estado a apagado y poco a poco se pierde la capacidad de enfriamiento, hasta que la temperatura de salida y entrada igualan su temperatura, debido a que intercambian calor con el espacio a climatizar en el cual se tiene una carga térmica por ganancias del ambiente, esta tiende al equilibrio de la carga térmica, la cual esta alrededor de los $37^{\circ}C$. La función de transferencia se evaluó con la temperatura del agua refrigerada de entrada experimental y la señal de control del equipo de absorción, la cual se puede visualizar en negro con una muy buena predicción, el tiempo de respuesta en que se alcanza la capacidad de enfriamiento prácticamente es igual, la salida estimada con respecto a la señal experimental presenta un offset o error en estado estable, que puede ser despreciado, ya que es relativamente bajo y el tiempo de respuesta de ambas señales tienen el mismo comportamiento.

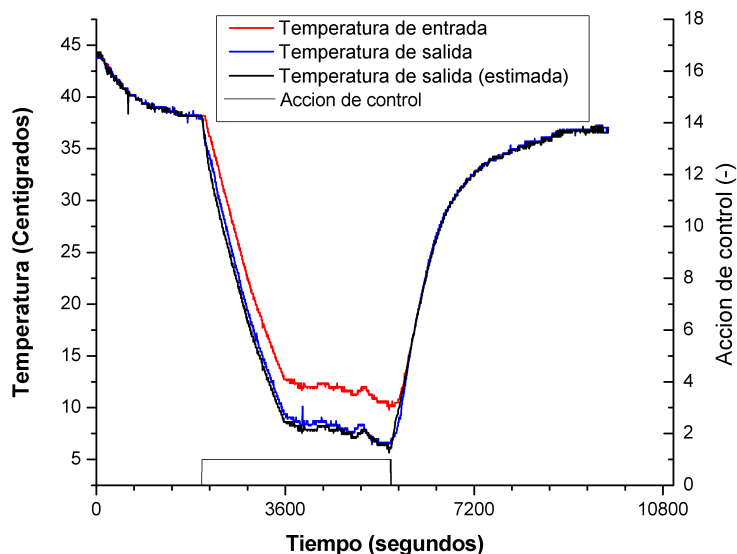


Figura 7.6: Respuesta de la función de transferencia ante datos experimentales de arranque estabilización y paro.

7.1.4.2. Operación continua con encendido y apagado

En la figura 7.7 se muestran los datos experimentales de agua refrigerada de la operación de la unidad de absorción, en la cual se presentan encendidos y apagados, se estima la salida del sistema con el objetivo de incrementar el nivel de perturbaciones y validación del modelo. Al inicio de la puesta en marcha se ve que la función de transferencia tiene una buena estimación del agua refrigerada, el error en estado estable permanece en algunos puntos de su trayectoria, cuando el equipo hace el cambio de encendido a apagado, la temperatura estimada continua bajando lo que pareciera un retardo como si la unidad aun continuara encendida, sin embargo, en pocos segundos la temperatura estimada se iguala a la experimental. Existen algunos cambios en la temperatura de entrada durante el encendido del equipo (minuto 15) y en los apagados (minutos 55, 75 y 95) donde el sistema real puede ser perturbado por parámetros no considerados en la respuesta transitoria. En general se obtuvo un buen comportamiento de la función de transferencia con el experimento real y se determina que para el tipo de aplicación y propósito de sintonización de las constantes del controlador, el comportamiento de la función de transferencia es aceptable.

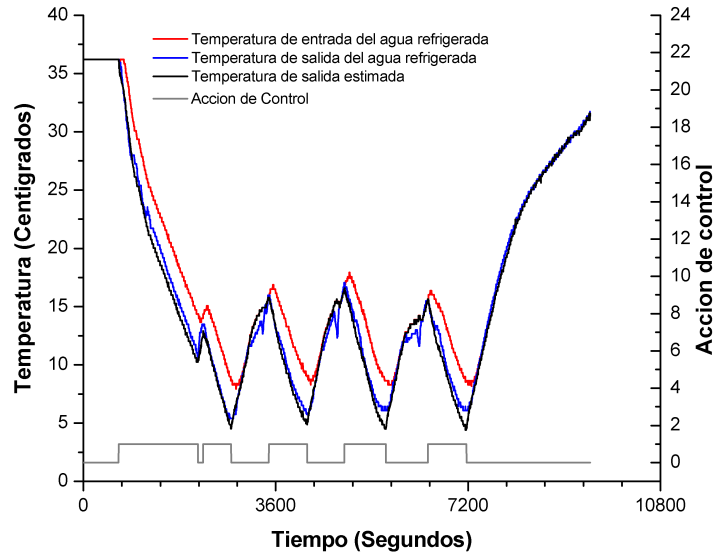


Figura 7.7: Respuesta de la función de transferencia ante datos experimentales de operación continua con encendido y apagado.

7.2. Acciones de control

La función de transferencia se evaluó con señales y perturbaciones típicas en las cuales se pudiese encontrar el lazo de control en cuestión, por ejemplo el cambio de temperatura del agua de entrada y el punto de consigna. En el primer apartado se utiliza un controlador Todo o Nada, en el segundo un PID y su sintonización.

7.2.1. Todo o nada

El sistema de control en lazo cerrado más simple y común se puede dar por un controlador todo o nada de la siguiente forma:

$$u = \begin{cases} u_{max} & \text{si } error > 0 \\ u_{min} & \text{si } error < 0 \end{cases}$$

donde el $error = pc - y$ es la resta del punto de consigna (pc) y la señal de lectura del sensor (y), una modificación para minimizar las conmutaciones de encendido y apagado es controlador con histeresis, denotado por la siguiente expresión:

$$u = \begin{cases} u_{max} & \text{si } error > h \\ u_{min} & \text{si } error < -h \end{cases}$$

donde h es el rango de histeresis.

La simulación de controlador Todo o Nada se llevo a cabo en la herramienta de Matlab Simulink, en la figura 7.8 se ilustra el diagrama con el cual se representa el lazo de control de capacidad de la unidad de absorción, la variable “ref” es un vector que contiene la información del punto de consigna a lo largo del tiempo “t” de la simulación, el punto de suma y resta calcula el error que se tiene del punto de consigna con la respuesta de la planta, este error llega al controlador “Todo o Nada” el cual calcula la acción de control que llega como entrada a la planta para modificar su salida. El bloque “Scope2” es para monitorear y almacenar los valores de error y la acción de control. En el bloque “Absorción” se encuentra la función de transferencia de la unidad de absorción que modela la capacidad de la unidad de absorción, a su salida se encuentra la ganancia y punto de suma con el bloque “Tin”, el cual representa la operación de la ecuación 7.6 para obtener la temperatura de salida, la cual se retroalimenta para recalculer el error. En el “Scope1” se captura el punto de consigna, la temperatura de entrada y la salida de la planta.

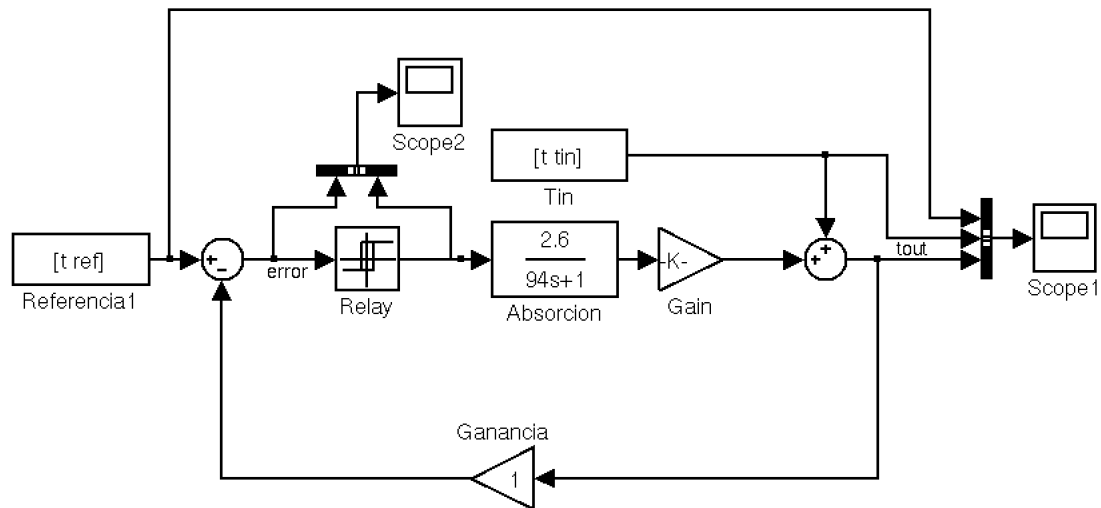


Figura 7.8: Simulación del controlador On-Off del sistema de absorción en el entorno Simulink.

7.2.1.1. Variación en la temperatura de entrada

En la simulación de la figura 7.9 de acuerdo al esquema de la figura 7.8, con un controlador “todo o nada” con 1°C de histeresis, un punto de consigna fijo a 8°C y una temperatura de entrada variable, que emula perturbaciones al equipo de enfriamiento cuando varia la carga térmica. En la gráfica se observa que se inicia con una temperatura de entrada y salida a 11°C , existe un error para que el equipo encienda y alcance su capacidad de enfriamiento nominal lo que provoca que la temperatura de salida descienda al punto de consigna y oscile entre el rango de histeresis (7 y 9°C), cuando se incrementa la temperatura de entrada también lo hace la carga térmica, por lo que

la unidad de absorción no puede llegar a los 7°C para completar el ciclo de apagado por histeresis, por lo que permanece encendida y con una temperatura de salida estable hasta donde lo permite la capacidad de enfriamiento, cuando la temperatura de entrada incrementa, también lo hace la temperatura de salida en la misma proporción debido a que ya se encuentra en su máxima capacidad de enfriamiento. En el momento que la temperatura de entrada decrementa por debajo del punto de consigna, el controlador apaga inmediatamente a la unidad de absorción, y así continua hasta que incremente nuevamente y exista un error negativo lo que indica el encendido de la unidad de absorción.

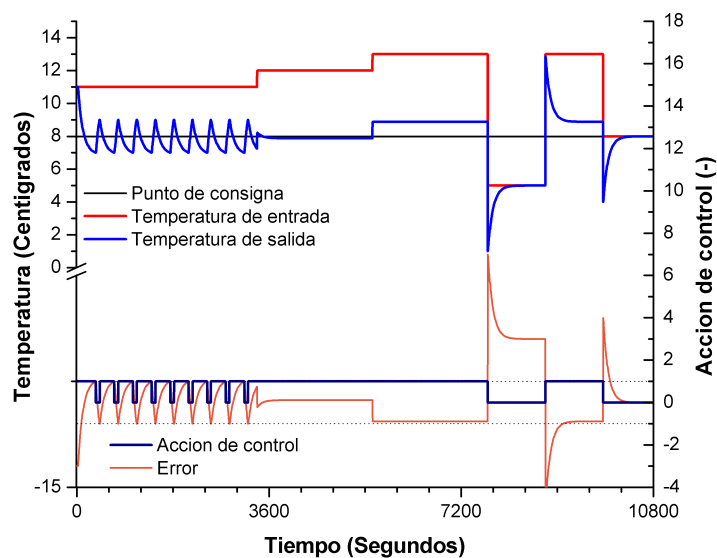


Figura 7.9: Respuesta de la función con perturbación en la temperatura de entrada.

7.2.1.2. Variación en el punto de consigna

En la simulación de la figura 7.10 de acuerdo al esquema de la figura 7.8, con un controlador “todo o nada” con 1°C de histeresis, un punto de consigna variable y una temperatura de entrada fija a 12°C que emula perturbaciones al equipo de enfriamiento cuando el usuario demanda diferentes estándares de confort. En la gráfica se observa que se inicia con una temperatura de entrada y salida a 11°C , el controlador enciende el equipo hasta llegar a la zona de histeresis y oscila entre encendido y apagado. Para mantenerse en el punto de consigna, el cual cambia alrededor de 30 minutos y mantiene el mismo comportamiento pero con periodos de conmutación más cortos, lo que indica que a menor demanda de capacidad incrementa el periodo de encendido y apagado, debido que a menor demanda de capacidad la unidad de enfriamiento se encuentra sobredimensionada y alcanza más rápido el punto de consigna establecido. A los 40 minutos el punto de consigna se iguala a la temperatura de entrada, provocando

que el error sea igual a cero y por lo tanto el controlador apaga el equipo, cuando el punto de consigna supera la temperatura de entrada, genera un error positivo indicando que se requiere de calentamiento para igualar la referencia, la aplicación no considera el aporte de calor lo que limita al controlador al estado de apagado. A los 75 minutos el punto de consigna decremента drásticamente generando un error negativo e instantáneamente se enciende el equipo de absorción, el cual poco a poco alcanza su capacidad nominal, la diferencia de temperatura deseada y la entrada es de 7°C , relativamente grande al igual que la capacidad de enfriamiento demandada, la máquina de absorción no puede alcanzarla por lo que permanece constante en 7°C , aunque el diferencial de temperatura decremента a 5°C aun no es posible cumplir la consigna por falta de capacidad de enfriamiento. Cuando el punto de consigna se sitúa la región de trabajo del equipo de absorción y la capacidad abastece la demanda de enfriamiento para alcanzar la temperatura de consigna, el controlador actúa con su característica de conmutación en el rango de histeresis. El mismo caso ocurre cuando el punto de consigna esta por encima de la temperatura de entrada. En el minuto 130 sucede un caso particular, la temperatura de consigna y la controlada se encuentra traslapadas sobre una línea recta, lo que pareciera que el controlador esta realizando un control optimo, sin embargo, se debe a que la que la demanda y capacidad de enfriamiento coinciden, y no se alcanza a llegar al limite inferior de histeresis para realizar la conmutación.

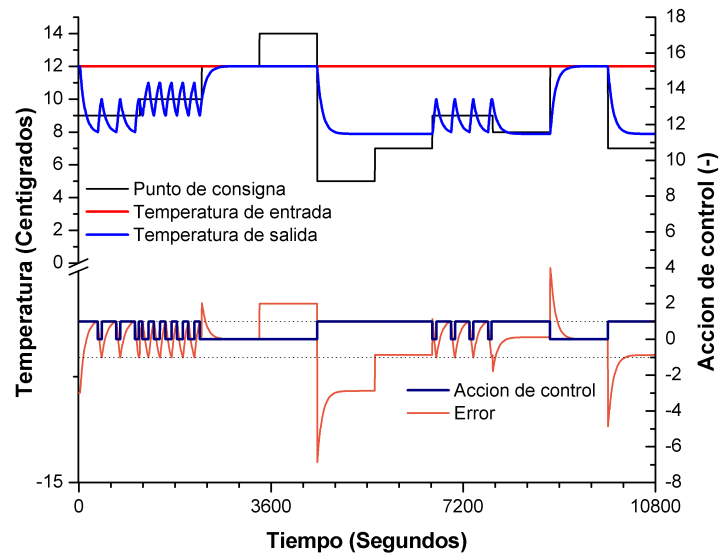


Figura 7.10: Respuesta de la función con cambios en en el punto de consigna.

7.2.2. Proporcional integral y derivativo

En este controlador se considera un Proporcional Integral y Derivativo (PID) en forma paralela, que se puede representar de la siguiente forma

$$u(t) = \left(K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \right).$$

El controlador PID genera la señal de control $u(t)$ a partir de K_p veces el error $e(t)$, más integral del error K_i veces, más la ganancia K_d por la derivada del error. Esta señal de control $u(t)$ se envía a la planta, y se obtiene la nueva salida y . La nueva salida y después se realimenta y se compara con la referencia para encontrar la nueva señal de error $e(t)$. El controlador toma esta nueva señal de error y recalcula $u(t)$.

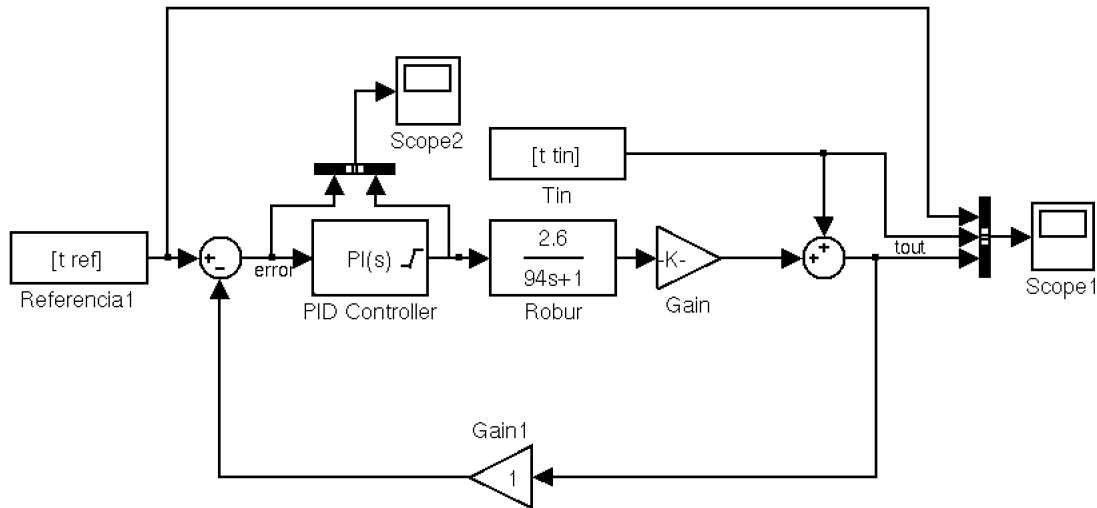


Figura 7.11: Simulación del controlador On-Off del sistema de absorción en el entorno Simulink.

7.2.2.1. Sintonización de constantes

Para sintonizar las constantes del controlador existen diversas formas o métodos descritos en la literatura, tal como el de Ziegler & Nichols y sus variantes, para efectos prácticos se utilizó la herramienta de Matlab PIDTUNE, la cual recibe como parámetro la función de transferencia del sistema y el tipo de controlador a sintonizar, a continuación se muestra los comandos utilizados directamente en la consola del software.

Comando en Matlab para sintonizar el controlador PID.

```
>> pidtune(sys,'pid')  
ans =  
1 Kp + Ki * 1/ s  
with Kp = 0.182, Ki = 0.00657 Continuous-time PI controller in parallel form.
```

Como resultado se obtuvo una constante proporcional $K_p = -0.182$, $K_i = -0.0065$ y $K_d = 0$, lo que equivaldría a un controlador proporcional e integral (PI).

7.2.2.2. Variación en la temperatura de entrada

En la simulación de la figura 7.12 de acuerdo al esquema de la figura 7.8, con un controlador “PI”, un punto de consigna fijo a 8°C y una temperatura de entrada variable, que emula perturbaciones al equipo de enfriamiento cuando varía la carga térmica. En la gráfica se observa que se inicia con una temperatura de agua refrigerada de entrada y salida a 11°C , con un error suficientemente grande para que el controlador se encuentre en saturación y encienda el equipo a plena carga, conforme la temperatura alcanza su consigna el error disminuye gradualmente al igual que la acción de control y la energía térmica de entrada demandada por la unidad de absorción. El sistema se mantiene estable hasta que alrededor del minuto 50, se crea una perturbación por el cambio de temperatura en la entrada de agua fría a 12°C , el algoritmo “PI” incrementa la acción de control para compensar el incremento de demanda de frío. En el minuto 90 se repite la misma perturbación pero con un incremento de temperatura a 13°C , lo que ocasiona que el controlador se dirija a la zona de saturación y debido a que la carga demanda a la capacidad, no es posible alcanzar el punto de consigna. Cuando la temperatura se encuentra debajo del punto de consigna el controlador se satura positivamente, requiriendo la demanda de calentamiento para alcanzar la temperatura establecida, por consideraciones de la aplicación ya comentadas anteriormente, la unidad de absorción se limita a enfriamiento. En el minuto 140 la temperatura entra nuevamente a 13°C y el controlador reacciona de la misma forma, encendiendo el equipo a plena carga. En la última sección la temperatura se iguala al punto de consigna, por lo que el error es 0 y el controlador genera una señal de control de cero o apagado.

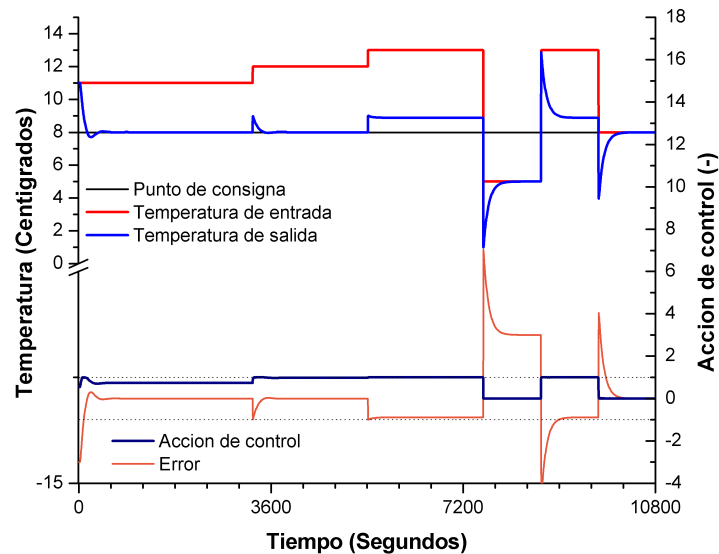


Figura 7.12: Respuesta de la función con perturbación en la temperatura de entrada.

7.2.2.3. Variación en el punto de consigna

En la simulación de la figura 7.10 de acuerdo al esquema de la figura 7.8, con un controlador “PI”, un punto de consigna variable y una temperatura de entrada fija a 12°C , que emula perturbaciones al equipo de enfriamiento cuando el usuario demanda diferentes estándares de confort. En la gráfica se observa que se inicia con una temperatura de agua refrigerada de entrada y salida a 11°C , con un error suficientemente grande para que el controlador se encuentre en saturación y encienda el equipo el equipo a plena carga, conforme la temperatura alcanza su consigna el error disminuye gradualmente, al igual que la acción de control, y la energía térmica de entrada demandada por la unidad de absorción, el punto de consigna sube en escalón reduciendo la demanda de enfriamiento, por lo que el controlador continua disminuyendo la entrada de energía térmica para mantener la temperatura de consigna, hasta que el error disminuye a cero para entrar en modo de apagado. Cuando el punto de consigna cambia a 5°C el controlador se encuentra saturado a plena carga, y la capacidad no es suficiente para alcanzar la temperatura de consigna, aunque la temperatura de consigna sube a 7°C no se afecta la acción de control ni la temperatura de salida, ya que sigue fuera de los límites de capacidad de enfriamiento. Cuando la temperatura de consigna sube a 9°C el controlador regula la energía de entrada para mantener la temperatura del agua refrigerada de salida establecida. En el momento que la temperatura de referencia se iguala al punto de consigna, el error generado es igual a cero por lo que el controlador genera una señal de control de cero o apagado.

	Temperatura variable	Referencia variable
Todo o nada	62.17 kWh	50.5999
PID	59.75 kWh	49.3747

Figura 7.14: Consumo de energía por cada estrategia de control.

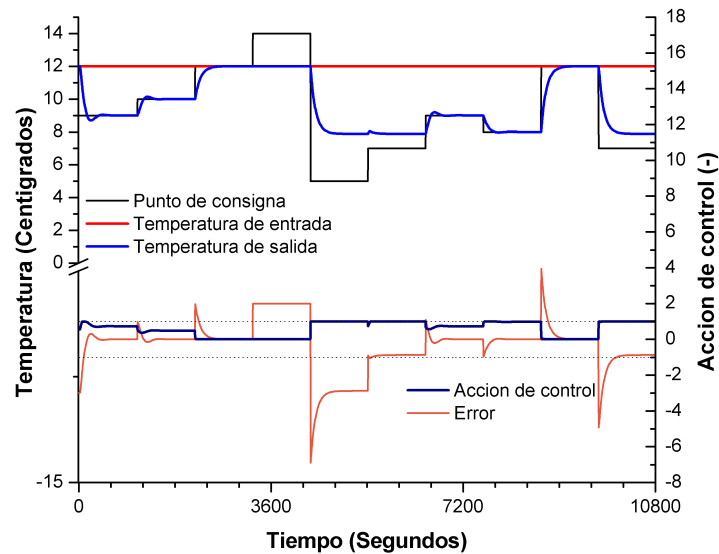


Figura 7.13: Respuesta de la función con cambios en en el punto de consigna.

7.2.3. Análisis comparativo de acciones de control

El análisis comparativo de las estrategia de control consistió en evaluar el aporte energético durante su operación, cuando el sistema es perturbado por la temperatura y por la variación del punto de consigna. En el primer caso el controlador PID obtuvo un ahorro del 4.05 % en comparación con el controlador “Todo o nada”, además el control de temperatura del PID resulta impecable en comparación con el “Todo o Nada”, además este último presento nueve conmutaciones que merman la calidad del control de temperatura. En el segundo caso el controlador PID obtuvo un ahorro del 2.42 % en comparación del “Todo o nada” el cual presento 12 apagados extras. Por lo que se recomienda utilizar un controlador PID el cual obtuvo mejor desempeño en el ahorro de energía, control de punto de consigan y evito conmutaciones innecesarias al sistema en cuestión.

7.2.4. Consideraciones y ajuste final del controlador

El sistema de control PID con ganancias $K_p = -0.182$, $K_i = -0.0065$ y $K_d = 0$, registro un desempeño favorable en comparación de la estrategia clásica “Todo o Nada”, sin embargo, con el fin de mejorar el comportamiento en cuanto a tiempo de respuesta y seguimiento se realizó una comparación del controlador con diferentes sintonizaciones, para ello se utilizó el toolbox pidtool de Matlab, en la figura 7.15 se observa en color azul claro la temperatura de salida del agua refrigerada, en azul fuerte la acción de control, en negro se observan diferentes respuestas con sus respectivas constantes. Conforme la constante K_p decrece el tiempo de respuesta también lo hace y la trayectoria de seguimiento se suaviza, la acción de control se ve afectada en su amplitud, y se ve que para el primer caso llega a saturación con un límite máximo de uno o 100 %. Se puede ver que aunque se suavice el seguimiento de temperatura aun hay un sobrepaso en la temperatura muy similar en los primeros 3 casos, la última respuesta no lo presenta sin embargo se descarta por su alto tiempo de respuesta. Concluyendo que un ajuste final del controlador no es satisfactorio ya que la respuesta original tiene un comportamiento similar pero con un mayor tiempo de respuesta.

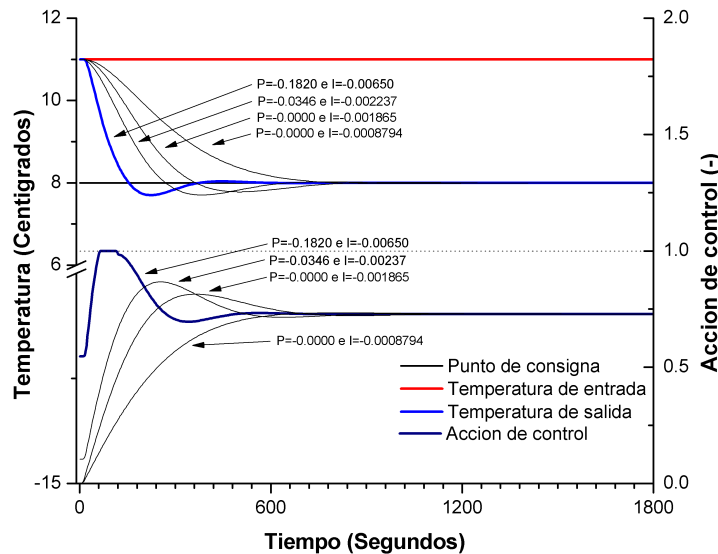


Figura 7.15: Respuesta de la temperatura de salida y acción de control, con diferentes sintonizaciones.

Capítulo 8

Conclusiones y recomendaciones

8.1. Conclusiones

- El modelo de la unidad de absorción en Aspen Plus y su estudio paramétrico con las condiciones reportadas en el experimento realizado por Lazzarin et al. (1996) en una unidad real con el mismo ciclo, permitió comparar y validar los resultados obtenidos por debajo del 9.30%. Tomando en cuenta las consideraciones realizadas, el error en el cálculo de propiedades y errores mínimos en ciclos de convergencia, se concluye que la simulación tiene una buena estimación de las variables, con lo que se tiene un simulador confiable que ayuda a especificar parámetros, coeficientes e información operativa que cataliza la ingeniería de detalle y construcción de una planta experimental.
- Los resultados de la simulación muestran que para evitar caídas de eficiencia, el flujo másico del circuito solución debe ajustarse cuando el suministro de calor en el generador disminuye. Debido a que cuando la unidad de absorción trabaja con un suministro de energía térmica de 16 kW, el COP más alto se obtuvo cuando el flujo en el circuito solución fue de 1.6 kg/h, para 18kW el COP más alto se alcanzó con 1.8 kg/h y para 20kW se obtuvo 2 kg/h. Mostrando que la disminución o incremento en el suministro de energía térmica con un flujo de diseño fijo en el circuito solución juega un papel importante en términos de eficiencia, concluyendo que hay una relación óptima, en la cual puede implementarse un lazo de control para operar a la unidad de absorción en las mejores condiciones de operación en todo momento.
- El desarrollo del sistema de adquisición de datos en un dispositivo embebido, aunado a la arquitectura modular y descentralizada que a pesar de haber presentado un tiempo de desarrollo considerable, es una propuesta con un bajo costo y tiempo de instalación y construcción, que puede realizar la automatización y control como un diseño a medida, lo que facilita la introducción del sistema de aire acondicionado solar al mercado sin uso de licencias, dispositivos genéricos o dependencias de terceros.

- A través de un banco de pruebas instalado en el Centro de Estudios de las Energías Renovables, el cual fue construido, puesto a punto y experimentado, válido que el ciclo por absorción puede ser construido por la interconexión de componentes utilizados, instrumentación y actuadores, aportando al centro de estudios el desarrollo de un banco de pruebas de un sistema de enfriamiento por absorción que puede ser impulsada con energía solar y fuego directo.
- En la fase experimental del sistema de climatización operado con el algoritmo de automatización y control se respetaron los modos de operación, lazos de control y seguridad, permitiendo una operación segura para el sistema de climatización y el usuario. Concluyendo que el algoritmo y configuración hidráulica es una propuesta válida que cumple con los requerimientos establecidos.
- La identificación de la unidad de absorción en base a un promedio de datos experimentales arrojó una función de transferencia o modelo representativo con un 87 % de ajuste, que al evaluarla con diferentes datos de pruebas reales, se obtuvo un comportamiento similar al experimental, concluyendo que para el tipo de aplicación y propósito es suficiente.
- El estudio, diseño y comparación de las estrategias de control arrojó que una estrategia PI en paralelo es la más adecuada para satisfacer el lazo de control de capacidad de la unidad de absorción, ya que presentó mejor desempeño en la regulación de la variable de control y un ahorro de energía de hasta un 4 %, además mantuvo operando el proceso en forma continua sin hacer pausas en comparación con el controlador “Todo o nada”.
- El diseño, implementación y la evaluación del sistema de seguimiento solar de dos ejes basado en procesamiento vídeo, es un desarrollo de vanguardia debido a que no utiliza equipos de computación tradicional, ya que su aplicación se realizó utilizando dispositivos embebidos de bajo costo. Además el sensor utilizado tiene un amplio ángulo de visión y no se ve afectado por la variación de la radiación solar lo que resuelve una problemática actual en los sistemas de seguimiento a lazo cerrado. La interfaz de usuario desarrollada es fácil de usar, y también tiene acceso remoto a través de la red, lo que permite su fácil integración en un campo solar compuesto por muchos colectores solares.
- Los resultados experimentales demostraron que el sistema de seguimiento solar implementado, tiene un promedio de error de enfoque en el ángulo acimutal de 0.0135 grados y un error medio en el ángulo cenital de 0.0196 grados, el error promedio en el vector solar de 0.0269 grados. Por lo anterior la tecnología propuesta puede ser considerada para su uso en una amplia gama de aplicaciones que requieren de seguimiento solar, como lo son los colectores cilindro parabólicos, disco parabólico, lente Fresnel y sistemas fotovoltaicos. Aunado es posible controlar la proporción de enfoque, lo que permite obtener un control de la energía

incidente y con ello es posible implementar un lazo de control para cuando la aplicación lo requiera.

8.2. Recomendaciones y trabajos futuros

- Explorar un sistema embebido SBS (Single board Computer) para integrar un servidor web interno al sistema de monitoreo, control y adquisición de datos.
- Investigar y determinar la función de transferencia del control de energía captada por desenfoco del campo solar cilindro parabólico.
- Continuar con el estudio experimental del lazo de control de máxima eficiencia, cuando se varia el flujo del circuito solución en base a la cantidad de energía entrante.
- Estudio e implementación de un algoritmo PID en el sistema control de seguimiento solar.
- Desarrollar el modelo de circuito impreso de montaje superficial para sistema de seguimiento solar y elaborarlo en el menor tamaño posible, así como la implementación de acelerometro y magnetometro para integrar los limites de carrera dentro del dispositivo electrónico.

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. and 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.
- Arbab, H., Jazi, B., and 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.
- ASPENPLUS. *Aspen Plus user guide*. Cambridge, Massachusetts, United States: Aspen Technology Limited, 2003.
- ASPENPLUS. *Aspen Technology Inc.* (vol. 11 ed.), 2009.
- Åström, K. J. and Hägglund, T. *Control PID Avanzado*. Madrid: Pearson Educación, 2009.
- Atmaca, I. and Yigit, A. Simulation of solar-powered absorption cooling system. *Renewable Energy*, 28(8), pp. 1277–1293, 2003.
- Atmel, A. M. D. publication 2549n-avr-05/11. *Atmel Corporation, San Jose, CA*, 2011.
- Beauregard, B. Arduino pid library. WEB Disponible en línea <https://github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library/> (accesado el 10 Enero 2015), 2012.
- Benford, F. and Bock, J. A time analysis of sunshine. *Trans. of American Illumination Engineering Society*, 34, pp. 200, 1939.
- Best, R. and Ortega, N. Solar refrigeration and cooling. *Renewable energy*, 16(1-4), pp. 685–690, 1999.
- Bolton, B. *Mediciones Y Pruebas Eléctricas y Electrónicas*, volume 1. Alfaomega, 1996.

- Bolton, B. *Mecatrónica*. Marcombo, 2001.
- Chen, F. and Feng, J. Analogue sun sensor based on the optical nonlinear compensation measuring principle. *Measurement Science and Technology*, 18, pp. 2111–2115, 2007.
- Chong, K. and 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.
- ClimateWell. *Control System Manual* (v9:33.3 EN ed.), 2010.
- Climatewell. *Product Description ClimateWell SolarChiller* (v9:33.1 EN ed.), 2010.
- ClimateWell. *User Manual* (v9:33.3 EN ed.), 2010.
- Cooper, P. The absorption of radiation in solar stills. *Solar Energy*, 12(3), pp. 333–346, 1969.
- Cope, A. and Tully, N. Simple tracking strategies for solar concentrations. *Solar energy*, 27(5), pp. 361–365, 1981.
- Darwish, N., Al-Hashimi, S., and Al-Mansoori, A. Performance analysis and evaluation of a commercial absorption–refrigeration water–ammonia (arwa) system. *International Journal of refrigeration*, 31(7), pp. 1214–1223, 2008.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*, volume third Edition. John Wiley & Sons, 2006.
- Fernández, F., Pilatowsky, I., and Ruíz, V. Programa de ensayos de una planta de enfriamiento solar para el acondicionamiento de aire. *Red Iberoamericana de Refrigeracion y Aire Acondicionado Solar*, 2006.
- Fernández-Seara, J. and Vázquez, M. Study and control of the optimal generation temperature in nh₃-h₂o absorption refrigeration systems. *Applied Thermal Engineering*, 21(3), pp. 343 – 357, 2001.
- García, C. X. Instalaciones de refrigeracion solar por absorcion: analisis y simulacion dinamica. *Congreso Mediterraneo de Climatizacion*, 2005.
- García-Arellano, C., García-Valladares, O., and Gómez, V. Experimental analysis of a transfer function for the transient response of an evaporator in an absorption refrigeration gas system. *Applied Thermal Engineering*, 30(14-15), pp. 2026 – 2033, 2010.
- Helfrick, A. and Cooper, W. Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición, 1991.

- Horuz, I. and Callander, T. Experimental investigation of a vapor absorption refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 27(1), pp. 10–16, 2004.
- Jeroendoggen. Arduino signal filteringlibrary. WEB Disponible en linea <http://jeroendoggen.github.io/Arduino-signal-filtering-library/> (accesado el 23 April 2013), 2008.
- Krumpus, M. nootropic design llc, video experimenter. WEB Disponible en linea <http://nootropicdesign.com> (accesado el 23 April 2013)
- Lazzarin, R., Gasparella, A., and Longo, G. Ammonia-water absorption machines for refrigeration: theoretical and real performances. *International journal of refrigeration*, 19(4), pp. 239–246, 1996.
- Lucas, M., Kaiser, A., Viedma, A., and Zamora, B. Energy optimization of air conditioning system using hydrosolar roof as a heat sink. *Solar Energy*, 80(4), pp. 448–458, 2006.
- Lygouras, J., Botsaris, P., Vourvoulakis, J., and Kodogiannis, V. Fuzzy logic controller implementation for a solar air-conditioning system. *Applied Energy*, 84(12), pp. 1305–1318, 2007.
- Mendiburu, D. H. Instrumentación virtual industrial, 1997.
- Newton, G. C., Gould, L. A., and Kaiser, J. Analytical design of feedback controls. *John Wiley & Sons*, New York, NY., 1957.
- Nyquist, H. Regeneration theory. *Bell System Technical Journal*, 11(1), pp. 126–147, 1932.
- Ogata, K. *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación, 2003.
- Ohgata, A., Yamashita, Y., and Nishitani, H. Robust control of an absorption heat pump system. *Computers and Chemical Engineering*, 21(Supplement 1), pp. S131 – S136. Supplement to Computers and Chemical Engineering, 6th International Symposium on Process Systems Engineering and 30th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, 1997.
- Ortega, N., Garcia-Valladares, O., Best, R., and Gomez, V. Two-phase flow modelling of a solar concentrator applied as ammonia vapor generator in an absorption refrigerator. *Renewable Energy*, 33(9), pp. 2064–2076, 2008.
- Pérez, D. *Instrumentación Electrónica Moderna y Tecnicas de Medicion*. Primera Edicion en España, 1991.
- Peuser, F. A., Remmers, K., and Schnauss, M. *Sistemas Solares Termicos* (Primera, 2005 ed.). Number 1. Censolar, 2004.

- Pita, E. *Acondicionamiento de aire*, 2002.
- ROBUR. *Use, Installation and Programming manual* (4ta ed.), 2005.
- ROBUR. *Installation, use and maintenance manual GA Line ACF 60-00 Model* (rev. B ed.), 2006.
- Rodriguez, M., Aumente, P., Millán, M., Neumann, A., and Mangual, R. Energy and carbon emission savings in spanish housing air-conditioning using solar driven absorption system. *Applied Thermal Engineering*, 28(14-15), pp. 1734–1744, 2008.
- Rohrs, C. E., Melsa, J. L., and Schiltznm, D. G. *Sistemas de control lineal*, volume I. McGraw-Hill, 1994.
- ROTARTICA. *Rotartica Product Description Thermal Solar Line* (BR050500EN ed.), 2000.
- ROTARTICA. *Rotartica Solar Installation Manual* (045 ed.), 2000.
- Ruelas, A. Sistema de control para unidad de enfriamiento activada con energia solar y biomasa. Master's thesis, Universidad Autonoma de Baja California, 2010.
- Sánchez, A. *Tecnologia Fotovoltaica Aplicada al Bombeo de Agua*. Anes, 2007.
- SolarNext. *Description chillii Controler H*, 2009.
- SolarNext. *Descrpcion chillii kit WFC18*, 2009.
- Spencer, J. Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, 2(5), pp. 172, 1971.
- 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.
- Szokolay, S. V. Solar cooling and air conditioning at the University of Queensland. *Proc. First Int. Conf. on Solar Building Technology*, 2, pp. 444–456, 1977.
- THERMAX. *Instalation Manual COGENIE* (REV 1 ed.), 2008.
- THERMAX. *Technical data COGEINE* (rev 1 ed.), 2008.
- Tiwari, G. *Solar energy: fundamentals, design, modelling and applications*. Narosa, 2002.
- Tsilingiris, P. Theoretical modelling of a solar air conditioning system for domestic applications. *Energy conversion and management*, 34(7), pp. 523–531, 1993.

- Vargas, J., Horuz, I., Callander, T., Fleming, J., and Parise, J. Simulation of the transient response of heat driven refrigerators with continuous temperature control:: Simulation de la réponse transitoire des réfrigérateurs utilisant une source de chaleur avec maîtrise de la température en continu. *International Journal of Refrigeration*, 21(8), pp. 648–660, 1998.
- Velázquez, N. and 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.
- Vidal, A., Best, R., Rivero, R., and Cervantes, J. Analysis of a combined power and refrigeration cycle by the exergy method. *Energy*, 31(15), pp. 3401–3414, 2006.
- YAZAKi. *Manual de Instalacion*, 1993.

Apéndice A

Tablas de conversión de Laplace

Cuadro A.1: Pares de transformada de Laplace

	$f(t)$	$F(s)$
1	<i>Impulso unitario</i> $\delta(t)$	1
2	<i>Medida unitaria</i> $1(t)$	$\frac{1}{s}$
3	t	$\frac{1}{s^2}$
4	$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!} \ (n = 1, 2, 3, \dots)$	$\frac{1}{s^n}$
5	$t^n \ (n = 1, 2, 3, \dots)$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
6	e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$
7	te^{-at}	$\frac{1}{(s+a)^2}$
8	$\frac{1}{(n-1)!} t^{n-1} e^{-at} \ (n = 1, 2, 3, \dots)$	$\frac{1}{(s+a)^n}$
9	$t^n e^{-at} \ (n = 1, 2, 3, \dots)$	$\frac{n!}{(s+a)^{n+1}}$
10	$\text{sen } \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
11	$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
12	$\text{senh } \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 - \omega^2}$
13	$\cosh \omega t$	$\frac{s}{s^2 - \omega^2}$

Continuación

	$f(t)$	$F(s)$
14	$\frac{1}{a}(1 - e^{-at})$	$\frac{1}{s(s+a)}$
15	$\frac{1}{b-a}(e^{-at} - e^{-bt})$	$\frac{1}{(s+a)(s+b)}$
16	$\frac{1}{b-a}(be^{-at} - ae^{-bt})$	$\frac{s}{(s+a)(s+b)}$
17	$\frac{1}{ab}[1 + \frac{1}{a-b}(be^{-at} - ae^{-bt})]$	$\frac{1}{s(s+a)(s+b)}$
18	$\frac{1}{a^2}(1 - e^{-at} - ate^{-at})$	$\frac{1}{s(s+a)^2}$
19	$\frac{1}{a^2}(at - 1 + e^{-at})$	$\frac{1}{s^2(s+a)}$
20	$e^{-at} \operatorname{sen} \omega t$	$\frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$
21	$e^{-at} \cos \omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$
22	$\frac{\omega_0}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_0 t} \operatorname{sen}(\omega_0 \sqrt{1-\zeta^2} t)$	$\frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}$
23	$-\frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_0 t} \operatorname{sen}(\omega_0 \sqrt{(1-\zeta^2)t - \phi}) \quad \phi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$	$\frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}$
24	$1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_0 t} \operatorname{sen}(\omega_0 \sqrt{(1-\zeta^2)t - \phi}) \quad \phi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$	$\frac{\omega_0^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2)}$
25	$1 - \cos \omega t$	$\frac{\omega^2}{s(s^2 + \omega^2)}$
26	$\omega t - \operatorname{sen} \omega t$	$\frac{\omega^3}{s^2(s^2 + \omega^2)}$
27	$\operatorname{sen} \omega t - \omega t \cos \omega t$	$\frac{2\omega^3}{(s^2 + \omega^2)^2}$
28	$\frac{1}{2\omega} t \operatorname{sen} \omega t$	$\frac{s}{(s^2 + \omega^2)^2}$
29	$t \cos \omega t$	$\frac{s^2 - \omega^2}{(s^2 + \omega^2)^2}$
30	$\frac{1}{\omega_{\mathfrak{A}} - \omega_{\mathfrak{B}}} (\cos \omega_1 t - \cos \omega_2 t) \quad (\omega_{\mathfrak{B}} \neq \omega_{\mathfrak{A}})$	$\frac{s}{(s^2 + \omega_{\mathfrak{B}})(s^2 + \omega_{\mathfrak{A}})}$
31	$\frac{1}{2\omega} (\operatorname{sen} \omega t + \omega t \cos \omega t)$	$\frac{s^2}{(s^2 + \omega^2)^2}$

Continuación

1	$\mathcal{L}[Af(t)] = AF(s)$
2	$\mathcal{L}[f_1(t) \pm f_2(t)] = F_1(s) \pm F_2(s)$
3	$\mathcal{L} \pm [\frac{d}{dt}f(t)] = sF(s) - f(0\pm)$
4	$\mathcal{L} \pm [\frac{d^2}{dt^2}f(t)] = s^2F(s) - sf(0\pm) - f'(0\pm)$
5	$\mathcal{L} \pm [\frac{d^n}{dt^n}f(t)] = s^nF(s) - \sum_{k=1}^n s^{n-k} f^{(k-1)}(0\pm) \text{ donde } f^{(k-1)}(t) = \frac{d^{k-1}}{dt^{k-1}}f(t)$
6	$\mathcal{L} \pm [\int f(t)dt] = \frac{F(s)}{s} + \frac{[\int f(t)dt]_{t=0\pm}}{s}$
7	$\mathcal{L} \pm [\int \int f(t)dt dt] = \frac{F(s)}{s^2} + \frac{[\int f(t)dt]_{t=0\pm}}{s^2} + \frac{[\int \int f(t)dt dt]_{t=0\pm}}{s}$
8	$\mathcal{L} \pm [\int \dots \int f(t)(dt)^n] = \frac{F(s)}{s^n} + \sum_{k=1}^n \frac{1}{s^{n-k+1}} [\int \dots \int f(t)d(t)^k]_{t=0\pm}$
9	$\mathcal{L}[\int_0^t f(t)dt] = \frac{F(s)}{s}$
10	$\int_0^\infty f(t)dt = \lim_{s \rightarrow 0} F(s) \text{ si } \int_0^\infty f(t)dt \text{ existe}$
11	$\mathcal{L}[e^{-at}f(t)] = F(s+a)$
12	$\mathcal{L}[f(t-a)1(t-a)] = e^{-as}F(s) \text{ } a \geq 0$
13	$\mathcal{L}[tf(t)] = \frac{dF(s)}{ds}$
14	$\mathcal{L}[t^2f(t)] = \frac{d^2}{ds^2}F(s)$
15	$\mathcal{L}[t^n f(t)] = (-1)^n \frac{d^n}{ds^n}F(s) \text{ } n = 1, 2, 3, \dots$
16	$\mathcal{L}[\frac{1}{t}f(t)] = \int_0^\infty F(s)ds$
17	$\mathcal{L}[f(\frac{t}{a})] = aF(as)$

Apéndice B

Manual de la aplicación de monitoreo y control

B.1. Pantalla de inicio y tipos de comunicación.

En la pantalla de inicio encontrará dos formas de comunicarse con el dispositivo electrónico de monitoreo, adquisición de datos y control. Si el dispositivo se encuentra conectado directamente al equipo de cómputo mediante una conexión USB seleccione Puerto Serial ó si su dispositivo se encuentra conectado mediante una conexión Ethernet seleccione Red TCP/IP para configurarlo remotamente.

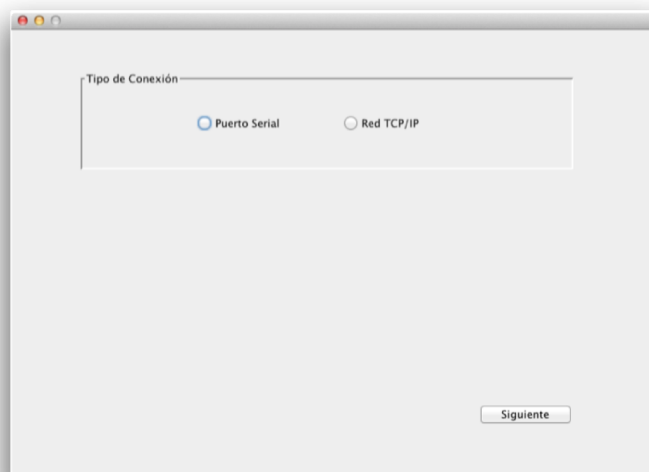


Figura B.1: Pantalla de inicio y conexión de la aplicación de monitoreo y control.

B.1.1. Conexión utilizado el Puerto Serial USB.

Seleccione del Puerto Serial si se va a utilizar el dispositivo por conexión USB.

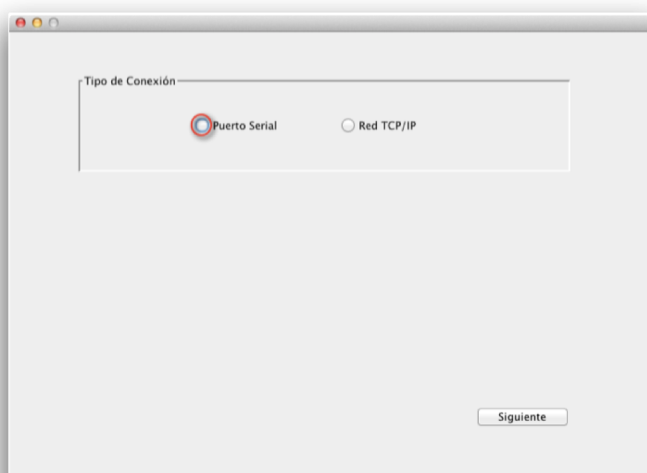


Figura B.2: Selección de conexión USB con el dispositivo electrónico de monitoreo, adquisición de datos y control.

A continuación aparecerá una lista desplegable que contendrá todos los dispositivos encontrados, seleccione el de su preferencia y de click en “Siguiente”. En caso de que el dispositivo no se encuentre en la lista verifique que el dispositivo este conectado a su equipo y presione el botón de “Buscar”.

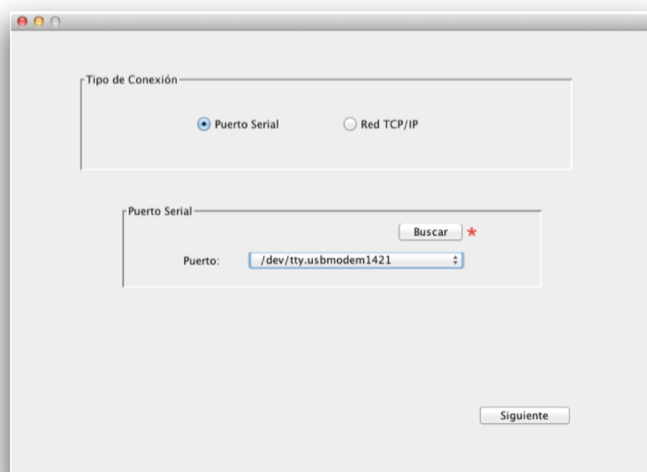


Figura B.3: Configuración y selección del puerto serial a utilizar.

B.1.2. Conexión utilizando el Puerto Ethernet

Seleccione Red TCP/IP si se va a utilizar el dispositivo por conexión USB.

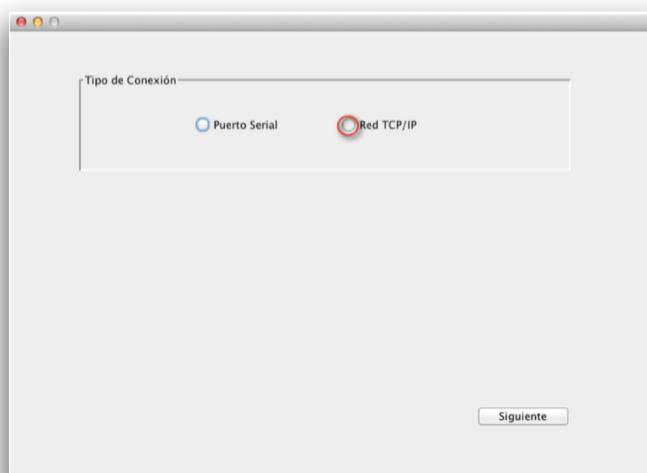


Figura B.4: Selección de conexión TCP/IP con el dispositivo electrónico de monitoreo, adquisición de datos y control.

A continuación aparecerán las opciones de "Configuración Ethernet" donde tendrá que proporcionar la dirección IP y el Puerto del dispositivo. Una vez que haya llenado los campos con esta información de click en "Siguiente"

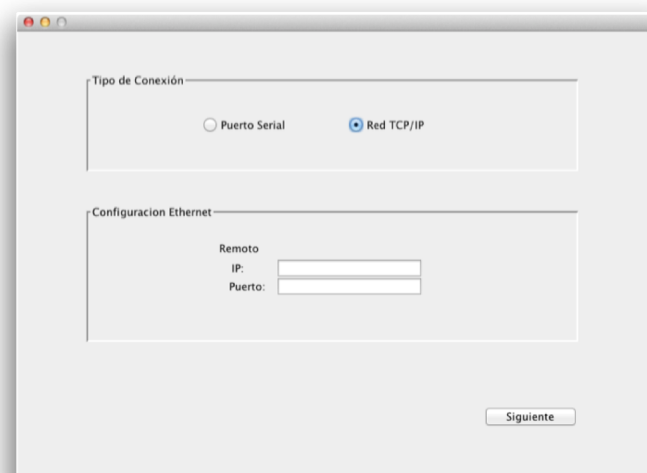


Figura B.5: Configuración de la dirección IP y puerto de conexión de red ethernet.

B.2. Configuración del dispositivo electrónico

Como se muestra en la siguiente imagen se tienen tres pestañas principales: "Configuración", "Historial" Comandos".

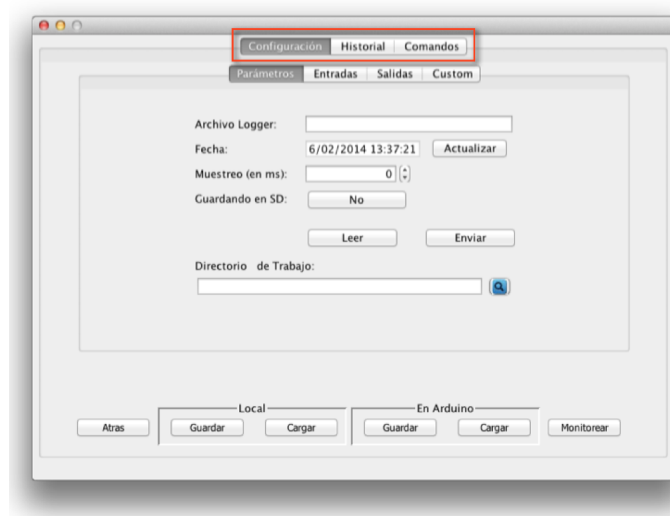


Figura B.6: Menú de la aplicación de monitoreo y control.

B.2.1. Configuración

A su vez dentro de la opciones de Configuración se tienen 4 pestañas: "Parámetros", "Entradas", "Salidas" y "Custom".

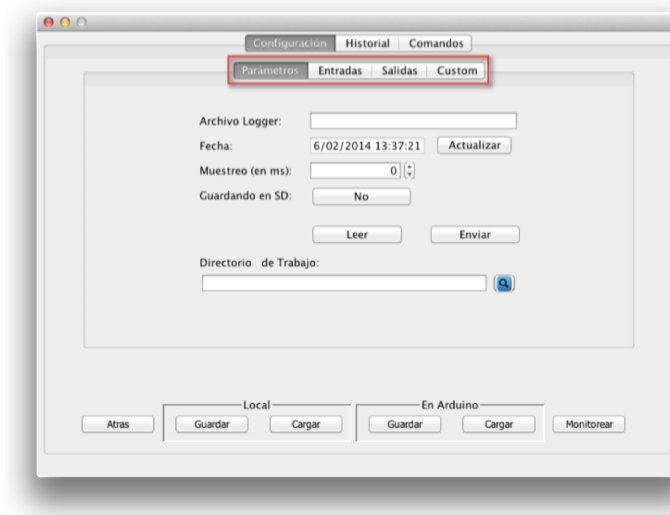


Figura B.7: Pantalla de configuración de la aplicación de monitoreo y control.

B.2.1.1. Parámetros

Dentro de la pestaña "Parámetros" usted podrá especificar:

1. Archivo Logger: en este campo deberá escribir el nombre que desea darle al archivo en donde se guardarán todos los registros del monitoreo.

2. Fecha: verifique que la fecha mostrada sea la indicada, de no ser así de click en el botón actualizar para que la aplicación tome la fecha actual.
3. Muestreo (en ms): especifique cada cuantos milisegundos desea que se guarde un nuevo registro.
4. Guardado en SD: Si escoge la opción "Si" el archivo de registros se guardará en la memoria SD del dispositivo electrónico, si escoge "No" no se creará archivo de registros.
5. Botón "Leer": carga la configuración existente del dispositivo electrónico.
6. Botón "Enviar": escribe o envía la configuración que usted especificó al dispositivo.
7. Directorio de Trabajo: para esto ocupará hacer click en el icono de búsqueda para seleccionar el directorio de trabajo.

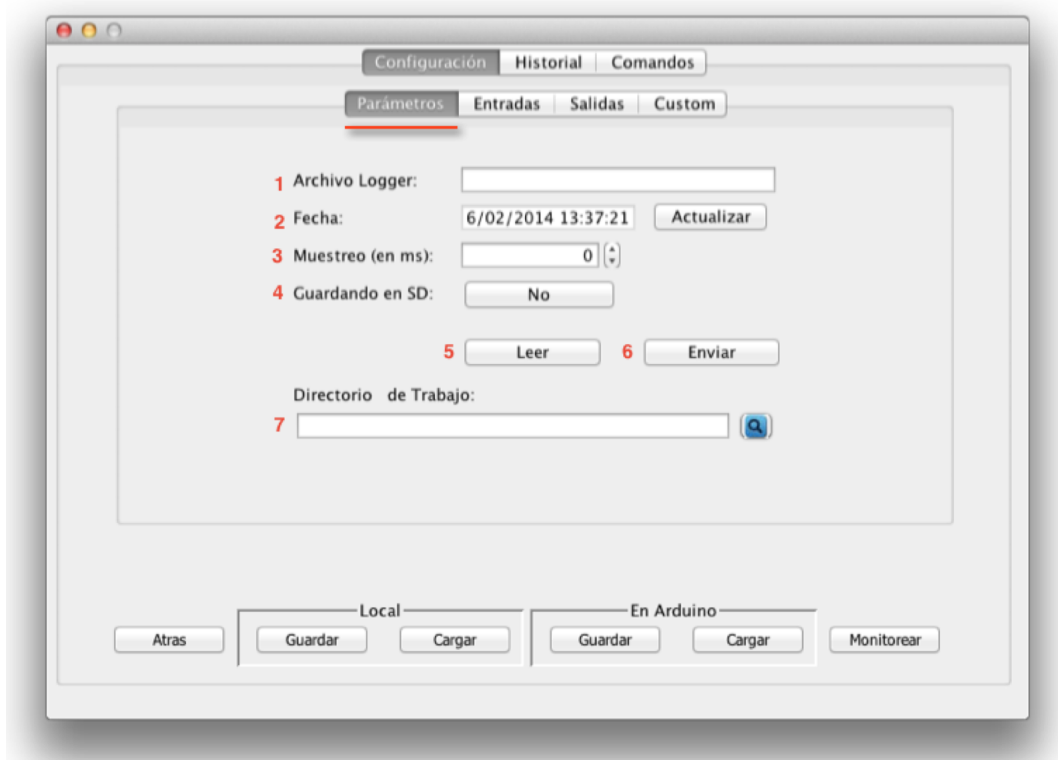


Figura B.8: Descripción de los parámetros de configuración.

La funcionalidad del Menú ubicado en la parte inferior de la pantalla es la siguiente:

1. "Atrás": nos lleva a la pantalla principal.

2. "Guardar" (Local): se guardan las configuraciones en un archivo de configuración en el equipo de cómputo como respaldo.
3. "Cargar" (Local): se cargan las configuraciones desde un archivo local en la computadora, para configurar el dispositivo con una configuración de respaldo.
4. "Guardar" (en dispositivo electrónico): se envía la configuración al dispositivo electrónico por medio de la conexión elegida, la configuración se guarda en la memoria MicroSD del dispositivo electrónico y cada vez que este se enciende carga la configuración para trabajar de forma autónoma.
5. "Cargar" (desde el dispositivo): se carga la configuración del dispositivo de monitoreo en la aplicación de monitoreo, para conocerla modificarla o simplemente para realizar el monitoreo y control.
6. "Monitorear": nos lleva al menú de Gráficas. Nota: Para poder monitorear se debe descargar la configuración desde el dispositivo electrónico o en su defecto guardar una nueva configuración.

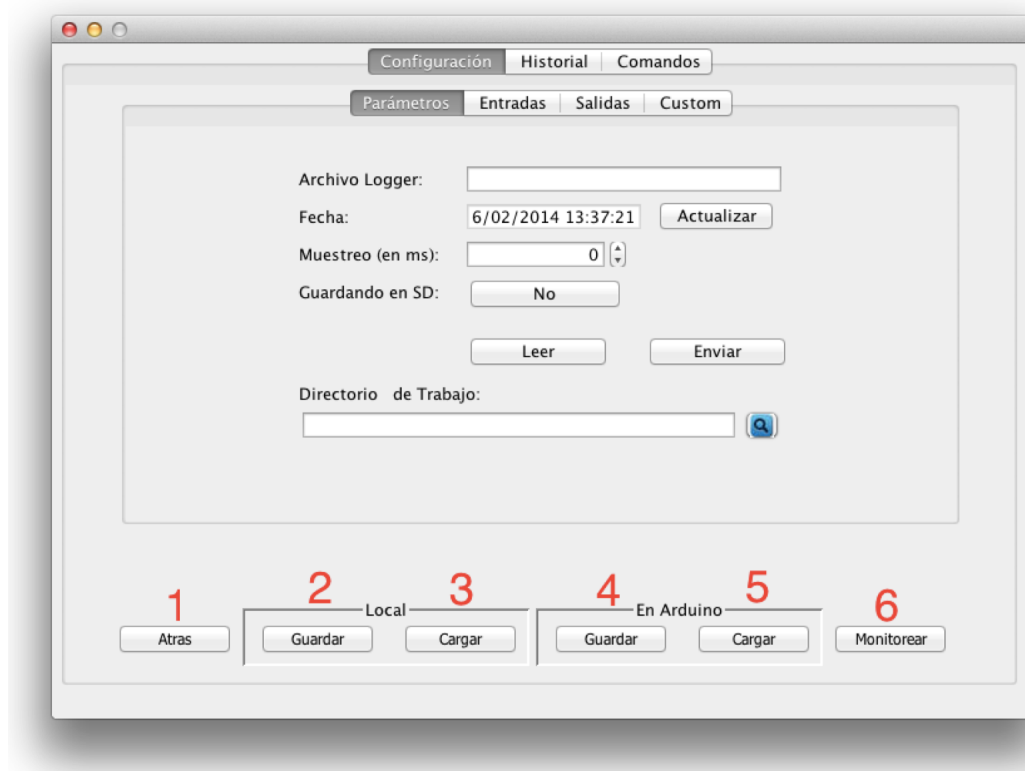


Figura B.9: Descripción del menú inferior de parámetros.

B.2.1.2. Entradas analógicas

Aquí se podrán habilitar las entradas del dispositivo electrónico (A0 ... A15) por las cuales desees monitorear señales, se les puede asignar un nombre a cada una de ellas y asignar el tipo de sensor que se utilizará para cada una de las entradas en particular, por ejemplo el tipo de sensor se desplegara un menú para escoger entre temperatura, flujo, presión, voltaje, frecuencia, amperaje, entre otros. Como sensor en el caso de temperatura se puede elegir un PT100, un termopar o termistor, así la aplicación seleccionará que modelo o ecuación aplica a la entrada analógica para convertir la señal electrónica en una magnitud física. En los recuadros de ecuación se considera las constantes de corrección o calibración de un polinomio de segundo orden de la siguiente forma $f(x) = ax^2 + bx^1 + cx^0$.

ID	Nombre	Ecuación			Tipo Sensor	Sensor
		a	b	c		
☐ A0	A0	0	1	0	Tipo de S...	7-Sensor 7
☐ A1	A1	0	1	0	Tipo de S...	7-Sensor 7
☐ A2	A2	0	1	0	Tipo de S...	7-Sensor 7
☐ A3	A3	0	1	0	Tipo de S...	7-Sensor 7
☐ A4	A4	0	1	0	Tipo de S...	7-Sensor 7
☐ A5	A5	0	1	0	Tipo de S...	7-Sensor 7
☐ A6	A6	0	1	0	Tipo de S...	7-Sensor 7
☐ A7	A7	0	1	0	Tipo de S...	7-Sensor 7

Figura B.10: Descripción de la configuración de las entradas analógicas.

B.2.1.3. Entradas digitales

Aquí se podrán activar las entradas digitales que utilizará el dispositivo, al igual que las entradas analógicas también podrás personalizar el nombre de cada una de ellas.

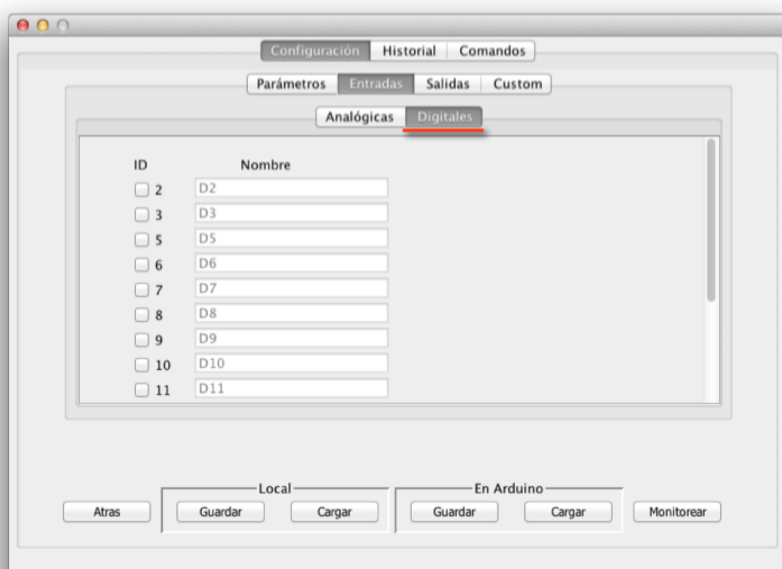


Figura B.11: Descripción de la configuración de las entradas digitales

B.2.1.4. Salidas digitales y PWM

En esta sección se pueden habilitar las salidas ya sean de tipo Digital o PWM que va a utilizar, también tiene la opción de personalizar el nombre de cada salida.

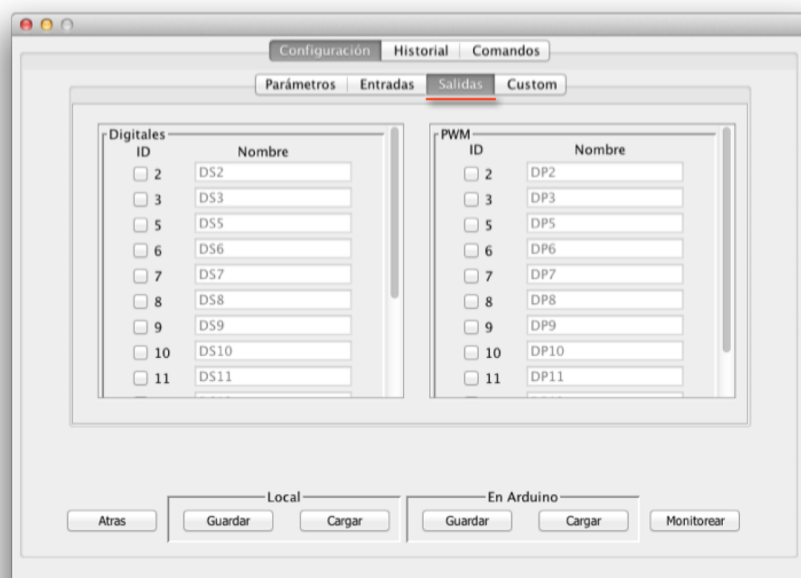


Figura B.12: Descripción de la configuración de las salidas digitales y PWM.

B.2.2. Historial

En la pestaña de historial se puede visualizar los datos adquiridos de un experimento previo, para ello es necesario pulsar en el botón de abrir y buscar el archivo “.CSV”, cuando se seleccione dicho archivo se mostrarán los datos en una gráfica tal cual como se mostraban durante el monitoreo. El archivo “.CSV” es un formato universal que se puede abrir y procesar a través de excel, en el cual se mostrarán los datos con sus respectivos encabezados.

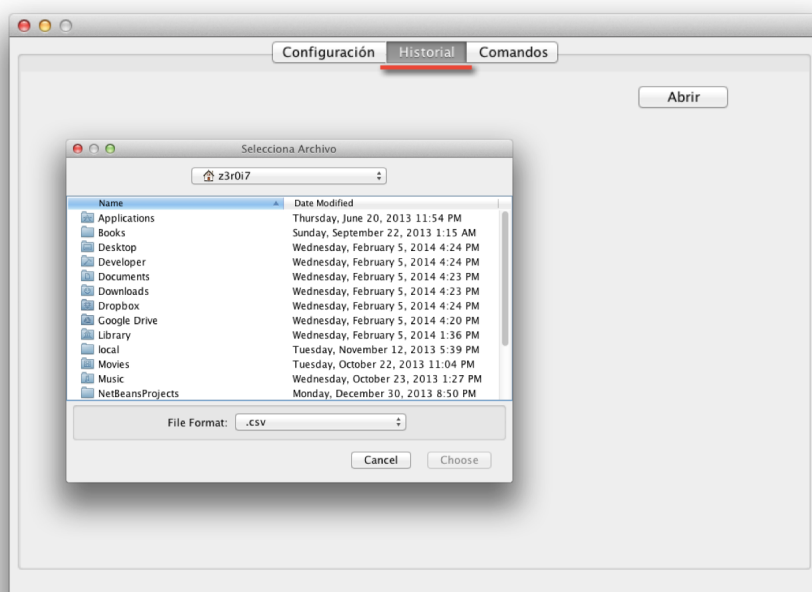


Figura B.13: Búsqueda del archivo de información para visualizar los datos en historial.

B.2.3. Monitoreo

Una vez configurado y pulsado el botón de monitorear se presentara la pestañas de gráficas, en la cual podremos regresar al menú de configuración o generar una gráfica de monitoreo, en el caso de que existan gráficas guardadas anteriormente se cargarán y adquirirá datos inmediatamente. Para dar de alta una nueva gráfica se pulsa el botón de nueva gráfica.



Figura B.14: Descripción de la ventana de monitoreo.

a continuación se desplegará una ventana flotante con la siguiente descripción:

1. “Abrir en”, se selecciona si la gráfica se mostrará en una ventana flotante o en pestaña.
2. “Título”, se ingresa el título de la gráfica.
3. “Archivo”, se ingresa el nombre del archivo “.CSV” donde se guardaran los datos en el equipo de cómputo, en caso de dejarse en blanco no se creará.
4. “Unidades”, se ingresa el texto a desplegar en la amplitud de la gráfica.
5. “Tipo”, es el tipo de gráfica, en secuencial se registran todo los datos con respecto al tiempo, en modo osciloscopio se mostrarán los datos en un periodo de tiempo y después de él se eliminarán.

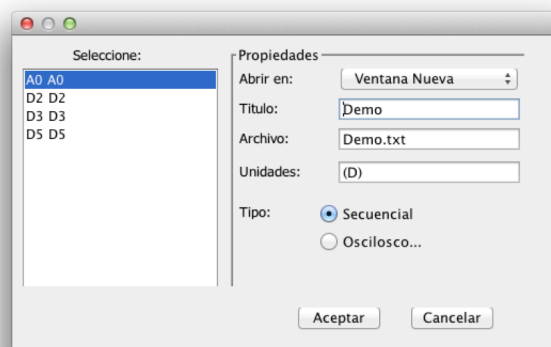
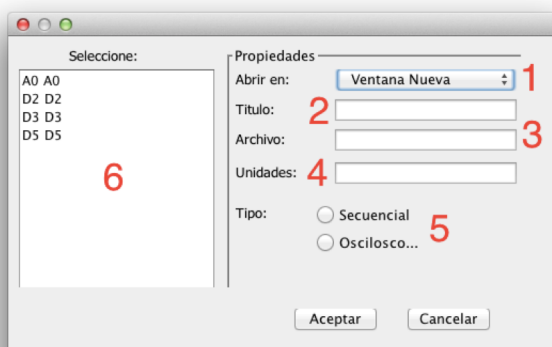


Figura B.15: Descripción de la configuración y creación de gráficas en tiempo real

Una vez creada la o las gráficas se desplegarán y adquirirán datos según el tiempo de muestreo, las gráficas pueden guardarse para evitar crearlas cada vez que se inicie la aplicación, al pulsar el botón de cargar se despliegan nuevamente las gráficas actuales y las que pudiesen haberse cerrado. La gráfica puede pausarse y reiniciar su monitoreo, además es posible ocultar la información de la gráfica de cada entrada con tan solo pulsar en el nombre que aparece debajo de la gráfica.



Figura B.16: Descripción de las gráficas de monitoreo en tiempo real.

B.2.4. Control

Una vez configurado y pulsado el botón de monitorear se puede elegir la pestaña de control, en la cual aparecerá las salidas digitales y PWM previamente configuradas. Las salidas digitales contienen una casilla de verificación en la cual se puede modificar su estado manualmente, donde una paloma indica un 1 lógico de 5volts y el cuadro vacío indica 0 lógico con 0 volts. Las salidas PWM contienen una barra de estado, la cual de izquierda a derecha hasta la perilla indica el porcentaje del tiempo de trabajo en alta y después de la perilla el tiempo de trabajo en alta, el recorrido total del 0 al 100 % @1KH.

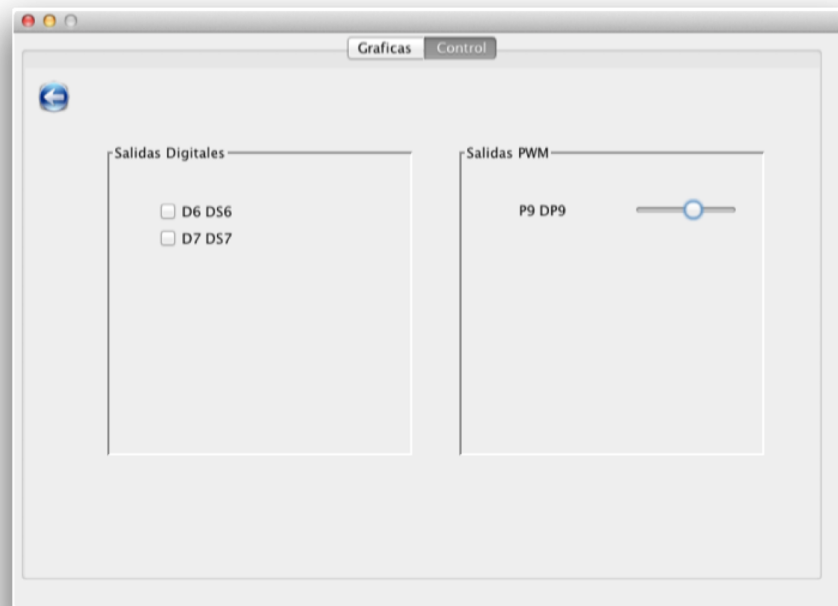


Figura B.17: Descripción las salidas de control digitales y PWM