

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE
ALTA PRECISIÓN EN TEMPERATURA PARA UNA
CÁMARA DE CLIMA CONTROLADO

POR

ADRIÁN MARTÍN COBOS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y
RENOVABLE

MAYO 2014

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE
ALTA PRECISIÓN EN TEMPERATURA PARA UNA
CÁMARA DE CLIMA CONTROLADO**

POR

ADRIÁN MARTÍN COBOS

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y
RENOVABLE**

DIRECTOR

DR. SANTOS MÉNDEZ DÍAZ

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN,

MAYO 2014

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la tesis **Implementación de un sistema de control de alta precisión en temperatura para una cámara de clima controlado** realizada por el alumno Adrián Martín Cobos, con número de matrícula 1362666, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

El Comité de Tesis

Dr. Santos Méndez Díaz
Director

Dr. Fausto Alejandro Sánchez Cruz
Revisor

M.C. Antonio Cayetano Lozano Garza
Revisor

Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de División de Estudios de Posgrado

Agradecimientos:

Al Dr. Santos Méndez Díaz, director de tesis, por su labor de tutor durante estos años en el departamento y en la realización de este trabajo.

Al Dr. Simón Martínez Martínez, por su apoyo en la realización de este trabajo y demás proyectos elaborados durante estos años.

Al Dr. Fausto Sánchez Cruz, por su apoyo, sus enseñanzas académicas y profesionales.

A los profesores Dr. Arturo Morales, Dra. Elvira Martínez, M.C. Miguel García Yera y M.C. Hugo Ramírez por sus enseñanzas en las aulas de clase y en el laboratorio.

A los compañeros de la maestría, especialmente a los más longevos Rafael Olvera, Eduardo Ferrer, Edgar Martínez, Héctor Hernández, Eduardo Rodríguez, David Mares, Bernardino Brizuela, Fernando Ibarra, Andrés Patiño. Y mis nuevos compañeros Yonathan Loredó, Carlos Uder, Ricardo Delgado, René Mondragón, Rosario Rodríguez, Carlos Sánchez.

Especial dedicación...

A mis padres:

José Salvador Martín Díaz...

Alma Rosa Cobos Rivera...

A mis hermanos:

Rodrigo Martín Cobos...

André José Martín Cobos...

Resumen

Los equipos de refrigeración deben cumplir con las normativas nacionales e internacionales, y deben ser eficientes en el consumo de energía para poder ser fabricados y comercializados. Es común que durante la etapa de diseño y prueba de prototipos de máquinas y dispositivos térmicos, se requiera medir el desempeño de éstos en condiciones específicas y de forma controlada. En este sentido, algunos productos requieren ser probados a baja temperatura (pruebas con temperaturas cerca de los $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) y la información obtenida suele ser de gran relevancia para evaluar la respuesta dinámica, el desempeño y el deterioro de máquinas que operan en condiciones climáticas extremas.

La cámara climática que se desarrolló en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) excede en capacidades y desempeño a su predecesora, la *Cámara de Bajo Costo*, construida y diseñada por el Grupo de Investigación en Energías Térmica y Renovable de la UANL en el *Centro de Tecnología* CETEC Whirlpool México, ubicado en el municipio de Apodaca en el Estado de Nuevo León. El rango de temperaturas de la cámara climática se han ampliado (-30 a $45\text{ }^{\circ}\text{C}$), la precisión en la temperatura es de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. La adquisición de datos registra en una computadora las temperaturas, voltaje, corriente y calcula la potencia consumida por dispositivos o máquinas en prueba, dentro del programa se crea un registro del consumo eléctrico. En el sistema de control se gobiernan válvulas dentro del circuito de refrigeración y resistencias eléctricas que acondicionan el clima interno de la cámara. Para lograr estos avances se desarrollaron una amplia gama de tareas, mismas que han mostrado efectividad. En este documento se da cuenta de algunas de las estrategias que se han desarrollado y cuya principal aportación es la implementación de un sistema de control basado en el controlador PID (proporcional, integral, derivativo) altamente flexible, el cual gobierna la refrigeración y calefacción; dando como ventaja la versatilidad de programación en pruebas, ya sean con cambios dinámicos o estáticos en el tiempo y en alguna propiedad física del ambiente con variaciones mínimas.

Los logros se alcanzaron debido al apoyo y trabajo del personal académico, vinculación con empresas del ramo de la refrigeración y una fuerte convicción del equipo de trabajo. Pruebas preliminares del desempeño de refrigeradores comercializados con el nombre de *Chillerators* por empresas del consorcio Whirlpool en América del Norte, permitieron

identificar áreas de oportunidad que condujeron a mejoras en el algoritmo de control, en la programación de la aplicación, así como en la adquisición de datos. La cámara de clima controlado ha sido el esfuerzo de todo un equipo que lleva como objetivo la formación de recursos humanos de alto nivel académico y con la capacidad de desarrollar proyectos de investigación básica y aplicada en las distintas disciplinas de la ingeniería energética. Es importante mencionar que el trabajo que se reporta en esta Tesis fue reconocida a nivel estatal a través de la nominación al Premio Estatal de la Juventud de Nuevo León, y nacional con el premio NI Reto Académico 2013 al Desarrollo Tecnológico de Vanguardia organizado por la empresa National Instruments.

Índice general

1. Introducción	3
1.1. Motivación	3
1.2. Antecedentes y estado del arte	5
1.2.1. Fundamentos de ciclos de refrigeración por compresión de vapor	8
1.2.2. Fundamentos de control	13
1.2.3. Estado del arte	23
1.3. Planteamiento y justificación del problema	25
1.4. Objetivos	26
1.4.1. Objetivo General	26
1.4.2. Objetivo Específico A	26
1.4.3. Objetivo Especifico B	27
1.5. Hipótesis	27
2. Construcción y puesta en punto de la cámara climática	28
2.1. Cámara de bajo costo: CETEC Whirlpool	28
2.2. Diseño y construcción de la cámara climática	31
2.3. Sistema de adquisición de datos	33
2.3.1. Temperatura	33
2.3.2. Variables Eléctricas	35
2.3.3. Otras variables: Presión de succión, temperatura de succión	36
2.4. Sistema de Control	39
2.4.1. Descripción general	39
2.4.2. Sistema de refrigeración	40
2.4.3. Sistema de humidificación	41

2.5. Sintonizado	42
3. Metodología de ensayos y pruebas preliminares	53
3.1. Introducción	53
3.2. Metodología de ensayos	54
3.3. Pruebas preliminares: Pruebas a Modelos Chillerator	57
3.4. Discusión de resultados	61
3.4.1. Implementación del sistema de control	61
3.4.2. Sistema de adquisición de datos	62
3.4.3. Programación de control	63
4. Conclusiones	69
4.1. Trabajo Futuro	71

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La energía es insumo fundamental en nuestra vida diaria, es aquello que mueve al mundo pero además es la principal causa del cambio climático. En donde emplear cada kWh de energía en forma eficiente supone una fuente de ventaja competitiva para el país y las empresas. El consumo energético de un refrigerador es de suma importancia en la decisión de compra de usuarios domésticos. Cada kWh cuesta al usuario, pero sin conciencia en el consumo, el precio que paga el usuario se puede duplicar cuando se aplican las tarifas de alto consumo (DAC). De forma que cambiar de hábitos o sustituir los aparatos por otros nos ahorra dinero; en algunos casos la alternativa que se propone puede parecer inicialmente más costosa.

Por mucho, el refrigerador es el producto con mayor venta y uso a nivel mundial según la revista mexicana del consumidor. Actualmente podemos encontrarlos en una gran variedad de modelos: de una o dos puertas, con congelador y refrigerador. Como cabe suponer, el desempeño varía de acuerdo a las características físicas. Al colocar los refrigeradores bajo pruebas, buscamos simular las condiciones extremas de trabajo, se coleccionan datos en dicha prueba y con estos tomar acciones en el diseño, programación o en la decisión de los materiales que los componen. No solo el desempeño del refrigerador, sino que los componentes son de calidad colocando al producto del cliente o empresa con evidencia física.

Un aspecto típico en los refrigeradores convencionales es que cuenten con un compartimiento de alimentos y por lo menos un compartimiento congelador. Dichos com-

partimientos son incorporados con temperaturas entre 0 y -13 °C, y se deben mantener operando por un tiempo suficientemente largo para alcanzar la condición térmica estable. La figura 1.1 muestra las condiciones térmicas que se deben monitorear con uso de instrumentación. La instrumentación es colocada en distancias determinadas por la Norma Oficial Mexicana de energía NOM-ENER-015-2012. La instrumentación dará muestra de la distribución de temperaturas a lo largo de los compartimientos del refrigerador.

9.10 Temperaturas de referencia normalizadas

APARATO	COMPARTIMIENTO DE REFERENCIA	TEMPERATURA DE REFERENCIA
Refrigerador solo	de alimentos	3,3°C
Refrigerador convencional	congelador	-9,4°C
Refrigerador-congelador	congelador	-15,0°C
Congelador	congelador	-17,8°C

Figura 1.1: Datos de referencia de la NOM-ENER-015-2012

La medición de humedad se realiza debido que es factor en la obstrucción de los evaporadores, evitando la circulación de aire debido a la generación de escarcha. Debido a las bajas temperaturas en el evaporador, la humedad del aire se condensa formando hielo en el intercambiador de calor. La norma establece las condiciones que debe cumplir el lugar de prueba en relación a la velocidad de aire, y las variaciones de temperatura en la dirección vertical. Más adelante se detallan aspectos y características del ambiente de prueba según la norma.

La cámara fue diseñada para poder ser empleada en una amplia variedad y tipos de ensayos, además de su aplicación en pruebas de refrigeradores. El recinto tiene espacio suficiente para albergar equipos térmicos de gran tamaño. Es posible por ejemplo realizar pruebas físicas a motores térmicos bajo condiciones de clima controlado. Esto es de gran relevancia para caracterizar el desempeño de motores que operan en ambientes fríos, por debajo de 0 °C, donde el proceso de arranque representa un desgaste excesivo como consecuencia de la baja temperatura. Otras aplicaciones incluyen por ejemplo estudios de la sensación de confort en recintos climatizados en función de las actividades de los usuarios o en la evaluación de aparatos de uso humano como las pruebas a los lentes de contacto bajo distintas temperaturas y humedades, todo esto para evaluar el comportamiento del ojo al ser expuesto a un cuerpo extraño en distintos ambientes. El sistema de control desa-

rollado a través de este trabajo resulta suficientemente versátil para las aplicaciones antes mencionadas debido a que es reprogramable, siendo factible realizar pruebas a condiciones constantes o variables, en función de la necesidad en específico.

1.2. Antecedentes y estado del arte

México ha sido pionero en la protección de la capa de ozono y ha trabajado para reducir hasta un 90 % su consumo de clorofluorocarbonos. La protección ambiental demandó la implementación de avances tecnológicos, además de estrategias metodológicas para evaluar y estandarizar productos, por ejemplo de consumo generalizado: refrigeradores, compresores, aislamientos.

Las grandes industrias de la refrigeración doméstica hacen uso de laboratorios especializados para la evaluación de sus productos, emplean instalaciones climatizadas en la realización de pruebas experimentales y caracterización. La cámara climática surge de la necesidad de evaluar refrigeradores prototipos en condiciones ambientales controladas.

Con anterioridad extensos esfuerzos se han realizado para la primera construcción de una cámara de clima controlado [1], teniendo dificultad en el desarrollo debido al espacio de trabajo como se observa en la figura 1.2. La configuración de los conductos entrada y salida de aire se basó en la medida del espacio disponible y las complicaciones geométricas. Los detalles aerodinámicos con los conductos fueron revisados mediante el uso de dinámica de fluidos computacional que arroja resultados confiables, además del área transversal que debe tener el conducto para obtener una velocidad baja a la entrada de la cámara.

En dicho recinto, los conductos de inyección de aire fueron estudiados de manera numérica, como se detalla en la referencia [2], dando resultados como los que se ilustran en la figura 1.4. Al final se obtuvo un diseño del interior de la cámara y en los conductos de aire con base en los resultados de la presión interna de los conductos y los aspectos aerodinámicos. En la figura 1.3 se observa una vista de la distribución de la magnitud de la velocidad en la cámara.

El diseño permite establecer en el interior de la cámara condiciones climáticas controladas que cumplen con los parámetros establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2012 para la realización de pruebas del consumo energético de refrigeradores domésticos (sección 9.2 Cuarto de Prueba), misma que limita a las corrientes de aire a una velocidad menor a 0.245 m/s, y un gradiente de temperatura vertical menor a 0.9 °C/metro.



Figura 1.2: Cámara Climática de Bajo Costo

La humedad no es un parámetro de control considerado en la norma.

Para que la cámara de clima controlado opere de forma satisfactoria fue necesario diseñar un sistema de control electrónico flexible y un sistema de adquisición de datos para registrar los parámetros de interés durante las pruebas. Mediante un sistema completo de adquisición de datos se registran voltajes, temperaturas, corrientes y se calcula las potencias en cada una de las cuatro estaciones de prueba con la que se cuenta en el interior de la cámara climática. Se cuenta con la posibilidad de utilizar de forma simultánea hasta 96 termopares tipo T para medición de temperatura, y en cada estación se proporciona voltaje regulado en corriente alterna. El sistema de control que se esquematiza en la figura 1.5, permite un adecuado desempeño de la cámara una vez que el usuario introduce la temperatura de consigna. El sistema está diseñado para compensar las alteraciones típicas en el medio externo que pudieran afectar las condiciones internas durante las pruebas físicas.

Un conjunto de RTDs miden la temperatura dentro del recinto. Los RTDs fueron colocados en la inyección y extracción de aire; recopilando datos de importancia. Los sistemas de control y de adquisición de datos hacen la función de reunir información, usando equipo electrónico de la marca National Instruments (NI) y software Labview, dentro de un módulo Controlador Automata Programable llamado comercialmente Field Point de NI. Se tiene programada la recolección de datos según el usuario lo solicite. Se puede observar en la figura 1.6 la vista física del componente electrónico.

Con el sistema de control se gobierna una válvula de By-pass de gas caliente que hace

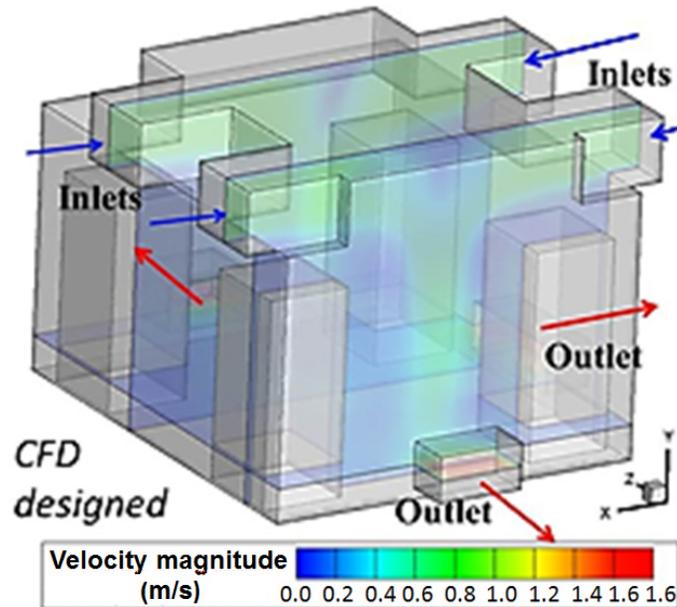


Figura 1.3: Distribución dentro del recinto de bajo costo

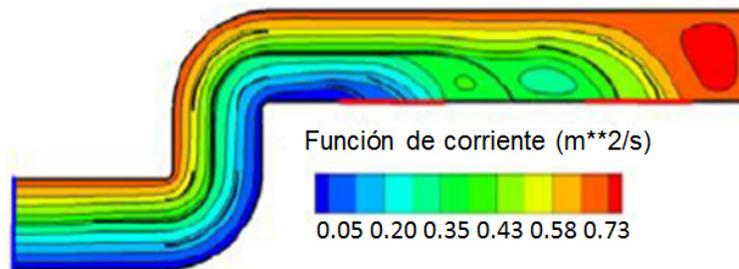


Figura 1.4: Distribución de la Función de Corriente dentro del conducto de aire

la función de cortocircuito en el sistema de refrigeración. Es decir, ingresa vapor caliente del compresor a la entrada del evaporador incrementando la temperatura del refrigerante y disminuyendo la capacidad de transferencia de calor. Con el control, la válvula regula la temperatura interna del recinto con una variación de ± 1 °C, como se observa en la figura 1.7, para un amplio rango de temperaturas. Se observa que la diferencia entre las temperaturas instantánea y de consigna, $T - T_{sp}$ es muy cercana a 0 y menor a 1 °C.

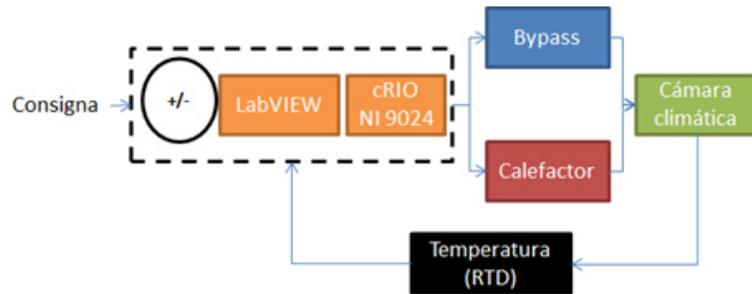


Figura 1.5: Diagrama de control global



Figura 1.6: Field Point instalado en el panel de control de la cámara de bajo costo

1.2.1. Fundamentos de ciclos de refrigeración por compresión de vapor

Entre las áreas de importancia de la termodinámica se encuentra la refrigeración, que es la transferencia de calor de una región de temperatura inferior hacia una zona de temperatura superior. Las máquinas que realizan el ciclo de la refrigeración se llaman refrigeradores. Los refrigeradores son dispositivos cíclicos y los fluidos con los que trabajan en los ciclos se llaman refrigerantes. En el ciclo de refrigeración por compresión de vapor, el refrigerante se condensa y se evapora alternadamente. Se sabe por experiencia que el calor fluye en la dirección en la que la temperaturas decrece, es decir, de las regiones de alta temperatura a las de baja temperatura. Dicho proceso de transferencia de calor ocurre en la naturaleza sin que se requiera la participación de otro dispositivo. Se muestra en la

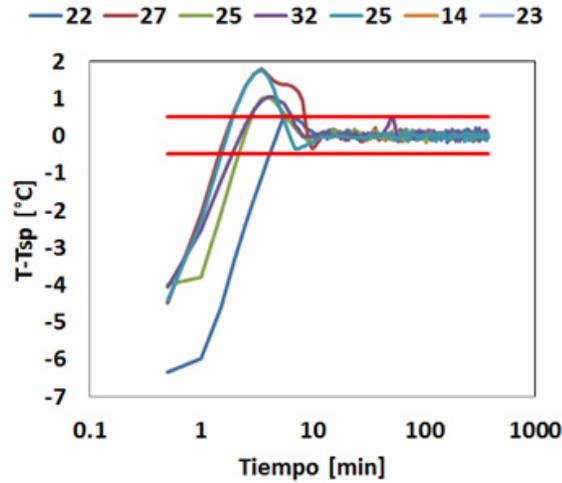


Figura 1.7: Respuesta de temperatura dentro del recinto

figura 1.8 el ciclo de refrigeración de manera esquemática, en éste Q_L es el calor que se extrae del medio confinado a la temperatura T_L , Q_H es el calor que se rechaza hacia el ambiente a una temperatura T_H .

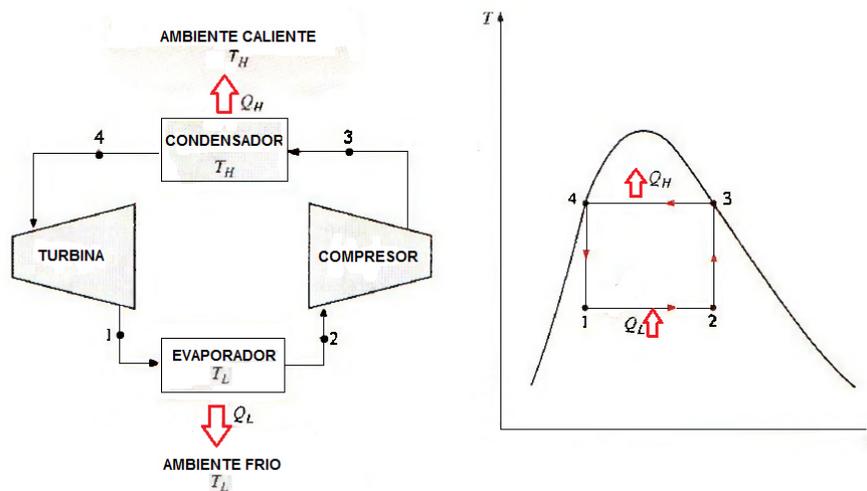


Figura 1.8: Diagrama del ciclo de refrigeración

El ciclo de refrigeración inicia absorbiendo calor del ambiente frío e incrementando su entropía, después se comprime en un proceso isentrópico, enseguida rechaza calor isotérmicamente al ambiente exterior mediante el condensador. Finaliza expandiéndose

isentrópicamente y reiniciando el ciclo.

Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor

Las dificultades en el ciclo invertido de Carnot pueden ser eliminados al evaporar el refrigerante por completo antes que se comprima, se sustituye la turbina con una válvula de expansión o un tubo capilar (reg. de presión). El resultado es un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor. El ciclo de refrigeración por compresión de vapor es el que más se utiliza en refrigeradores comerciales, sistemas de aire acondicionado y en bombas de calor. El ciclo ideal de refrigeración que se ilustra en la figura 1.9 se compone de cuatro procesos:

- Compresión isoentrópica en un compresor
- Rechazo de calor a presión constante en un condensador
- Estrangulamiento en un dispositivo de expansión
- Admisión de calor a presión constante en un evaporador

Los cuatro componentes empleados en el ciclo de refrigeración por compresión de vapor son dispositivos que operan con flujo constante, por lo que los cuatro procesos mencionados que integran el ciclo pueden analizarse como procesos de flujo estable o permanente. Los cambios en la energía cinética y potencial del refrigerante suelen ser pequeños en relación con los términos de trabajo y transferencia de calor, y por lo tanto, en la práctica se ignoran. En estos términos, la ecuación de energía de flujo estable por unidad de masa se reduce a

$$(q_{entrada} - q_{salida}) + (w_{entrada} - w_{salida}) = h_e - h_i \quad (1.1)$$

Ciclo real de refrigeración por compresión de vapor

Un ciclo real de refrigeración por compresión de vapor difiere de uno ideal en varios aspectos principalmente debido a las irreversibilidades que suceden en varios componentes, por ejemplo, la caída de presión debido a la fricción del fluido y la transferencia de calor hacia o desde los alrededores.

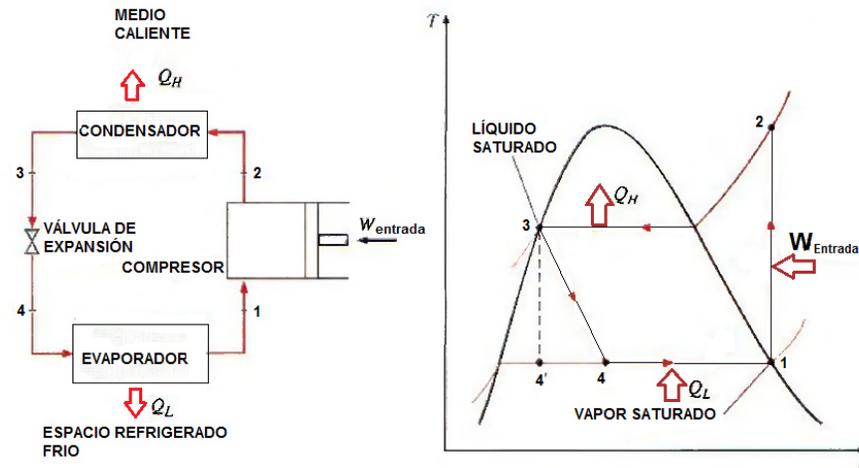


Figura 1.9: Esquema y diagrama $T - s$ para el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor

En el ciclo ideal, como se observa en la figura 1.10, el refrigerante sale del evaporador y entra al compresor como *vapor saturado*, sin embargo, en la práctica no es posible controlar el estado del refrigerante con precisión, de modo que se diseña el sistema con un ligero sobrecalentamiento, asegurando que el refrigerante se evapore por completo cuando entra al compresor. Usualmente la línea que conecta al evaporador con el compresor es larga, por lo tanto, la caída de presión ocasionada por la fricción del fluido y la transferencia de calor de los alrededores al refrigerante puede ser significativa. Como resultado del sobrecalentamiento, la ganancia de calor en la línea de conexión, las caídas de presión en el evaporador y la línea de conexión, se presenta un incremento en el volumen específico y por consiguiente, un incremento en los requerimientos de entrada de potencia al compresor. Hay que recordar que el trabajo del flujo estable es proporcional al volumen específico. Adicionalmente, el proceso de compresión real incluye efectos de fricción, por consiguiente, la entropía del refrigerante puede incrementarse (proceso 1-2) o disminuirse (proceso 1-2'). El proceso 1-2' es más deseable debido al requerimiento de entrada de trabajo.

El proceso de compresión real incluye efectos de fricción, los cuales incrementan la entropía y la transferencia de calor. En el caso ideal, se supone que el refrigerante sale del condensador como líquido saturado a la presión de salida del compresor, sin embargo, en la realidad es inevitable la caída de presión en el condensador así como en las líneas de

conexión y la válvula de estrangulamiento. No es fácil realizar la condensación teniendo al final un líquido saturado, además, es indeseable enviar refrigerante a la válvula antes de condensarlo por completo. En consecuencia, el refrigerante se sub-enfría un poco antes de que entre a la válvula, entra al evaporador con una entalpia inferior y por ello puede absorber más calor del espacio refrigerado. La válvula y el evaporador se localizan cerca uno de otro, de modo que la caída de presión sea mínima.

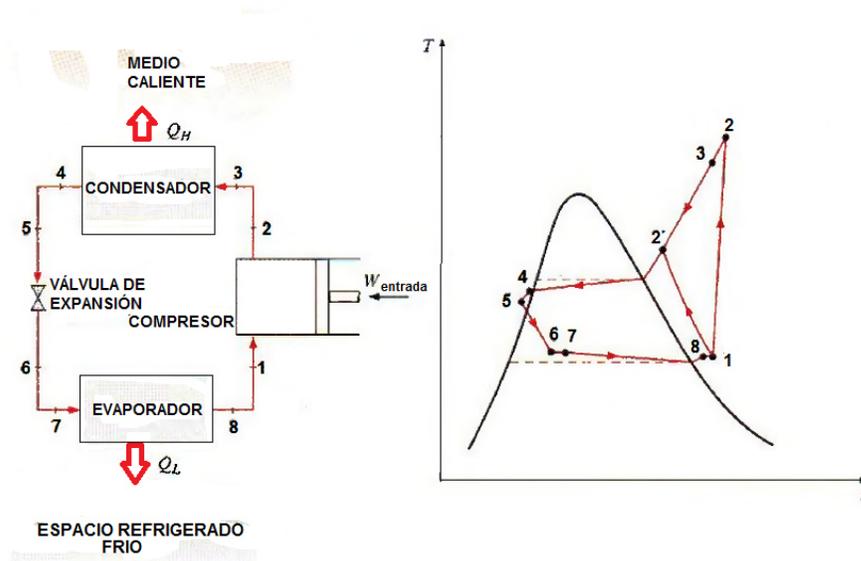


Figura 1.10: Diagrama del ciclo ideal por compresión de vapor

Selección del refrigerante

Al momento de diseñar un sistema de refrigeración existen una amplia variedad entre los que puede elegirse: clorofluorocarbonos, amoníaco, hidrocarburos, dióxido de carbono, aire e incluso agua. La crisis del ozono ha ocasionado una gran agitación en la industria de la refrigeración y el aire acondicionado y ha generado un análisis formal de los refrigerantes actuales.

Para la selección de algún refrigerante se deben tomar en cuenta dos parámetros: la temperatura de los dos medios (el espacio refrigerado y el ambiente). Para tener una transferencia de calor a una tasa razonable, se debe tener una diferencia de temperatura de 5 a 10 °C entre el medio con quien intercambia calor y el refrigerante. Otra característica

deseable es que no sea tóxico, corrosivo o inflamable, además de que con alta entalpia de evaporación (minimizando el flujo másico), y un bajo costo.

Se escogió el refrigerante 410a para la cámara climática por los siguientes características:

- Refrigerante de alta seguridad, clasificado por la ASHRAE como no tóxico, y no inflamable.
- Aplicaciones en nuevos equipos de baja y media potencia
- Puede usarse en aceites de poliéster y poliviniléter con lo que es miscible, permite un buen retorno al compresor.
- Capacidad frigorífica superior al R22 y posee un buen rendimiento en modo calor.

1.2.2. Fundamentos de control

La Ingeniería de Control es una disciplina que se focaliza en modelizar matemáticamente una gama diversa de sistemas dinámicos y el diseño de controladores que harán que estos sistemas se comporten de la manera deseada. Tales controladores no necesariamente son electrónicos y por lo tanto la ingeniería de control es a menudo un subcampo de otras ingenierías como la mecánica.

Dispositivos tales como circuitos eléctricos, procesadores digitales y los microcontroladores son muy utilizados en todo sistema de control moderno. La ingeniería de control tiene un amplio rango de aplicación en áreas como los sistemas de vuelo y de propulsión de los aviones de aerolíneas, militares, en la carrera espacial y últimamente en la industria automotriz.

La refrigeración tiene muchas aplicaciones, una de las cuales es la conservación de alimentos. Los alimentos y medicamentos son propensos a la degradación debido al calor. La cantidad de alimentos y medicamentos para abastecer a la población mundial es de gran magnitud, así que la refrigeración debe ser eficiente eléctricamente para no ser un obstáculo en su aplicación.

Tipos de lazos de control

El objetivo del control automático es poder manejar con una o más entradas (o referencia), una o más salidas de una planta o sistema. Para hacerlo, la idea más primitiva es colocar entre la referencia y la planta, un controlador que sea el inverso de la función de transferencia de la planta. La función de transferencia es igual al cociente de la transformada Laplace de la señal de salida dividida con la transformada Laplace de la señal de entrada, de tal manera que la función de transferencia de todo el sistema, i.e. la planta más el controlador, es igual a uno, logrando de esta manera que la salida sea igual a la entrada. Esta primera idea se denomina control en *lazo abierto*.

Los sistemas en lazo abierto tienen la ventaja de ser relativamente sencillos, por lo que su costo es bajo y en general su confiabilidad es buena, pero con frecuencia son imprecisos ya que no hay corrección de errores. En la figura 1.11 se muestra conceptualmente un sistema de lazo abierto. Las desventajas que tiene el control por lazo abierto son:

- Jamás se conoce la planta o sistema, a lo más se puede conocer un modelo aproximado, por lo que no se puede lograr el inverso perfecto.
- No se puede usar para controlar plantas o sistemas inestables.
- No compensa perturbaciones en el sistema.
- Si la planta o sistema tiene grado relativo mayor que cero, no se puede crear un controlador que la invierta, ya que no se puede hacer una función de transferencia con grado menor que cero.
- Es imposible invertir perfectamente una planta, si esta tiene retardos, ya que su inverso sería un adelanto en el tiempo (se debería tener la capacidad de predecir el futuro).

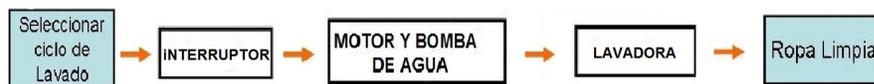


Figura 1.11: Ejemplo de sistema en lazo abierto

Una idea más avanzada, y más ampliamente implementada, es el concepto de *feedback* o *retroalimentación*. En este se usa la medición de la salida del sistema como otra entrada del mismo, de tal forma que se puede diseñar un controlador que ajuste la actuación para variar la salida y llevarla al valor deseado. Este sistema se le llama *lazo cerrado*. Observando la figura 1.12 se aprecian los elementos que conforma dicho sistema.

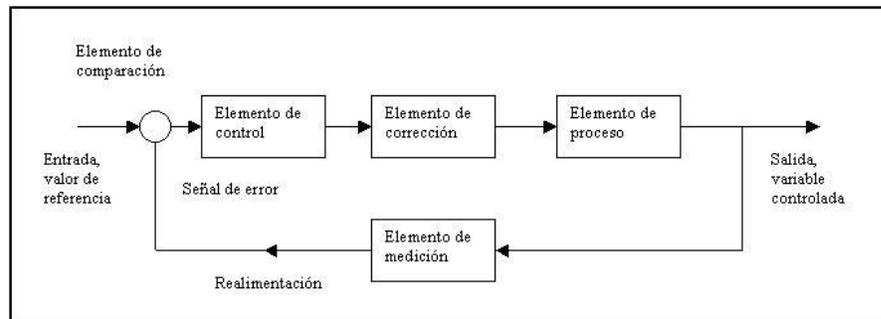


Figura 1.12: Elementos de un sistema en lazo cerrado

Los elementos básicos de un sistema en lazo cerrado son los siguientes:

- **Comparador:** Compara el valor deseado o de referencia de la condición variable que se controla con el valor medido de lo que se produce, y genera una señal de error. Se considera que suma la señal de referencia, positiva, a la señal del valor medido, que en este caso es negativo.
- **Controlador:** En cuanto recibe una señal de error, el controlador decide qué acción llevar a cabo. Las acciones de control pueden ser sistemas alambrados (varios sistemas dependientes a un control), en cuyo caso la acción de control se define de manera permanente por la conexión entre los elementos, o bien, pueden ser programables, donde el algoritmo de control se almacena en una unidad de memoria y se puede modificar con una reprogramación.
- **Elementos de actuación:** El elemento de actuación produce un cambio en el proceso a fin de corregir o modificar la condición controlada. El término actuador designa al elemento de una unidad de corrección que proporciona la energía para realizar la acción de control.
- **Proceso:** El proceso es aquello que se está controlando.

-
- **Elemento de medición:** El elemento de medición produce una señal relacionada con el estado de la variable del proceso que se controla.

Las ventajas que tiene el control por retroalimentación son:

- Controlar sistemas inestables.
- Compensar perturbaciones.
- Controlar sistemas incluso si estos tienen errores de modelado.

Desventajas:

- El uso de sensores hace más costoso (económicamente) el control.
- Se introduce el problema del ruido, al hacer la medición.

Un **controlador** puede reaccionar de varias maneras ante una señal de error y proporcionar señales de salida para que actúen los elementos correctores:

1. **Control de dos posiciones:** el controlador es en esencia un interruptor activado por la señal de error y proporciona sólo una señal correctora tipo encendido-apagado. La acción de control del modo de dos posiciones es discontinua, en consecuencia ocurren oscilaciones de la variable controlada en torno a la condición requerida. Esto se debe a retrasos en la respuesta de control y en el proceso. Con el sencillo sistema de dos posiciones antes descrito existe el problema cuando la respuesta de la habitación ronda el valor predeterminado, el actuador alterna continuamente entre el encendido y el apagado, reaccionando a pequeños cambios. Para evitar lo anterior, en vez de usar sólo un valor de consigna para que el controlador, se utilizan dos valores, los valores comprendidos entre estos dos valores se llama *banda muerta*. Como ejemplo se muestra el gráfico de un calentador en la figura 1.13.

Si bien el control de dos posiciones no es muy preciso, los dispositivos que utiliza son sencillos y, por lo mismo, es bastante económico.

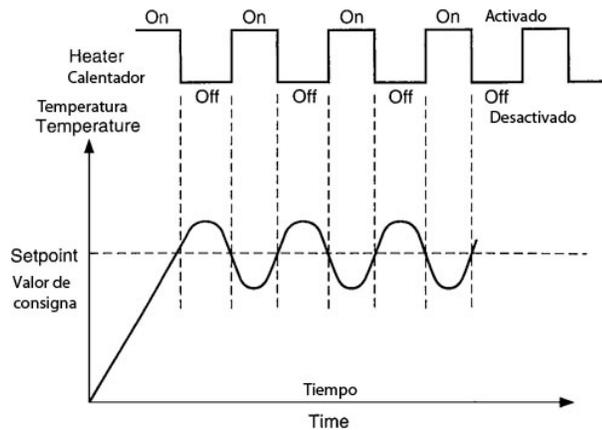


Figura 1.13: Sistema de dos posiciones

2. **Control proporcional (P):** En el modo proporcional, la magnitud de la salida del controlador es proporcional al tamaño del error, es decir, el elemento de corrección del sistema de control, por ejemplo una válvula, recibe una señal que es proporcional a la magnitud de la corrección requerida.

En la figura 1.14 se muestra como varía la salida del controlador con la magnitud y el signo del error. La relación lineal entre la salida del controlador y el error (e) tiende a existir solo dentro de cierto intervalo de errores que se llama *banda proporcional*, dentro de la banda proporcional la ecuación de la línea recta está representada por:

$$\frac{\text{Cambio de la Salida}_{\text{controlador}}}{\text{Valor}_{\text{referencia}}} = K_p * e \quad (1.2)$$

donde e es el error y K_p es la pendiente de la línea de la figura 1.14. La salida del controlador se expresa como un porcentaje del intervalo total de salidas posibles dentro de la banda proporcional. Esta salida correspondería, al cambio en la apertura de una válvula completamente cerrada a completamente abierta, asimismo, el error se expresa como un porcentaje del valor del intervalo total, es decir, el intervalo de error correspondiente a una salida del controlador de 0 a 100 en porcentaje, entonces el porcentaje de cambio en la salida del controlador respecto al valor de referencia es igual a $K_p * [\text{Porcentaje de cambio en el error}]$.

Como el 100 % de la salida del controlador corresponde a un porcentaje de error

igual a la banda proporcional:

$$K_p = \frac{100}{\text{Banda Proporcional}} \quad (1.3)$$

La ecuación 1.3 también se puede expresar como:

$$\text{Cambio Salida} = I_o - I_0 = K_p \quad (1.4)$$

donde I_0 es el porcentaje de la salida del controlador correspondiente a un error de cero, y I_o es el porcentaje de la salida cuando el porcentaje de error es e . Aplicando la transformada de Laplace para obtener ecuaciones sencillas que no incluyen el tiempo se obtiene:

$$\text{Cambio de la salida (s)} = K_p * E(s) \quad (1.5)$$

y como:

$$\text{Función de transferencia} = \text{Cambio Salida(s)}/E(s) \quad (1.6)$$

donde K_p es la función de transferencia del controlador y $E(s)$ es la transformación del error.

La magnitud de la desviación es directamente proporcional a la magnitud de los cambios en la carga e inversamente proporcional a la K_p ; cuanto mayor sea el valor de K_p , menor será el cambio necesario en el error para manejar un cambio en la carga.

En la respuesta del sistema en el control proporcional hay un elemento de ganancia cuya función de transferencia es K_p en serie con el elemento en la *trayectoria directa* $G(s)$, como se muestra en la figura 1.15. El error es entonces:

$$E(s) = (K_p * G(s) / (1 + K_p G(s))) * R(s)$$

$$(I_{sal} - I_0) * s = K_D * s * E(s) \quad (1.8)$$

por lo que la función de transferencia es $K_D * s$.

En el control derivativo, en cuanto la señal de error empieza a cambiar existe la posibilidad de que el controlador produzca una salida de gran magnitud, ya que es proporcional a la rapidez con que cambia la señal de error, y no a su valor, por lo tanto, se producen respuestas iniciales rápidas.

En la figura 1.16 muestra la salida que produce el controlador cuando la rapidez con la que cambia la señal de error en el tiempo es constante.

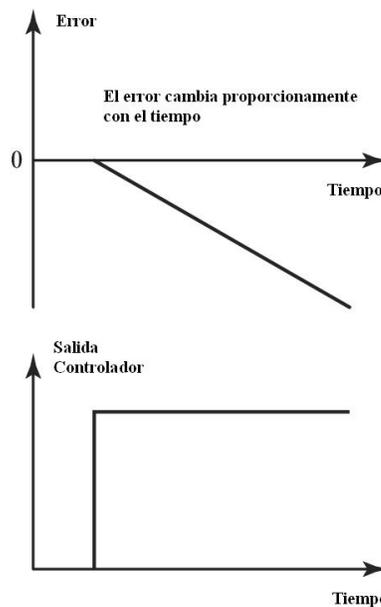


Figura 1.16: Sistema de Control Derivativo

Los controles derivativos no responden al error en estado estable, debido a que en este caso la tasa de cambio del error en el tiempo es cero. Por lo anterior, el control derivativo siempre se combina con el control proporcional. La parte proporcional responde a todas las señales de error, incluso señales estables, en tanto que la parte derivativa responde a la tasa del cambio.

4. **Control integral (I):** Es aquel en el que la tasa de cambio de la salida de control I es proporcional a la señal de error de entrada e , K_I es la constante de proporcionalidad y, cuando la salida del controlador y el error se expresan como porcentajes, tienen unidades s^{-1} .

$$\frac{dI}{dt} = K_I * e \quad (1.9)$$

$$\int_{I_0}^{I_{sal}} dI = \int_0^t K_I * e * dt \quad (1.10)$$

$$I_{sal} - I_0 = \int_0^t K_I * e * dt \quad (1.11)$$

donde I_0 es la salida del controlador en el tiempo cero, y I_{sal} es la salida en el tiempo t . La función de transferencia se obtiene tomando la transformada de Laplace, entonces:

$$I_{sal} - I_0 * s = \frac{1}{s} * K_I * E(s) \quad (1.12)$$

y así, la función de transferencia es: $1/s * K_I$

La figura 1.17 ilustra la acción de un controlador integral cuando hay una señal de error constante como entrada al controlador. La gráfica se puede observar de dos formas: i) Cuando la salida del controlador es constante, el error es cero; cuando la salida del controlador varía a una tasa constante, el error tiene un valor constante. ii) La otra forma es interpretar en términos del área bajo la curva del error.

$$\text{Área bajo la curva del error entre } t = 0 \text{ y } t = \int_0^t e dt \quad (1.13)$$

Hasta el momento que se produce el error, el valor de la integral es cero y $I_{sal}=I_0$, cuando ocurre el error se mantiene un valor constante. Por lo tanto, el área bajo la curva aumenta cuando se incrementa el tiempo, dado que el área aumenta a una tasa constante, la salida del controlador también aumenta a una tasa constante.

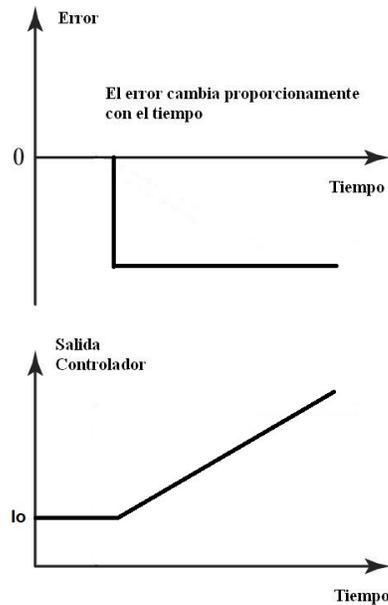


Figura 1.17: Sistema Control Integral

5. **Combinación de controles: Proporcional Integral Derivativo.** Al combinar los tres modos de control (proporcional, integral y derivativo) se obtiene un controlador que no tiene desviación en el error y disminuye la tendencia a producir oscilaciones. Este tipo de controladores se conoce como *controlador de tres modos* o *controlador PID*, a continuación la ecuación que describe su comportamiento:

$$I_{sal} = K_p e + K_I \int e dt + K_D \frac{de}{dt} + I_0 \quad (1.14)$$

donde I_{sal} es la salida del controlador cuando existe un error e , el cual varía con el tiempo t , I_0 es la salida del valor de referencia cuando no hay error, K_p es la constante de proporcionalidad, K_I la constante de integral y K_D la constante derivativa.

Aplicando la transformada Laplace, se obtiene:

$$I_{sal} - I_0 = K_p E(s) + \frac{1}{s} K_I E(s) + s K_D \quad (1.15)$$

y por lo tanto la función de transferencia es:

$$\ell(s) = K_p e + \frac{1}{s} K_I e + s K_D = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I \cdot s} + T_D s \right) \quad (1.16)$$

El controlador de tres modos se puede considerar como un controlador proporcional que a su vez tiene un control integral para eliminar la desviación en el error, así como un control derivativo para reducir los retrasos.

1.2.3. Estado del arte

Se ha introducido el estudio de estrategias de control con el objetivo de decrementar los cambios de temperatura dentro de cámaras de almacenaje y en la búsqueda de la reducción del consumo eléctrico durante su operación. El uso de la instrumentación moderna y la innovación científica han permitido el desarrollo de sistemas de adquisición y de control enfocados en el estudio del comportamiento dinámico de la temperatura dentro de recintos, en muchas ocasiones controlando la frecuencia del compresor [8]. El criterio de selección en sistemas de control evalúa el desempeño del control en diferentes estructuras. La respuesta de los diferentes controladores aplicados en el actual ciclo de refrigeración por compresión de vapor indican que la mejor estructura depende de la complejidad computacional y el desempeño del control [7]. Experimentos conducidos en sistemas HVAC son usados para comparar el desempeño de lógica difusa y el controlador convencional PID de proveedores, donde se compara la respuesta de los controladores en cambios de temperatura del aire de alimentación [6].

Los evaporadores de tubo y aleta son usualmente empleados en muchos sistemas de refrigeración. Para incrementar la eficiencia energética de los ciclos de refrigeración por compresión de vapor, la optimización de cada componente del circuito es fundamental. Las válvulas de expansión electrónica eventualmente son utilizadas como dispositivos de estrangulamiento para controlar el flujo de refrigerante, fijando el valor de sobrecalentamiento en la salida del evaporador [9]. El evaporador exhibe comportamientos inestables, afectando la seguridad y la eficiencia del sistema. Dos posibles explicaciones para el comportamiento inestable son: uno debido a las características del evaporador [10, 11, 12, 13, 14], y dos por el sistema de control de alimentación de fluido al evaporador [15, 16, 17, 18].

La frecuencia de los compresores y la apertura de la válvula de expansión son parámetros de control para conducir la temperatura y el valor de sobrecalentamiento. Comportamientos transitorios y errores en estado estable de un sistema deben minimizarse mientras el sistema llega a la salida deseada, los cuales incrementan la importancia de seleccionar el algoritmo controlador. Controladores convencionales como encendido-apagado, proporcional, proporcional integral y proporcional integral derivativo (PID) son herramientas para un sistema de control [19] donde el encendido-apagado es la técnica más utilizada [23], pero el PID ha sido encontrado como controlador simple en diseño, uso, e implementación [21, 22].

Recientemente, el consumo energético es un punto estricto en diseño de nuevos sistemas de refrigeración [20, 24], pero los controladores convencionales no pueden lidiar con comportamientos no lineales incluidos en los parámetros de los sistemas. Entonces, controladores no lineales basados en lógica difusa y redes neuronales [25, 26] pueden sobrellevar estos pendientes y además, la ventaja importante en los algoritmos es habilitar la solución de problemas de control sin conocer a detalle el modelo matemático [27, 28, 29, 30].

La generación de escarcha deteriora la operación y la eficiencia energética. El deshielo se vuelve necesario, en donde la válvula de expansión es comúnmente usado como regulador de fluido refrigerante y en el ciclo reversible de deshielo [31, 32]. Para bombas de calor y sistemas de refrigeración, el dispositivo de expansión es componente clave para el control de flujo y sobrecalentamiento del fluido. Los rangos de aplicación de la válvula de expansión electrónica se han expandido gradualmente, especialmente en sistemas de refrigeración con variadores de velocidad o sistemas multieaporadores [33, 34, 35, 36, 37, 38].

La investigación relacionada con el ciclo reversible de deshielo es relativamente menor comparada con el escarchamiento [39], debido a que el ciclo reversible de deshielo es un proceso complejo envuelto en variaciones espaciales y temporales, así como muchos otros factores indeterminados [40]. Sin embargo, el uso de otros reguladores para el ciclo reversible de deshielo está disponible aún con sus limitaciones [41].

1.3. Planteamiento y justificación del problema

Las actividades de diseño y desarrollo de cámaras climáticas por parte del Grupo de Investigación en Energía Térmica y Renovable de la UANL surgieron a partir de la necesidad de evaluar prototipos de refrigeradores desarrollados por la empresa Whirlpool. Esta empresa posee cámaras que están certificadas para evaluar los productos manufacturados por la empresa. Los productos evaluados y aprobados están certificados para su venta mundial. El uso de estas cámaras es muy costoso y se justifican para certificar productos con potencial comercial. Para la tarea de apoyar en la prueba de prototipos innovadores en la compañía se requería entonces de una cámara que fuera capaz de reproducir las condiciones disponibles en las cámara certificadas pero con un costo mucho menor, tanto en su construcción e instrumentación, como en su operación y calibración. Entonces es que se diseña y construye la llamada Cámara de Bajos Costo.

Dado el costo elevado de las pruebas y la demanda excesiva dentro del la compañía, la Cámara de Bajo Costo que se construyó en el CETEC de Whirlpool resultó ser una solución más económica para apoyar en la evaluación de producto terminado. La capacidad de trabajo en dicha cámara se vio entonces superada por la cantidad de producto que en la compañía se desea probar, además de lo atractivo que resulta el costo de las prueba en esta cámara en particular. Entonces surgió la necesidad de crear otra instalación que apoye las tareas de innovación tecnológica relacionadas con la empresa Whirlpool. Por ello, el Grupo de Investigación en Energías Térmica y Renovable de la UANL se dio a la tarea de construir una nueva cámara climática, considerando como meta fundamental lograr una cámara altamente flexible y reprogramable con el objeto de ofrecer mejores capacidades de trabajo y control, aspectos especialmente útiles para la investigación e innovación en estrategias de diseño y control de sistemas y dispositivos relacionados con la industria de la refrigeración. Todo este esfuerzo tiene el fin último de apoyar el desarrollo de dispositivos que permitan reducir el consumo de energía en dispositivos y máquinas térmicas, además de las consecuentes emisiones contaminantes.

Enseguida se da un breve resumen de los capítulos de la tesis:

En el **Capítulo 1 Introducción** se mencionan los aspectos que motivaron el desa-

rrollo de esta tesis, además de colocar antecedentes como trabajos realizados en conjunto con la empresa Whirlpool. Los objetivos de la cámara climática se definen para dar paso a la hipótesis.

El **Capítulo 2 Construcción y puesta en punto de la cámara climática** describe la experiencia en el desarrollo de la cámara de bajo costo. Se explica el diseño y la construcción de la cámara climática. Los sistemas de control y adquisición de datos se describen a profundidad. El sintonizado es la última fase del capítulo, allí se muestra la evolución de la programación del sistema de control y sus limitaciones.

En el **Capítulo 3 Metodología de ensayos** se explican las metodologías que se utilizan para el manejo de la cámara climática, las precauciones que se deben implementar y los pasos a seguir para desarrollar y dar uso de las capacidades de la cámara. Además, se muestran resultados de pruebas preliminares de productos de la empresa Whirlpool y sus detalles de experimentación.

El **Capítulo 4 Conclusiones** condensa todos los resultados recopilados, usándolos para comprobar que los objetivos de la tesis se han cumplido. Se llega a comparar el trabajo realizado con literatura recopilada y patentes.

Finalmente, la **Bibliografía** presenta la literatura utilizada para el desarrollo de la cámara y de los sistemas que la componen.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Implementar un sistema de control de alta precisión que permita la manipulación de actuadores con fin de mantener una temperatura requerida, con ayuda de sensores que se encuentran distribuidos en el recinto.

1.4.2. Objetivo Específico A

Diseñar, construir y poner en operación una cámara de ambiente controlado, con capacidad de control en temperatura. Además, evaluar en 4 estaciones independientes donde se registren temperaturas, y consumos eléctricos

1.4.3. Objetivo Especifico B

Tener una herramienta útil con versatilidad de control, para evaluar cualquier equipo térmico.

1.5. Hipótesis

Es posible el desarrollar e implementar un algoritmo de control de alta precisión que permita la manipulación de actuadores con fin de mantener una temperatura estable como consigna con una variación menor a ± 0.5 °C, adquiriendo datos de temperatura y consumo eléctrico.

Capítulo 2

Construcción y puesta en punto de la cámara climática

2.1. Cámara de bajo costo: CETEC Whirlpool

La cámara de bajo costo (CBC) surgió de la necesidad de tener un recinto para realizar ensayos con prototipos nuevos y producto terminado. Dentro del proyecto los involucrados fueron la empresa Whirlpool y la UANL. Dicho proyecto se desarrolló en las instalaciones del Centro de Tecnología en Whirlpool México. El espacio disponible para el recinto tiene dimensiones de 3.4 m x 3.4 m x 3.4 m. La cámara de bajo costo posee un rango de temperatura de 15 a 35 °C. La cámara de bajo costo es un instrumento que cuenta con 4 estaciones para evaluar refrigeradores con capacidad de 18 pies cúbicos. En la figura 2.1 se muestra el sistema de control de la cámara de bajo costo.

La válvula de By-pass de gas caliente (VBG) utilizada tiene las siguientes características: alimentación de 12 VDC, rango de operación de temperatura del fluido -40 a 116 °C. En la figura 2.2 se pueden observar dichas válvulas involucradas en el ciclo de refrigeración.

La VBG es controlada por una tarjeta electrónica que se muestra en la figura 2.3. La tarjeta requiere de una alimentación de 24 V (AC o DC), y responde a una excitación de entrada 4 a 20 mA que controla la apertura de la válvula.

El controlador rectificador de silicio (SCR) recibe señales de excitación de entrada

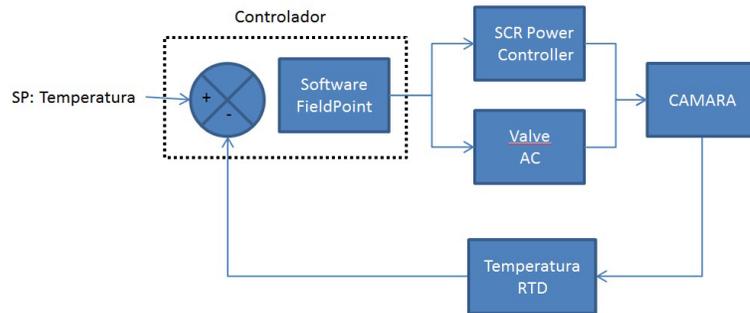


Figura 2.1: Sistema de control de la cámara de bajo costo usando el un equipo Fieldpoint de la marca National Instruments (NI)

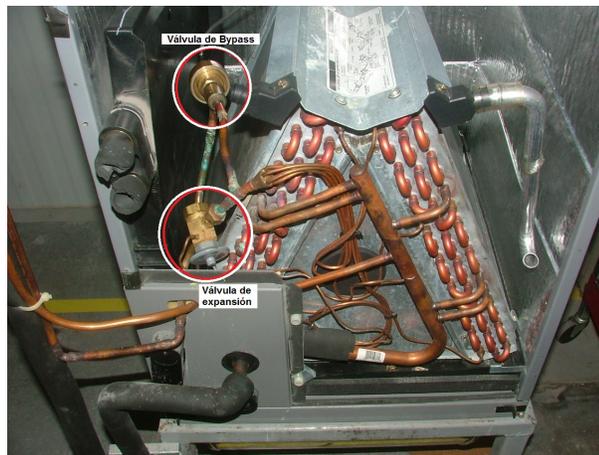


Figura 2.2: Válvulas en el circuito de refrigeración en la CBC

de 4-20 mA, el rango de temperatura de operación es 30 a 122 °C y alimentación de 110 a 220 V. En la figura 2.4 se observa el circuito eléctrico de la resistencia.

La experiencia de realizar una instalación de gran potencial en investigación fue la causa para desarrollar una nueva instalación dentro de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. La cámara climática, fue desarrollada por el Grupo de Investigación en Energías Térmica y Renovable (GETR) y la colaboración de la empresa Whirlpool. El nuevo desarrollo de instalación posee la capacidad de controlar la temperatura, y tener registro de termopares y consumo eléctrico en cuatro diferentes estaciones. El registro eléctrico de cada estación de trabajo para el monitoreo del consumo es indispensable. Los datos recopilados son necesarios para el cumplimiento de la NOM-ENER-015-2012 y el monitoreo del prototipo.

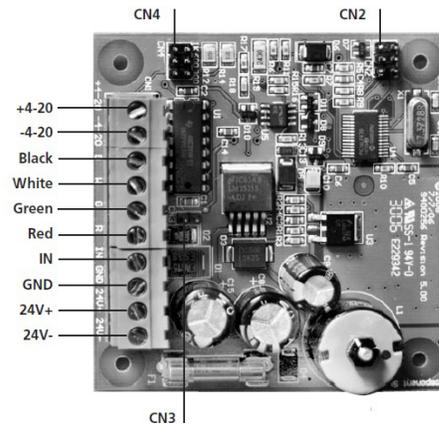


Figura 2.3: Controlador de la VBG en la CBC

El sistema de control gobierna el ciclo de refrigeración y calefacción. El nuevo proyecto debe contar con mejoras en sus capacidades, es decir, la nueva cámara tiene las habilidades de controlar la temperatura. En el presente capítulo se explican los componentes de la cámara y se detallan aspectos del funcionamiento general.

Las siguientes secciones son:

- Diseño y construcción.
- Sistema de adquisición de datos.
- Sistema de control.
- Sintonizado.

Las desventajas que muestra la cámara de bajo costo respecto la cámara climática son las siguientes:

- El rango de temperatura de la cámara de bajo costo es de 15 a 30 °C. La cámara climática desarrollada en las instalaciones de la universidad se amplía a operar de -30 a 50 °C.
- La precisión de la cámara de bajo costo es ± 1 °C. La precisión de la cámara climática ubicada en la UANL es ± 0.5 °C.
- La cámara climática contará con control para la humedad. La cámara climática posee un rango de 30 a 95 % de humedad.

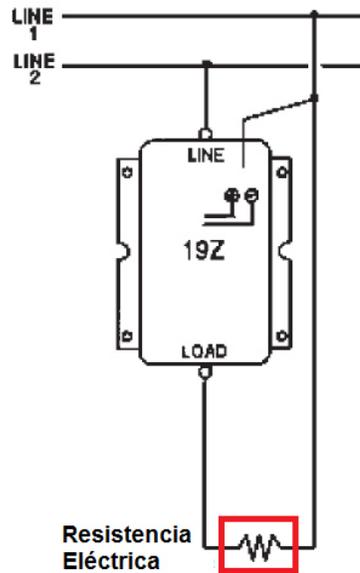


Figura 2.4: Circuito de la resistencia calefactora en la CBC

- La CBC cuenta con válvula de By-pass de gas caliente y de expansión mecánica en el ciclo de refrigeración. La cámara climática cuenta con válvulas de expansión y presión electrónica, además de una válvula de By-pass gas caliente y otra de presión mecánica. Los componentes mencionados convierten a la cámara climática más compleja y versátil.

2.2. Diseño y construcción de la cámara climática

El espacio de trabajo aplicado para la construcción de la cámara es de 4m x 3m x 3.5m, con un espesor de aislamiento de poliestireno extruido de 4 plgs. El recinto está preparado con una cimentación acústica y térmica, en donde se incluyen dos puertas con preparación aislante y acústica, y mirillas de doble vidrio. En el interior se cuenta con cuatro estaciones con alimentación de 110/220 VAC regulado, y dos paneles de 48 termopares tipo T. Las capacidades de temperatura en la cámara se han estipulado en -30 a 50 °C, y los rangos de humedad relativa se establecen de 30 a 95 %.

El aire del recinto, tiene acceso por la parte superior en dos ductos y cuatro rejillas

rectificadoras. El retorno maneja tres accesos por la parte inferior del recinto, los cuales realizan la succión de aire, llegando a la manejadora y al sistema de refrigeración. La selección de la configuración de los conductos entrada y salida se basó en la medida del espacio disponible y las complicaciones geométricas de los conductos. Además se enfocó en el área transversal que debe tener el conducto para obtener velocidades bajas a la entrada de la cámara.



Figura 2.5: Cámara de ambiente controlado, FIME, UANL

El requerimiento de bajas velocidades es debido al diseño de la cámara, donde se utiliza la norma mexicana NOM-015-ENER-2012. La sección 9.2- Cuarto de prueba menciona la limitación de las corrientes de aire a una velocidad menor a 0.245 m/s y un gradiente de temperatura vertical menor a 0.9 °C/metro. La humedad, por otra parte, no es considerada en ésta norma pero el rol que actúa en el ambiente es de gran impacto. Al aumentar la humedad ocasiona que el consumo energético del electrodoméstico aumente. Como prueba del diseño y construcción de la cámara, se muestra la cámara en la figura 2.5 y en la figura 2.6 el diagrama de sistemas empleados. Los sistemas empleados son: el sistema de control y el sistema de adquisición de datos. El sistema de control se compone de la refrigeración y la calefacción. El sistema de adquisición de datos se compone de los registros eléctricos y los termopares.

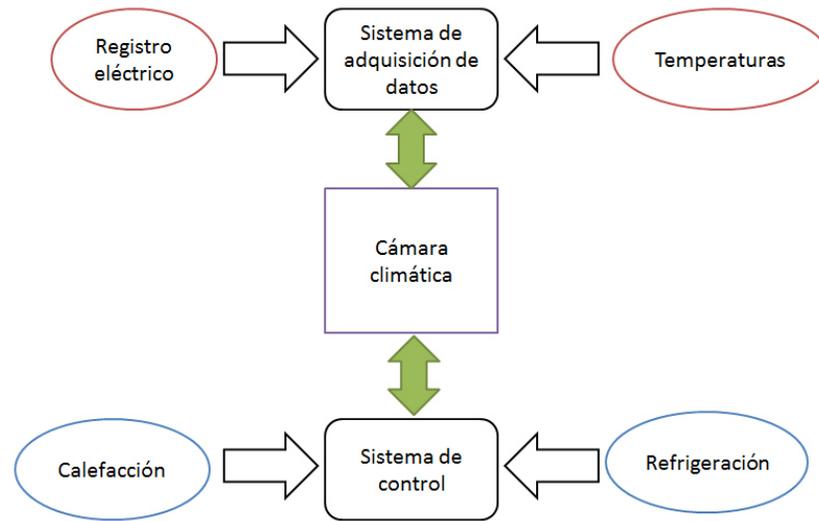


Figura 2.6: Diagrama de los sistemas

2.3. Sistema de adquisición de datos

2.3.1. Temperatura

Para la medición de temperatura, se dispone dentro del recinto de 96 termopares tipo T, ubicados estratégicamente entre las estaciones en paneles de 48 terminales. La lectura la realiza el módulo NI 9214, junto con el CompactRIO 9024. Este módulo recibe la señal de microvoltaje proveniente del termopar, al cual le realizamos un tratamiento de señal dentro del software Labview, transformando el microvoltaje en temperaturas. Dentro de las propiedades del módulo, se encuentra la opción de uso en diferentes tipos de termopares.

CompactRIO es un sistema embebido y reconfigurable de control y adquisición. La arquitectura robusta del hardware del sistema CompactRIO incluye módulos de entradas y salidas, un chasis FPGA reconfigurable y un controlador embebido. Además, CompactRIO se programa con herramientas de programación gráfica de NI LabVIEW y puede usarse en una variedad de aplicaciones de control y monitoreo embebidos. Sistema embebido es un sistema de computación diseñado para realizar una o algunas pocas funciones dedicadas frecuentemente en un sistema de computación en tiempo real.

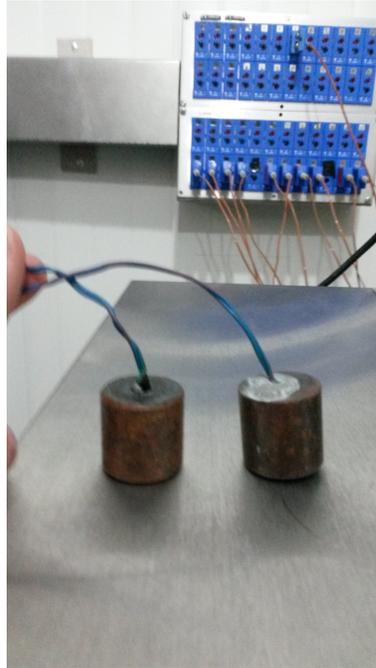


Figura 2.7: Vista física de termopares con masa de cobre

Las masas de cobre, figura 2.7, se usan para uniformizar la temperatura, y tener una medición estable y homogeneizada. El circuito del termopar se muestra en la figura 2.8.

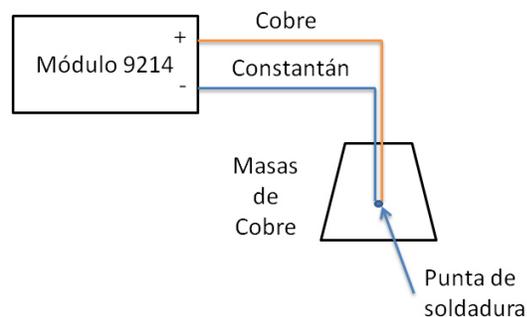


Figura 2.8: Circuito adquisición de temperaturas

Las temperaturas del recinto son registradas mediante el uso de RTDs y sensores de humedad, éstos últimos tienen opción de medición de temperatura. Las señales de salida de los sensores (voltaje), son leídas por los módulos 9217 y 9201 respectivamente. El módulo 9217 ofrece la transformación inmediata al configurar dentro del

proyecto de programación en LabView. El módulo 9201 requiere un proceso matemático de linealización que se realiza usando el rango de operación y las salidas de voltaje.

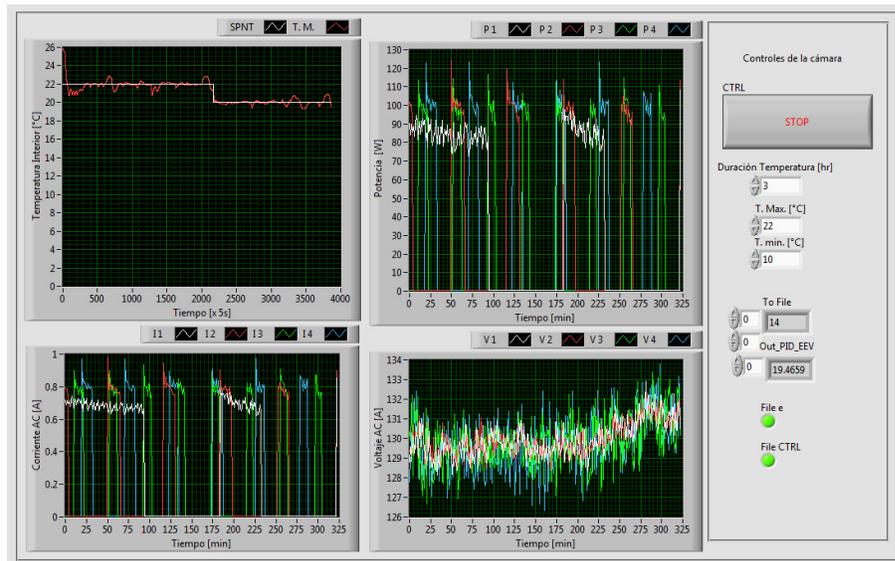


Figura 2.9: Interfaz de usuario, adquisición de datos

El software maneja una interfaz gráfica donde se programa la ecuación, dando como resultado la temperatura censada del recinto. A continuación en la figura 2.10 se muestra el circuito eléctrico de conexiones al CompactRIO, que se arma dentro del gabinete de control. Cada estación pasa por el CompactRIO, midiendo y registrando los valores eléctricos.

2.3.2. Variables Eléctricas

Para las mediciones de corriente y voltaje alterna, los módulos NI 9227 y NI 9225 respectivamente realizan la función de adquisición de datos en tiempo real mediante el uso de Labview y la herramienta Electrical Powersuite (subprograma en Labview). Se programa varios VIs (Virtual Instruments) para el cálculo de la potencia y el historial del consumo eléctrico como en la figura 2.9.

Además, la frecuencia del muestreo se realiza a 2.5 veces la frecuencia de Nyquist. Según el teorema de muestreo, para poder replicar con exactitud la forma de una

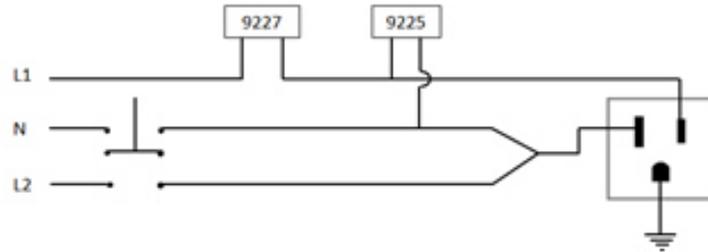


Figura 2.10: Circuito Adquisición de Voltaje y Corriente

onda, es necesario que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la máxima frecuencia a muestrear. El sistema de adquisición de datos detalladamente se compone por:

- Termopar tipo T: $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $260\text{ }^{\circ}\text{C}$, resiste atmósferas húmedas, precisión 45mV/C
- Módulo NI 9214 mide termopares: resolución 24 bits, precisión 24 mV, tipo de termopares que puede manejar J, K, T, E, N, B, R y S.
- Módulo NI 9225 mide voltaje: medición hasta 300 V, aislamiento entre canales, precisión 0.184 V
- Módulo NI 9227 mide corriente: medición hasta 5 A, precisión 10.5 mA

2.3.3. Otras variables: Presión de succión, temperatura de succión

En el sistema de refrigeración de la cámara, el proveedor usó termistores y sensores de presión, los cuales eran leídos por el PLC "Kelvin II". Lo que nos llevó a migrar estos componentes al dominio del CompactRIO debido a la inestabilidad de la cámara, baja precisión, y ajuste de valores del PID manualmente. Mediante el uso de los módulos 9201 (Voltaje analógico de entrada) y el 9265 (Corrientes de salida), se realiza el arreglo electrónico que se muestra en la figura 2.11, donde el módulo 9265 inyecta una corriente al termistor, mismo que se comporta como una resistencia variable al cambio de temperatura.

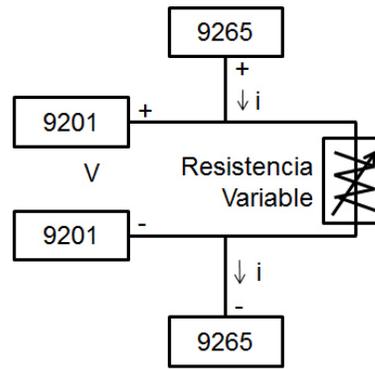


Figura 2.11: Circuito de medición de temperatura en la refrigeración

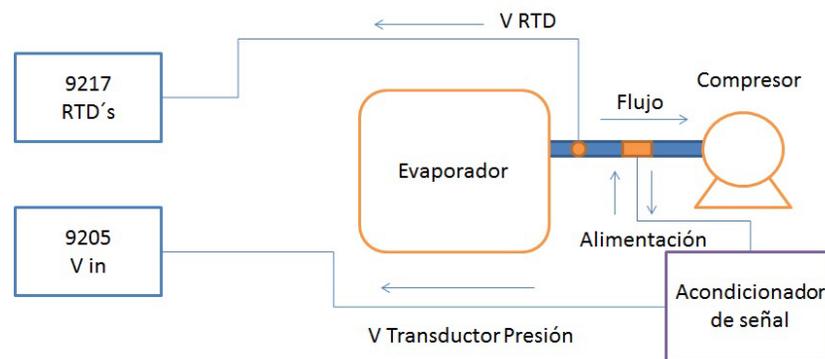


Figura 2.12: Circuito de medición de temperatura y presión en el evaporador

El módulo 9201 funciona como multímetro, dando la medición de voltaje. Al final por ley de Ohm se puede obtener la temperatura en función del valor resistivo, basándonos en la ficha técnica. El arreglo fue adecuado de manera que el "Kelvin II" sea usado como un acondicionador de señal como se muestra en la figura 2.12.

Para el sensor de presión el método de linealización fue muy sencillo de implementar, ya que en la ficha técnica se proporciona el rango de trabajo y los voltajes a medir, a partir de dichos valores la programación fue rápida. La electrónica mencionada juega un papel crucial en el control del sistema de refrigeración. La temperatura del termistor, y la presión del transductor son datos que son herramientas importantes para el cálculo del sobrecalentamiento (*superheat*). El *superheat* es controlado por seguridad, para evitar que llegue líquido refrigerante al compresor o vapor a muy alta temperatura; ello ocasiona acortar la vida del compresor. El *superheat* es el re-

sultado de abstraer el valor de la temperatura al final del evaporador, con el valor de temperatura de entrada. El sistema de adquisición de datos también se compone de:

- Sensor de presión con rango de 0-150 psi, salidas de voltaje 0.05-4 V.
- Sensor termistor 2K, con rango de -40 a 160 °F.
- Módulo 9201 maneja 8 entradas analógicas de voltaje con rango de entrada de ± 10 V, rango acumulado de muestro de 500 kS/s y una resolución de 12 bits. Entradas de una sola terminal.
- Módulo 9265 maneja 4 salidas analógicas de corriente actualizadas simultáneamente, 100 kS/s. Rango de salida de 0 a 20 mA, resolución de 16 bits. Detección de lazo abierto con interrupción, valor de encendido de 0.0 mA.

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
 11-07_EstaciónCuatro	07/11/2013 11:59 ...	Documento de tex...	7,803 KB
 11-07_EstaciónDos	07/11/2013 11:59 ...	Documento de tex...	7,803 KB
 11-07_EstaciónTres	07/11/2013 11:59 ...	Documento de tex...	7,803 KB
 11-07_EstaciónUno	07/11/2013 11:59 ...	Documento de tex...	8,085 KB
 11-08_EstaciónCuatro	08/11/2013 07:52 ...	Documento de tex...	78,516 KB
 11-08_EstaciónDos	08/11/2013 07:52 ...	Documento de tex...	78,315 KB
 11-08_EstaciónTres	08/11/2013 07:52 ...	Documento de tex...	78,508 KB
 11-08_EstaciónUno	08/11/2013 07:52 ...	Documento de tex...	82,533 KB

Figura 2.13: Reportes generados en memoria USB

Sobre el monitoreo, se genera un reporte personalizado para el usuario, colocando datos independientes. Es decir, por cada estación se le imprime las temperaturas, voltajes, corrientes y potencia consumida. Los reportes se guardan en la memoria flash previamente colocada en el puerto del CompactRIO, evitando el uso de la memoria CPU. Pueden observar en la figura 2.13, el archivo guardado en memoria USB.

2.4. Sistema de Control

2.4.1. Descripción general

Para tener control en la temperatura del recinto se regula el flujo de refrigerante y la variación de corriente de una resistencia de calentamiento. En los actuadores, se gobierna lo siguiente: resistencia eléctrica, válvula de expansión electrónica, y válvula de By-pass de gas caliente.

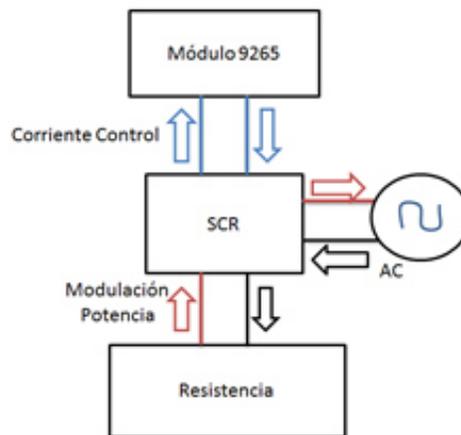


Figura 2.14: Circuito de control de resistencia

Para la elevación en temperatura se tiene una resistencia eléctrica de 10 kW que se observa en la figura 2.14. La potencia de la resistencia se varía usando un SCR.

El controlador rectificador de silicio (SCR) es controlado por la inyección de corriente que proviene del módulo 9265. El funcionamiento de la inyección de corriente de dicho módulo se linealiza, es decir, de los 4-20mA se controla la potencia de 0 a 100 %. En la figura 2.15 se observa el diagrama del sistema de calefacción. Las siguientes especificaciones técnicas se refieren al SCR:

- Entradas de 4-20 mA

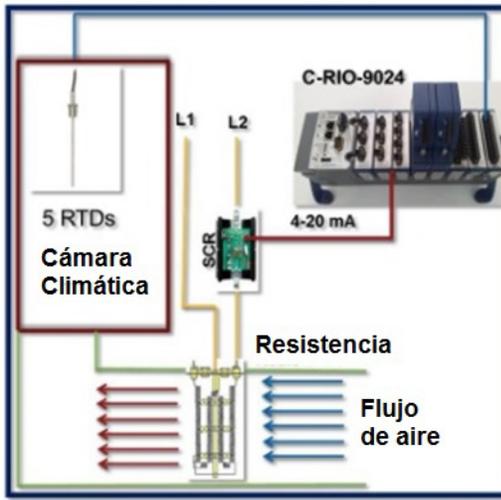


Figura 2.15: Diagrama del sistema de calefacción

- Voltaje de alimentación 110/220/440 VAC
- Temperatura ambiente 30 a 120 °C, enfriamiento por convección.

2.4.2. Sistema de refrigeración

Para el control de flujo de refrigerante se gobierna la válvula de expansión electrónica (VEE) y la válvula de *By-pass* de gas caliente (VBH). Se programa la VEE con la restricción de tener un diferencial de temperatura (*superheat*), en el cual no queda duda alguna que la evaporación del refrigerante sea total pero, sin tener un sobrecalentamiento excesivo; ya que éste podría causar un desgaste en el aceite lubricante del compresor.

En la VBH se realiza un corto circuito en el sistema de refrigeración, figura 2.17, inyectando vapor caliente en la entrada del evaporador, reduciendo la capacidad del evaporador en la absorción de calor sensible del recinto. Ambas válvulas funcionan usando motores a pasos, controlando el número de pasos se tiene un manejo en la apertura de las válvulas.

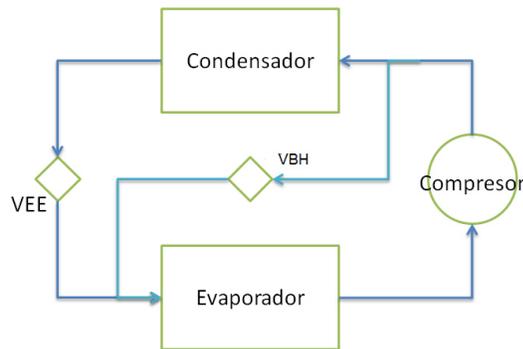


Figura 2.16: Circuito de control de refrigeración

2.4.3. Sistema de humidificación

En la generación de vapor, se tiene la preparación del humidificador, donde la señal de control será proporcionada por el uso de un SCR, el cual variará la potencia de la resistencia interna que se encuentra sumergida en agua. De igual manera, la orden de variación en la potencia, vendrá de una salida de corriente analógica (4-20mA) del módulo 9265 que entra a la electrónica del SCR.

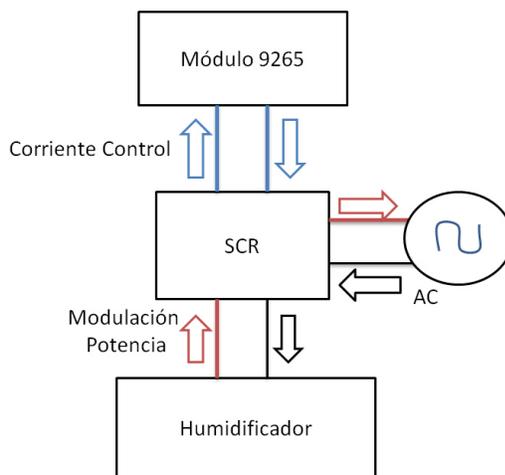


Figura 2.17: Circuito de Control de Humidificación

Se utiliza la plataforma CompactRIO, debido a su versatilidad y robustez en el manejo de datos, así como en el control de actuadores. La plataforma tiene un procesamiento de condiciones en alta velocidad preestablecidas por el usuario. En caso

de alguna emergencia la respuesta del dispositivo sería inmediata, reduciendo los riesgos de fallas críticas en los actuadores, por ejemplo en el sistema de refrigeración y calefacción. La plataforma tiene una capacidad de programación muy amplia, el usuario puede interactuar con el software, programando de manera cómoda y clara.

Las especificaciones técnicas de la plataforma son las siguientes:

- Controlador embebido que ejecuta LabVIEW Real-Time para control, análisis y registro de datos determinísticos
- Procesador de 800 MHz, almacenamiento no volátil de 4 GB, memoria DDR2 de 512 MB
- Puertos Dual Ethernet con servidores de Web y de archivos embebidos para interfaces de usuario remotas
- Puerto USB de alta velocidad para conexión a USB flash y dispositivos de memoria
- Puerto serial RS232 para conexión a periféricos; entradas dobles de suministro de 9 a 35 VDC
- Rango de temperatura de operación de -20 a 55 °C

Dentro de las válvulas se encuentra un motor a pasos que es gobernada por el uso de una tarjeta electrónica. La tarjeta electrónica lee la corriente que envía el módulo de corriente analógica proveniente del CompactRIO. Una vez que se encuentran conectados los dispositivos electrónicos ya mencionados, la comunicación empieza configurando las salidas correspondientes en el programa de Labview. Se debe tener mucho cuidado en la configuración de la tarjeta, ya que es muy delicada. Se muestra físicamente las tarjetas en la figura 2.18. El diagrama de conexiones son semejantes al controlador de la cámara de bajo costo. Se puede ver en la figura 2.3 el diagrama de conexiones.

2.5. Sintonizado

Previo a la presente sección, la figura 2.19 muestra los puntos que se han realizado del proyecto, se visualiza los avances mecánicos y electrónicos.



Figura 2.18: Vista física del controlador de válvulas

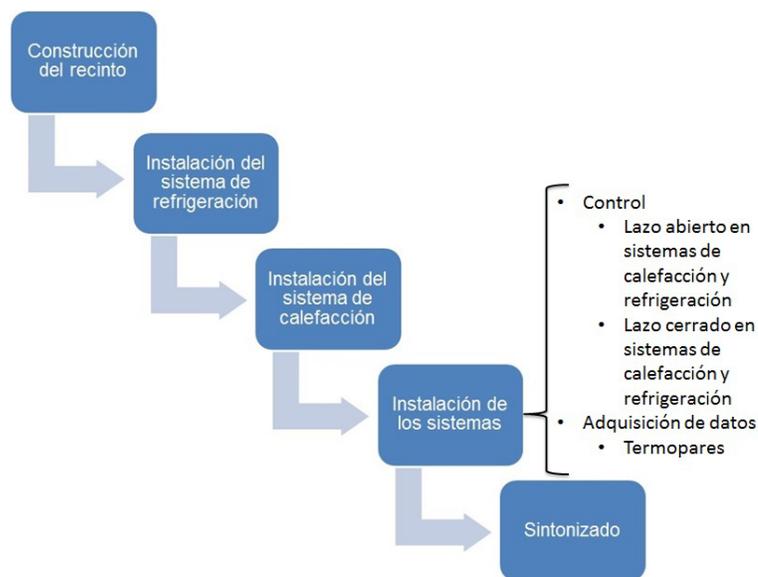


Figura 2.19: Visualización completa del trabajo realizado antes del sintonizado

Los dispositivos que fueron programados en lazo abierto, se retomaron, y cuidadosamente se reprogramaron en lazo cerrado. En la programación se utilizó la librería PID para la sintonización de los sistemas. El sintonizado se utiliza para lograr un comportamiento del sistema de control aceptable, de conformidad con un cierto criterio de desempeño. En el proceso de la sintonización, uno debe identificar la dinámica del proceso, a partir de ahí, determinar los parámetros del controlador utilizando el método de sintonización. La dinámica del proceso inicia cuando el sistema de control pregunta la temperatura consigna, la programación debe entender si se necesita refrigerar o calentar el medio. La diferencia entre el valor de salida con la entrada se denomina error. El error se utiliza dentro del sistema de control

como variable importante de manipulación de los sistemas anexos (calefacción y refrigeración). El error se procesa en el controlador proporcional integral derivativo, ejecutando acciones necesarias en los actuadores de los diferentes sistemas anexos. Es decir, si la temperatura del recinto está por debajo de la consigna, el sistema de control acciona la calefacción. El método más básico de sintonización para determinar los valores iniciales del PID, como se maneja en el artículo de Ziegler y Nichols [3], inicia enviando el valor integral y derivativo a cero, y determinando la respuesta del sistema con tan solo el valor proporcional. El valor de ganancia proporcional se incrementa hasta disminuir el error (diferencia del valor consigna con el valor medido), causando una oscilación sostenida en la variable a observar, este valor se llama ganancia máxima proporcional (P_u); y el periodo de tiempo (tiempo entre las oscilaciones) se llama periodo máximo (T_u).

$$K_c = 0,6K_c u \rightarrow 1,0K_c u \quad (2.1)$$

$$T_i = 0,5T_u \quad (2.2)$$

$$T_d = 0,125T_u \quad (2.3)$$

Utilizado variaciones del método de Ziegler y Nichols se ha convertido en un patrón al cual han establecido comparaciones entre muchos de los métodos de sintonización en controladores.

La programación en el sistema de control ha tenido una evolución importante a través de la puesta a punto de la cámara. Los lazos de control cerrados fueron implementados de manera práctica en los sistemas de refrigeración y calefacción. En la refrigeración, se gobierna la apertura en las diferentes válvulas. En la calefacción, se regula la potencia que alimenta a la resistencia.

Se inicia con la planeación de control de ambos sistemas; primero, trabajando con el sistema de calefacción y después refrigeración. El control se desarrolla de manera distinta en los sistemas, el cual se explica a continuación:

Calefacción

Se realizan las conexiones correspondientes en la calefacción para tener noción del buen funcionamiento, como se observa en la figura 2.15. En la instalación se utiliza un rectificador controlador de silicio, que realiza la función de controlar corrientes.

El SCR (Rectificador controlador silicio) se conecta al módulo de salida de corriente, como se observa en la figura 2.20. Las especificaciones técnicas del SCR se mencionaron en la sección **sistema de control**. Al tener una efectiva comunicación entre componentes, se prosigue a la conexión de 220 VAC para lograr el calentamiento de la resistencia. La potencia administrada fue variada para controlar la resistencia.



Figura 2.20: Controlador rectificador de silicio

Una vez que se obtiene evidencia de que las conexiones son correctas, se prosigue a realizar un lazo abierto en el sistema de calefacción. En el lazo abierto como fue mencionado no se requiere una retroalimentación, es decir, no es posible comparar la señal de entrada con la salida. Se programó el lazo para tener la señal de salida como monitoreo, y tener conocimiento que se alcanza la temperatura dentro del recinto. Es claro que al momento del ensayo, la resistencia genera calor de tal forma

que se supera la temperatura consigna y hay un retraso de tiempo en el censado de temperatura. El tiempo de retraso se calcula como el inverso de la frecuencia de muestreo.

Al tener conocimiento de que el lazo abierto y el funcionamiento de la calefacción fueron efectivos, se utilizó un lazo cerrado. En el lazo cerrado, la señal de salida se compara con la señal de entrada dando como resultado un error. El error es corregido mediante el uso del controlador PID. La sintonización se basó usando el controlador PID básica, colocando los valores integrales y derivativos a cero, y modificando el proporcional hasta que la señal de temperatura llegue a una oscilación estable. Después del paso de oscilación estable, se atenuó la señal usando los integrales y derivativos.

Refrigeración

Al controlar efectivamente la calefacción, la refrigeración es el siguiente paso a trabajar. Como ya habíamos mencionado, en la refrigeración es requerido controlar dos tipos de válvulas. El control maneja la válvula de By-pass de gas caliente y de expansión electrónica.

La válvula de By-pass de gas caliente (VBG) como la válvula de expansión (VEE) están compuesta por una compuerta que restringe el flujo de refrigerante. La compuerta es abierta y cerrada por un motor a pasos.

La comunicación tuvo éxito al escuchar la apertura de ambas válvulas. Se prosiguió a la instalación del circuito de refrigeración y el sistema electrónico. En el sistema electrónico, se probó primeramente el uso del Kelvin como controlador. El uso del Kelvin II como controlador hizo que el manejo fuera manual. Es decir, modificar en el PLC las constantes del PID así como la temperatura consigna, era técnicamente ir al PLC y reprogramar cada cambio. La configuración no era práctica además de que la señal de temperatura tampoco fue útil. La gráfica 2.21 muestra el comportamiento de la temperatura.

En el gráfico 2.21 se ordena que la temperatura consigna sea 20 °C. La temperatura del recinto oscila de tal modo que el promedio resulte la consigna. Al comparar el ensayo del PLC con la 1.7, nos percatamos que hay ventaja en el uso del controlador autómatas programables, PAC. Con tal evidencia, se optó por la migración completa

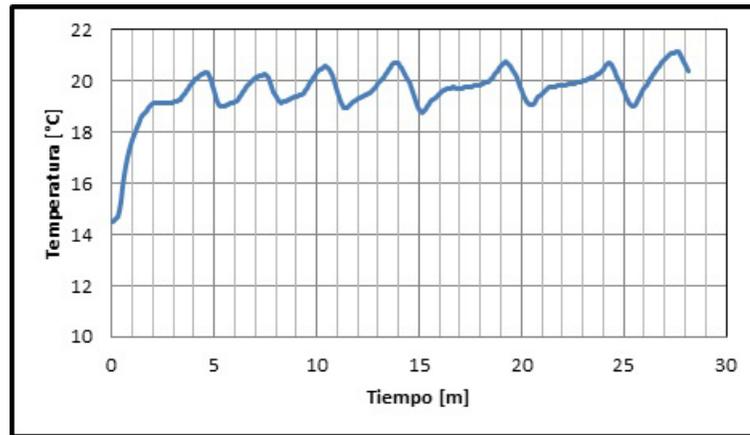


Figura 2.21: Temperatura en función del tiempo en donde se utiliza el Kelvin II

de la refrigeración al CompactRIO. La migración fue un trabajo arduo, ya que los sensores del proveedor trabajan de manera particular. Es decir, el controlador Kelvin estaba compuesta por elementos que adecuaban las señales, así como la alimentación de sensores. En contra parte, se estudiaron los diagramas de alimentación y el tratamiento de señal, llegando a decidir en tomar el Kelvin como acondicionador de señal, como se muestra en la figura 2.12. La señal se mantenía con una baja variación y en un tiempo adecuado. Se puede observar en la gráfica 2.22 de comportamiento.

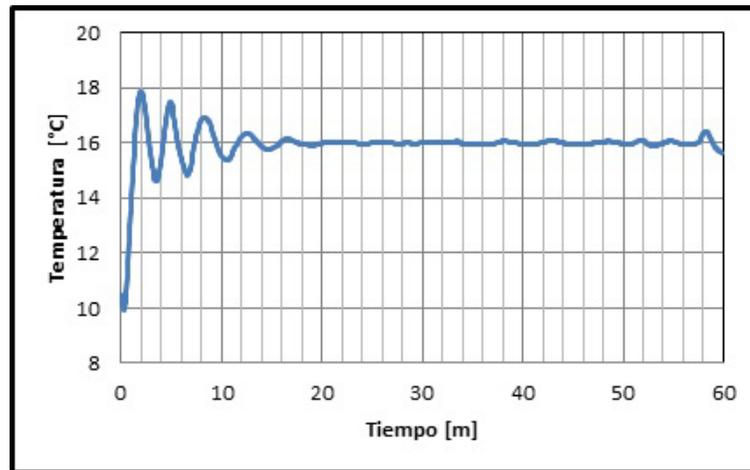


Figura 2.22: Comportamiento bajo control del CompactRio

Entonces se trabaja con la válvula de expansión, porque maneja el caudal de refrigerante que entra al evaporador. Las válvulas de By-pass de gas caliente, presión

mecánica y presión electrónica fueron bloqueadas mecánicamente, figura 2.23. En consecuencia, el ciclo de refrigeración fue controlado solamente con la válvula de expansión, esto con el objeto de observar los alcances en las acciones implementadas.

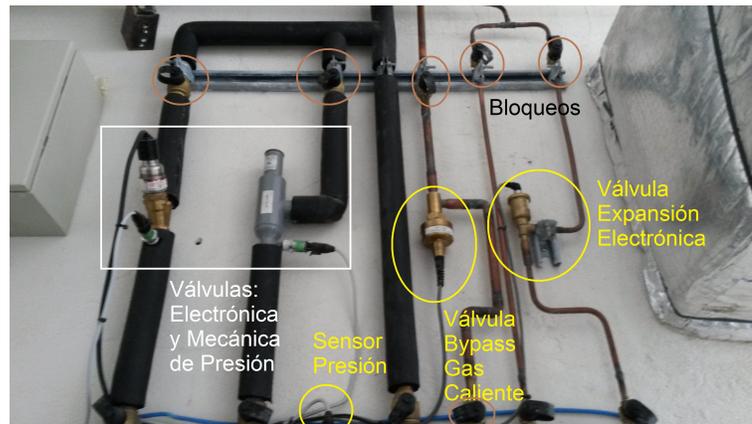


Figura 2.23: Circuito de válvulas

Como se mencionó en la etapa pasada, para la migración completa al CompactRIO se programó un lazo abierto para la refrigeración. El sistema obtuvo una respuesta inmediata pero con un error en la señal evidente, debido al retraso de tiempo que hay por el tipo de lazo. En la gráfica 2.24 se observa la rapidez de enfriamiento. El porcentaje de apertura en la válvula varía de manera controlada, partiendo de una temperatura inicial. La temperatura inicial fue especificada a 20 °C.

Al término del ensayo anterior, se tomó una medida de seguridad para proteger el ciclo de refrigeración. La medida de seguridad fue observar la presión de succión, ya que un descuido puede ocasionar un sobrecalentamiento. Después, se empezó a programar en lazo cerrado junto con el factor seguridad. Se observó que la temperatura consigna era alcanzada con altos niveles de presión en la succión del compresor. Entonces se implementó el uso del sobrecalentamiento (superheat). El superheat es la diferencia que hay entre la temperatura en la línea de succión con la temperatura de la presión del refrigerante en dicho punto. El valor del superheat es 10. El superheat se utiliza como limitación en el flujo de refrigerante. La válvula de expansión es quien limita dicho flujo, entonces, limitando la apertura de la válvula podemos controlar el valor del superheat. Al implementar el control del superheat a prueba, teníamos una oscilación controlada y la temperatura variaba a la consigna. En esta

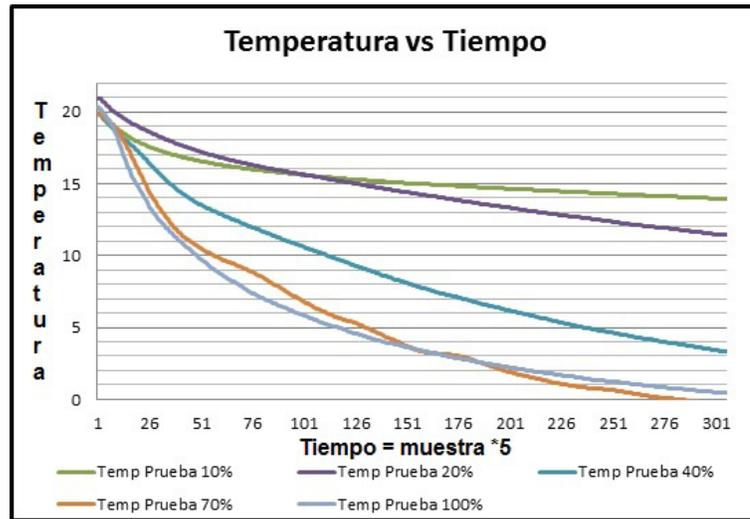


Figura 2.24: Comportamiento de la rapidez de enfriamiento

variación, se programa dos niveles de trabajo (nivel bajo y nivel alto). Después de la oscilación controlada, se desbloquea la válvula de By-pass para dar un control fino al ciclo de refrigeración. Al probar esta configuración se llegó a tener excelente control, pero con el tiempo surge la formación de un tapón de hielo en el evaporador. El tapón de hielo produce una congelación de la tubería y descontrola el sistema. En la gráfica 2.25, se muestra el comportamiento descrito anteriormente.

El sobre-enfriamiento (overcooling) toma efecto desarrollando un tapón de hielo en el evaporador, la caída de la temperatura de la línea del evaporador es ocasionada en parte por malas condiciones de flujo en el evaporador. El efecto del sobre-enfriamiento conduce a que la caída de la presión en la válvula, y con el tiempo la temperatura también. El sistema de refrigeración se trabaja fuera de sus condiciones nominales de operación. Reconociendo el efecto en la válvula, se empieza a atacar el problema ingresando una señal senoidal en la apertura de la válvula. Tal estrategia retarda el tiempo de formación de escarcha cerca de 3 horas.

Ahora, se generan diferentes estrategias en el deshielo. El comienzo de la etapa de deshielo consiste en hacer circular aire caliente durante 10 minutos, para remover la escarcha. Después se iniciaba un proceso de estabilización en el control, el cual trata de llegar a la temperatura consigna dentro en los siguientes 15 minutos. Enseguida del tiempo empleado, el ensayo comenzaba. Ello derivó en dos problemas, uno era

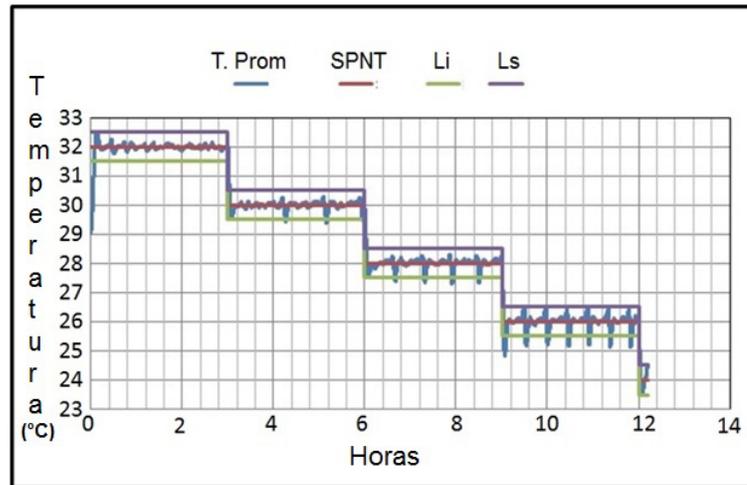


Figura 2.25: Temperatura controlada por niveles

el tiempo insuficiente para estabilizar la temperatura, el segundo problema fue la formación de hielo a las 8 horas. En la gráfica 2.26 se muestra el ensayo. Se observa que la temperatura del recinto se mantiene a la par de la consigna. Al cambio de consigna, la etapa del deshielo inicia, logrando remover el hielo en el evaporador y el sistema regresa a la estabilidad, pero al cabo de unas horas la formación de hielo desestabiliza el sistema. La presión de la línea de succión cae repentinamente detonando la formación de escarcha en el evaporador.

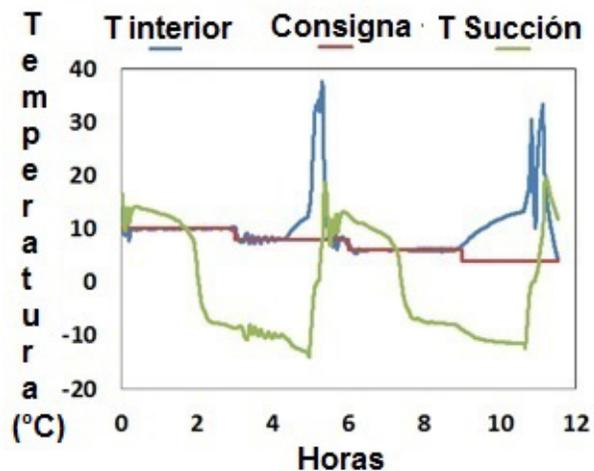


Figura 2.26: Ensayo de deshielo

Se retira la etapa del deshielo y se realiza una oscilación de $\pm 3\%$ en la apertura, después entra el control para estabilizar la temperatura. Al realizar ensayos, se observa un comportamiento donde retarda la formación de hielo más de 8 horas. Al cambio de consigna, el sistema de control mantiene una excelente estabilidad y precisión en la temperatura, pero ocurre la formación de hielo. El resultado fue una inestabilidad descontrolada y tarda mucho más tiempo el sistema de control en alcanzar la temperatura consigna.

El sobre-enfriamiento se generaba cuando la presión de succión cae, se tomaron medidas para observar este factor. Se supervisa la presión de succión, al momento de caer la válvula de expansión trabajaba para restablecer el sistema. Se perdía precisión pero la formación de hielo se postergaba más tiempo.

Para mejorar la estabilidad y precisión se dividió el manejo de temperaturas en los rangos que se definen a continuación:

- Temperatura mayores 22 °C
- 22 a 16 °C
- 16 a 8 °C
- 8 a 0 °C

Se implementaron dos diferentes controladores PID independientes, donde uno trabaja con la válvula de expansión realizando una oscilación controlada. El segundo controlador se utiliza para acondicionar con menor variación la señal de temperatura.

El acondicionamiento se puede dar con la válvula de By-pass de gas caliente o la resistencia eléctrica. En la figura 2.28 se explica el flujo de información y en la figura 2.27 se observa el comportamiento de la temperatura.

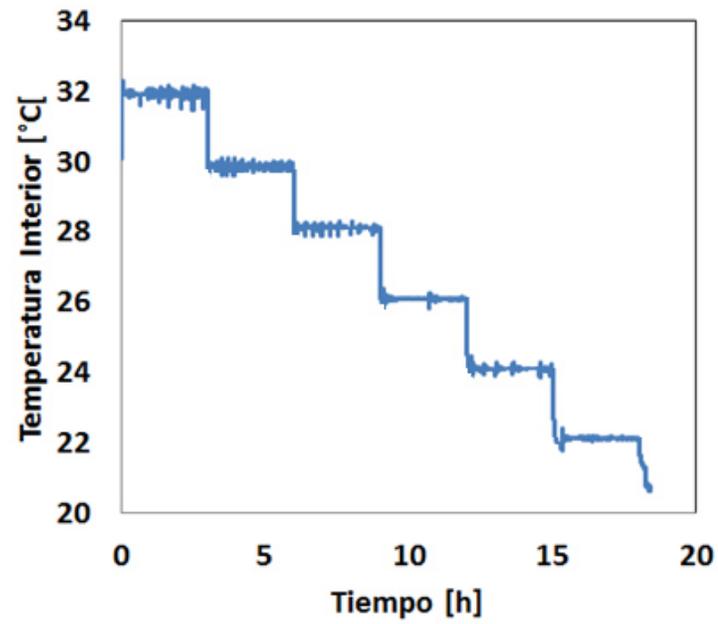


Figura 2.27: Gráfica de la temperatura por medio de etapas

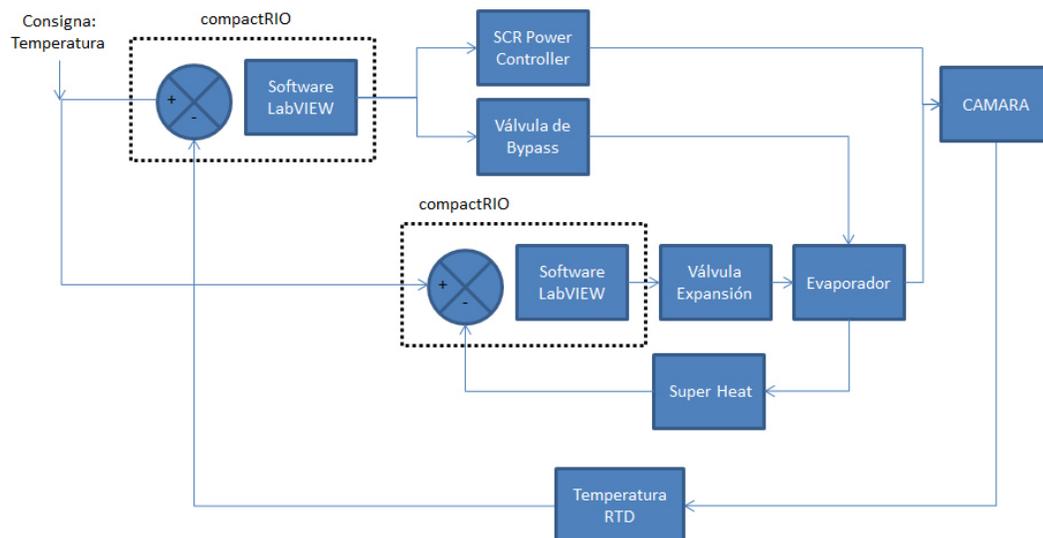


Figura 2.28: Diagrama de control por etapas

Capítulo 3

Metodología de ensayos y pruebas preliminares

3.1. Introducción

En esta sección se detallan aspectos relacionados con las pruebas, resultados y prototipos que llegaron a impactar en el manejo y programación del comportamiento de la cámara de clima controlado. La programación, como se menciona en el apartado 2.5 Sintonización, sufre una evolución contundente. La evolución de la programación se refleja en los resultados en dichos ensayos.

Se inicia desarrollando una interfaz gráfica para mejor entendimiento de los datos recopilados. Observando la figura 3.1 pueden notar indicadores, botones y gráficas. Comenzando con la parte izquierda superior, encontramos los siguientes comandos:

- **Stop** tiene la función de detener la aplicación completa.
- **Manual By-pass (T)** tiene la función de cambiar de modo manual al automático.
- **Válvula (4 mA-Cerrada) porcentaje de apertura** tiene la función de realizar la apertura de la válvula de By-pass en modo manual.
- **Válvula (Porcentaje Potencia)** tiene la función de realizar la modulación de potencia, de 4 mA como apagada hasta 20 mA que es máxima capacidad.

- **PID By-pass** se escriben los valores del controlador PID.
- **Resistencia / By-pass** son indicadores de los valores actuales de corriente en cada componentes.
- **SPNT T** el valor de temperatura que se busca controlar en la cámara climática.
- **Error T** la diferencia de temperatura entre la consigna y la actual.

En la parte inferior izquierda, observamos los siguientes comandos:

- **PID SH** maneja los valores del controlador PID que domina la respuesta de la válvula de expansión.
- **SPNT SH** el valor de superheat en el ciclo de refrigeración.
- **SH / P. succ / T. succ / Expansión** son indicadores de los valores actuales de la variable.
- **Válvula expansión (4mA - Cerrada) porcentaje de apertura** tiene la función de controlar el porcentaje de apertura de la válvula de expansión en modo manual.
- **Manual Expansión** tiene la función de cambiar de modo manual al automático o viceversa.

En la parte derecha, la primera gráfica muestra la evolución temporal de la temperatura consigna y la temperatura del recinto. La gráfica inferior izquierda muestra valores de corriente en las válvulas de expansión y By-pass, además de la corriente actual de de la consigna de potencia que el SCR envía a la resistencia eléctrica. La gráfica inferior derecha muestra las condiciones de temperatura de saturación y de succión en el sistema de refrigeración.

3.2. Metodología de ensayos

En esta sección, se expone el procedimiento para la utilización de la cámara climática.

Alimentación eléctrica de la cámara climática

La alimentación eléctrica de la cámara climática inicia con la manipulación de las

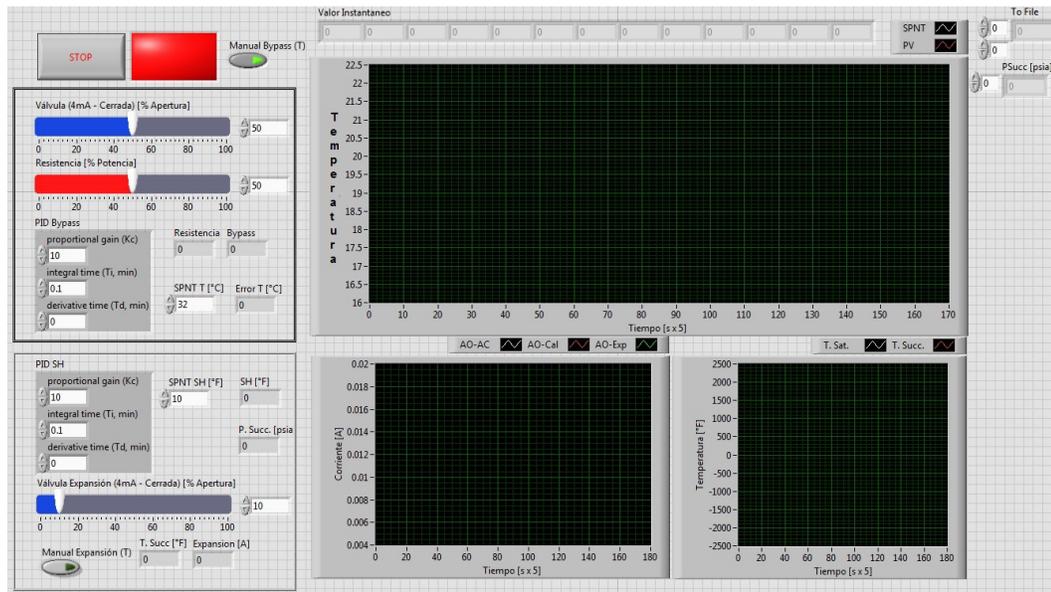


Figura 3.1: Interfaz del sistema de control de la cámara climática

pastillas del centro de carga que se encuentran en el centro de potencia, acceso izquierdo de la cámara. En este centro de carga se encuentra la alimentación total de la cámara climática.

Encendido y conexión de comunicación de los CompactRio

Después de encender la alimentación eléctrica, se prosigue con la conexión eléctrica de los CompactRio. Las conexiones se hacen dentro de los gabinetes correspondientes del sistema de control y adquisición de datos. Los gabinetes se encuentran en el centro de control, pasillo derecho de la cámara climática.

La comunicación vía red de datos siempre está conectada. La conexión respectiva se dejó permanente con el sistema de redes del edificio, asignada una dirección IP fija y exclusiva.

Arrancar LabView y realizar comunicación con los CRio

Al arrancar LabView, abrimos el proyecto VO2(Scanmode). El proyecto tiene configurados los CRio correspondientes al sistema de adquisición de datos y de control. En el sistema de control, hay opción de abrir el programa SMV2 para mantener una temperatura por largo tiempo, ajustando de manera manual la temperatura consigna y el valor de sobrecalentamiento. Este programa inicia enviando todos los actuadores

a sus estados iniciales, donde las válvulas van abrirse completamente y la resistencia a 0 % de potencia. Se programa un retraso de tiempo para que funcione la actividad anterior, y prosigue a realizar la lectura de RTDs dentro del recinto. El controlador PID toma el resultado y lo compara con la consigna, para después realizar la acción de refrigeración o calefacción. También está la opción de abrir SMV17 para tener descensos de temperatura en lapsos de tiempo determinado. Este programa realiza acciones semejantes al SMV2 pero se retira las gráficas de corrientes inyectadas en los actuadores y se agregan las gráficas de valores de potencia, corriente y voltaje de las diferentes estaciones. Aparte el SMV17 tiene la capacidad de bajar la temperatura automáticamente después de cierto tiempo de prueba. En la adquisición de datos cada programa se dio de alta por separado, pero aun así se pueden utilizar las cuatros estaciones independientemente.

Arranque de sistemas de refrigeración y calefacción

Al tener programas y componentes a evaluar listos, se prosigue a la alimentación eléctrica de los sistemas de refrigeración y calefacción. Primeramente hay que ubicarlos en el centro de carga y localizar las pastillas de la manejadora, calefacción y refrigeración. Al ubicarlos, se enciende primero la manejadora, calefacción y refrigeración. Al apagar se sigue en sentido inverso.

Seguridad

Para el uso de la cámara climática, se debe tener las siguientes precauciones:

- Todos los detalles de experimentación deben estar listos antes de arrancar con el ensayo.
- Cualquier tipo de ensayo que haya arrancado, no importa la temperatura dentro del recinto, debe detenerse si se requiere alguna modificación dentro de los componentes a evaluar.
- La cámara tiene rangos de temperatura amplios; antes de ingresar se requiere que la temperatura del recinto llegue a una estabilidad con el exterior.
- Las alimentaciones de las estaciones de trabajo no se deben utilizar para encender equipos o iluminación que no sean parte del ensayo. Si se requiere alimentación extra, hay que utilizar una extensión y conectar desde el exterior de la cámara.

3.3. Pruebas preliminares: Pruebas a Modelos Chillerator

Se usó la cámara para probar la capacidad de condiciones dinámicas de temperatura, la cual es la ventaja que tiene contra su antecesor. El producto a monitorear fue un refrigerador de la compañía Whirlpool llamado Chillerator (seudónimo); el cual se vende en Canadá y Estados Unidos, especialmente en las zonas de clima frío. El refrigerador tiene la capacidad de refrigerar y congelar alimentos. Las condiciones bajas de temperatura repercuten en la calidad de los alimentos. El refrigerador cuida los alimentos de las condiciones externas, recurriendo al uso de una resistencia para calentar el interior manteniendo los productos a temperaturas óptimas, cuando la temperatura del exterior se encuentra por debajo de las temperaturas adecuadas para la refrigeración.

La prueba que se sugirió llevar a cabo, es introducir cuatro refrigeradores a los cuales y registrar sus durante su operación. El registro tendrá los siguientes componentes:

- Temperaturas internas (lugares predeterminados por la Norma Mexicana de Energía, NOM-Ener-015-2012)
- Registro Eléctrico (Potencia, voltaje, corriente)

El procedimiento del experimento se estipuló mediante un protocolo de prueba establecido por la compañía Whirlpool, donde indican que la cámara tendrá que comportarse de la siguiente manera:

- La temperatura máxima del recinto debe iniciar en 32 °C
- Se mantendrá constante la temperatura en el interior de la cámara durante tres horas. Una vez transcurrido este tiempo la temperatura debe disminuir 2 °C. La temperatura se mantendrá por tres horas más y al concluir este tiempo se deberá reducir la temperatura 2 °C nuevamente. Este estrategia se debe continuar hasta llegar a 0 °C. Después, la temperatura debe incrementar 2 °C y mantenerse tres horas. Esto continuará hasta finalizar en una temperatura de 10 °C
- La temperatura mínima del recinto debe ser 0 °C

- La temperatura final del recinto debe alcanzar 10 °C

El comportamiento de la cámara durante el experimento se observa en la figura 3.2. Los decrementos y los incrementos son de 2 °C, cada 3 horas, dando un total de 66 horas de trabajo.

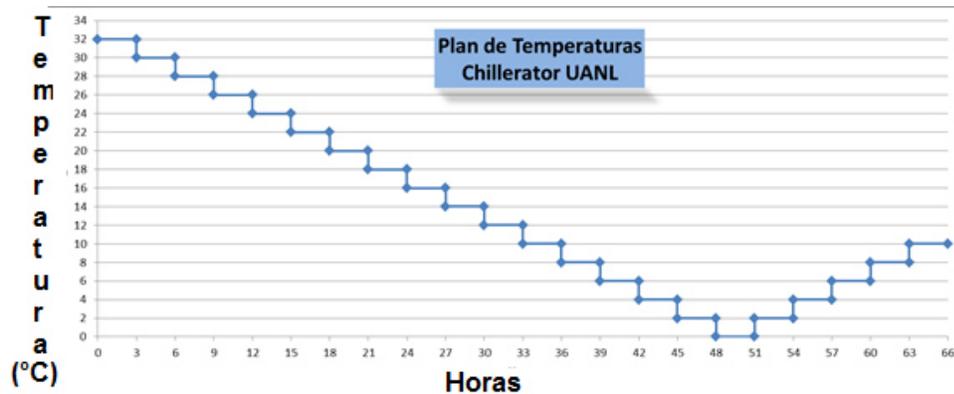


Figura 3.2: Prueba determinada para los refrigeradores

Al colocar los refrigeradores en posición, se comienza el ensayo. El ensayo se siguió durante las horas de prueba, revisando que no aparezca indicios de hielo en las tuberías. Las primeras 24 horas de trabajo fueron un éxito.

Como se observa en la figura 3.3, la temperatura consigna programada se asemeja a las indicadas en la trayectoria del ensayo. Por otra parte la temperatura de la cámara, se asemeja a la temperatura consigna con variaciones, esto es porque en diferentes etapas se programa con diferente técnicas de control. Al inicio de la prueba la cámara busca llegar a la temperatura consigna. Las elevaciones de temperatura en la cámara durante el cambio de consigna son etapas de deshielo que se programan dentro del sistema de control. En cada cambio de consigna de temperatura, se usaron diferentes etapas de control en la válvula de expansión, la válvula de By-pass de gas caliente y la resistencia eléctrica. Se observa en la figura 3.4, la precisión del sistema de control. En la figura 3.4 se observa una variabilidad ($\pm 1^\circ\text{C}$) debido al acoplamiento de las constantes en el controlador PID en ambas válvulas. Como se explica en la parte de la sintonización, la adversidad mencionada fue resuelta separando los controladores. Es decir, cada válvula se maneja con sus propias constantes de

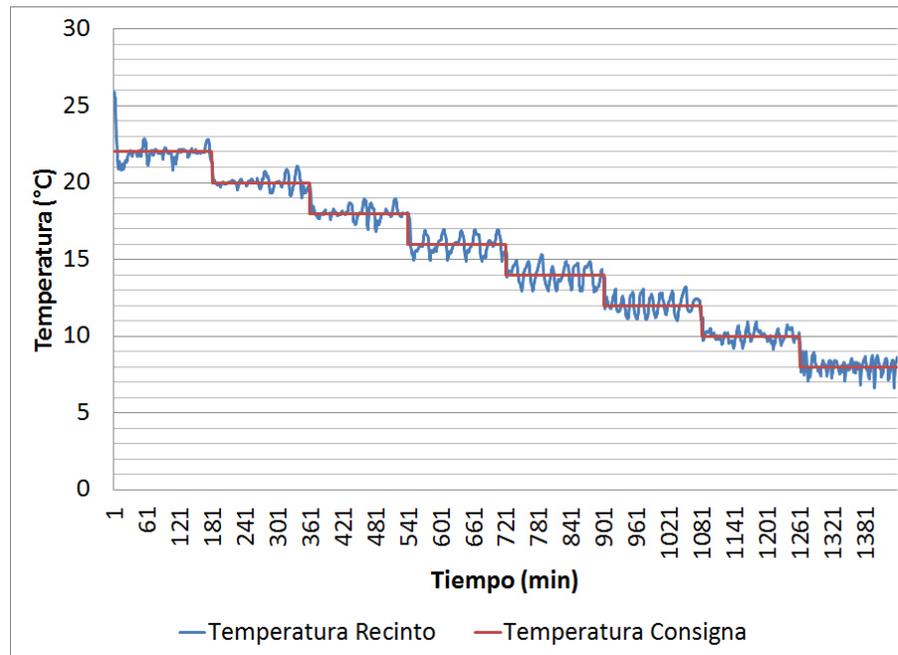


Figura 3.3: Comportamiento de la Cámara durante la prueba de los Chillerators

PID.

Un refrigerador se encuentra en condiciones controladas, se muestra nueve mediciones dentro de la unidad: 3 en el congelador, 3 refrigerador, 2 compartimiento de alimentos y 1 en el compresor. En la figura 3.5, se observa las temperaturas internas del prototipo.

La temperatura superior corresponde a la medida de un termopar colocado cerca del compresor. El conjunto de señales centradas en la gráfica corresponden a termopares localizados en el refrigerador y en el compartimiento de refrigeración. Las señales de baja temperatura corresponden a termopares ubicados en el congelador. La distribución de termopares se puede ver en la figura 3.6.

Además, se registran las mediciones eléctricas donde se llega a apreciar los ciclos de encendido y apagado del refrigerador. Los ciclos mencionados se puede observar en la figura 3.7.

La interfaz de usuario desarrollada para esta experimentación se observa en la figura 3.8. Las gráficas que se muestran son las siguientes: Temperatura consigna vs temperatura recinto.

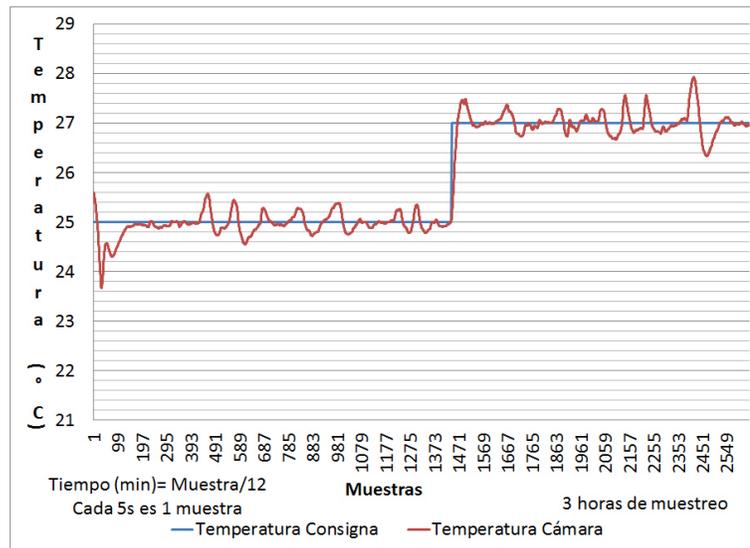


Figura 3.4: Acercamiento en el comportamiento de la cámara

La gráfica 3.9 muestra el comportamiento de la temperatura del recinto. En la última parte del ensayo, el sistema salió fuera del control. Pero aún así el sistema busó la manera de mantener la temperatura cerca de la consigna.

Es posible observar:

- Potencias consumidas en cada estación
- Corrientes suministradas en cada estación
- Voltajes de alimentación en cada estación

El botón **Stop**, finaliza el experimento y detiene cualquier sistema implementado. El comando **duración temperatura** tiene como función el recopilar el valor en horas. El valor de duración se usa para mantener el número de horas en cierta temperatura consigna. El comando **T Max** es el valor inicial en temperatura. El comando **T Min** es el valor final en temperatura. Es decir el experimento inicia con la **T Max** de 32 °C, bajando 2 °C según la duración temperatura. Al llegar a 0 °C, la cámara climática ascenderá en temperatura cierto número de horas hasta alcanzar la **T Min**.

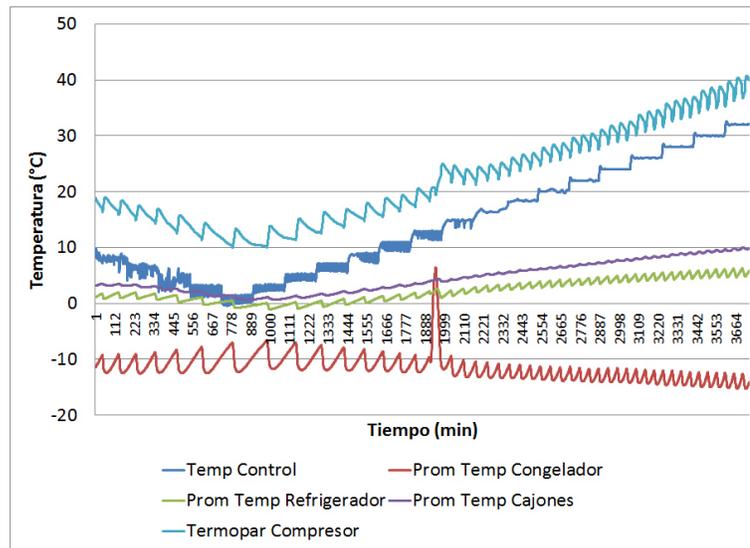


Figura 3.5: Temperaturas Internas del Refrigerador

3.4. Discusión de resultados

Los experimentos se clasificarán en tres grupos. El primero es la implementación del sistema de control donde podemos manipular los actuadores y mantener una temperatura requerida. El segundo es la capacidad de realizar mediciones de temperatura y tomar registros eléctricos. El tercero es la facilidad de programar el control, usando diferentes técnicas.

3.4.1. Implementación del sistema de control

El sistema de control es utilizado para manipular los actuadores de los sistemas de refrigeración y de calefacción. En el sistema de refrigeración manipulamos la válvula de By-pass de gas caliente y la válvula de expansión electrónica. El sistema de calefacción gobierna la resistencia eléctrica. Se implementaron dos controladores PID, que corrigen la señal de salida de los actuadores en base al error entre la temperatura consigna y la del recinto. Un controlador se utiliza en la válvula de expansión y el otro en la resistencia y válvula de By-pass, como se muestra en la figura 3.10.

El actual sistema de control es más complejo y completo que el sistema de

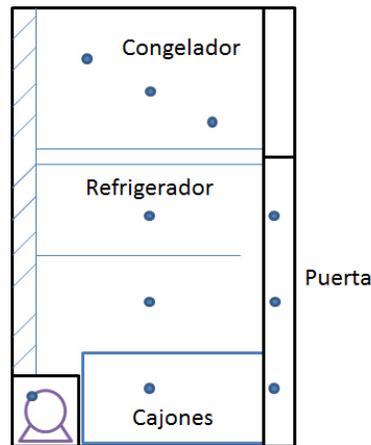


Figura 3.6: Distribución de termopares

control de la cámara de bajo costo, se pueden observar diferencias entre las figuras 3.10 y 3.11.

El sobrecalentamiento se controla con la apertura de la válvula de expansión. La válvula de expansión forma parte del ciclo de deshielo del evaporador. La configuración realizada en el sistema de control nos ofrece una precisión de ± 0.5 °C.

En la figura 3.12 se puede observar conceptualmente el funcionamiento del sistema de control, y en la figura 3.13 se observa la variación de temperatura.

3.4.2. Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos permite la medición de temperatura y registros de variables eléctricas. La adquisición de temperatura, como se observa en la figura 3.14, realiza el registro detectando el comportamiento del refrigerador contra la temperatura del recinto.

La adquisición de datos de variables eléctricas, como se muestra en la figura 3.15, recopila la demanda de energía eléctrica, aún a altas frecuencias de adquisición de datos, como lo muestra la figura 3.16.

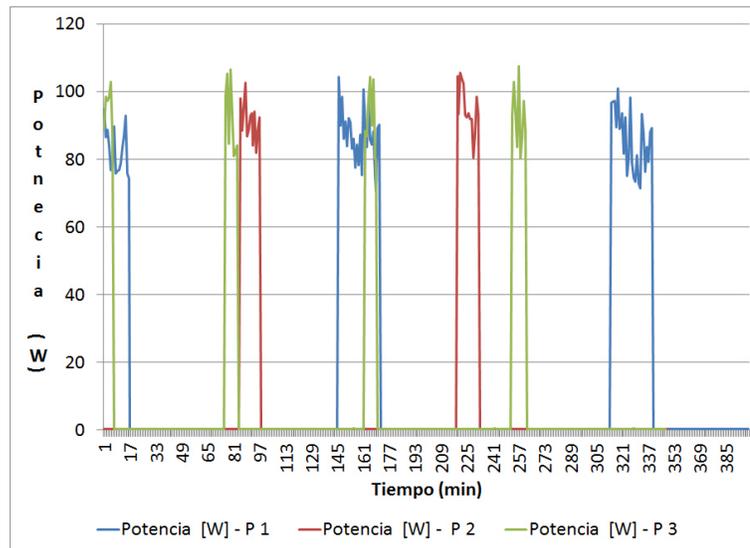


Figura 3.7: Registro eléctrico de los chillers

3.4.3. Programación de control

En la programación del sistema de control se puede llegar a utilizar lógica difusa o redes neuronales para incrementar la estabilidad en el valor de sobrecalentamiento y la temperatura del recinto en estado estable o dinámico. Este trabajo se limita a exponer el proceso de implementación de estrategias de control. En este sentido, se empleó un proceso de sintonización basado en el método Ziegler-Nichols, pero también se puede usar alguna variante como el método Cohen y Coon [4] el cual tomaría en cuenta el proceso de autorregulado en el controlador PID. La alta variabilidad de las condiciones de consigna hacen imposible la aplicación de sistemas autorregulados debido a que estos últimos funcionan adecuadamente cuando las variaciones de la consigna no son muy elevadas, condiciones muy alejadas del uso que se pretende dar a esta cámara climática. Además, se puede llegar a trabajar las respuesta de la cámara, fusionando las técnicas de deshielo con el estudio realizado por Jiangjiang Wang y Youjin Jing [5], donde se considera el control del sistema HVAC como un modelado no lineal y de incertidumbre. También replicar experimentos donde comparan el desempeño de lógica difusa, el convencional controlador PID de proveedores, y el PID autorregulado. Es posible comparar la respuesta

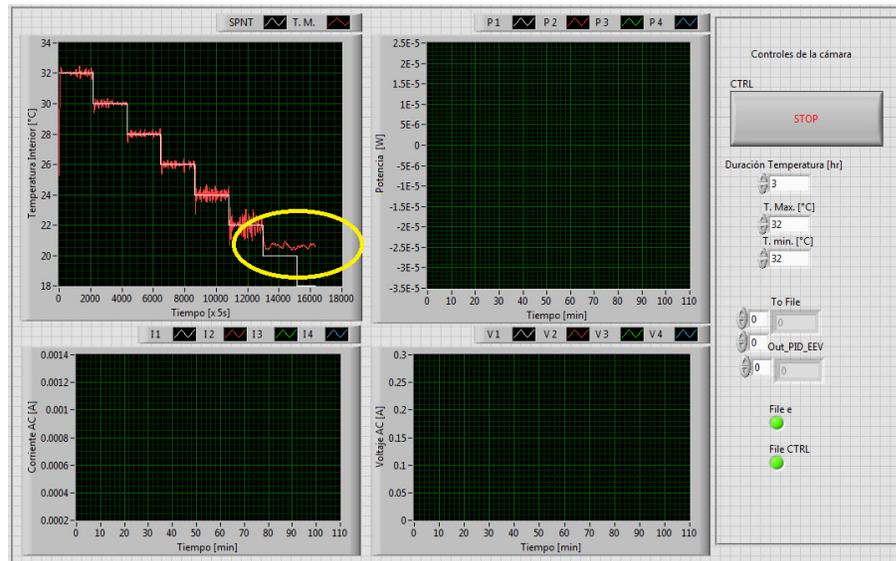


Figura 3.8: Interfaz de usuario implementada para los refrigeradores Chillerators

de los controladores en cambios de temperatura del aire de alimentación en estado estable o dinámico [6].

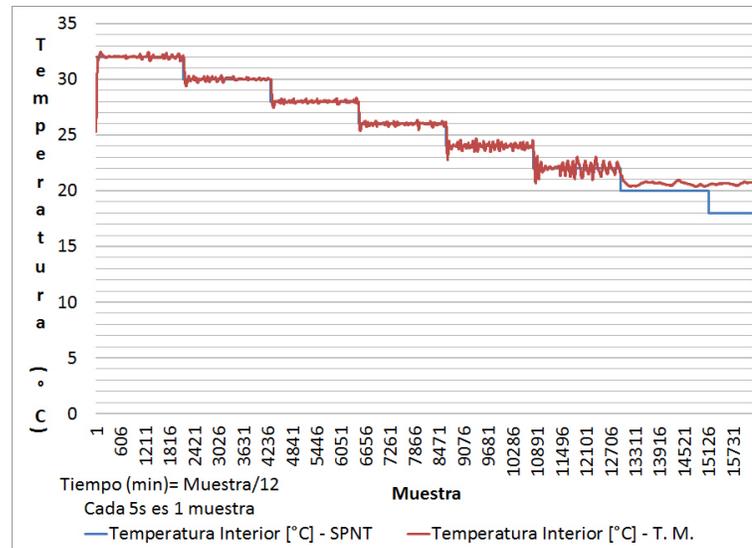


Figura 3.9: Proyección del comportamiento en la temperatura, de la interfaz de usuario

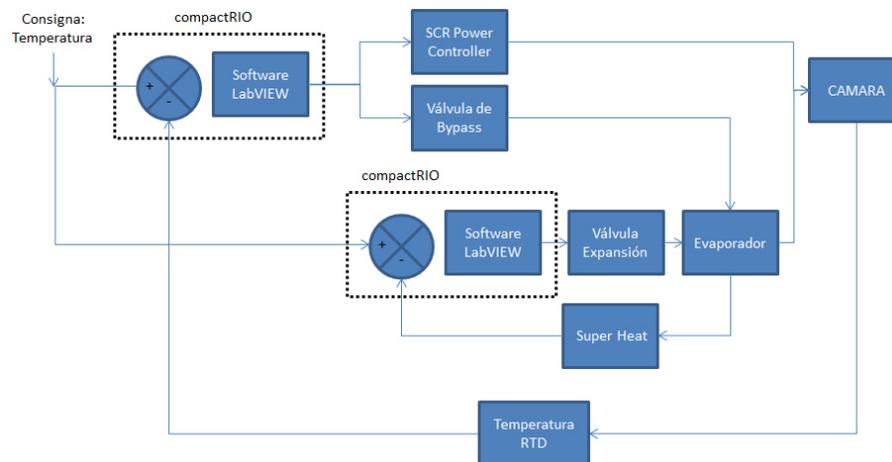


Figura 3.10: Diagrama actual del sistema de control del recinto

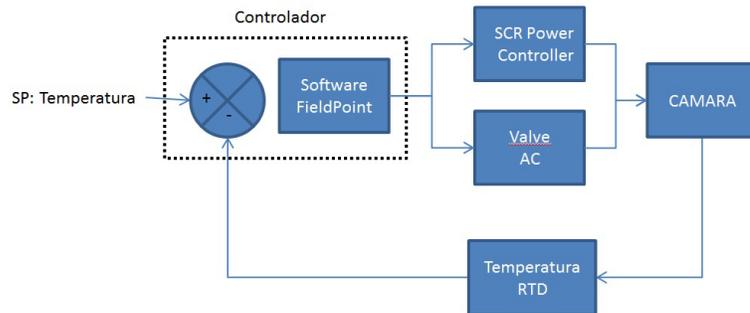


Figura 3.11: Diagrama actual del sistema de control de la cámara de bajo costo

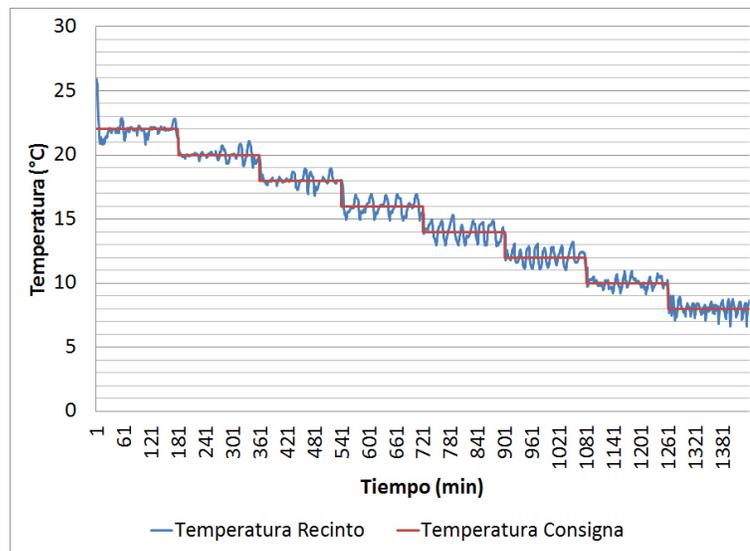


Figura 3.12: Trayectoria de temperatura controlada, dentro de la cámara climática

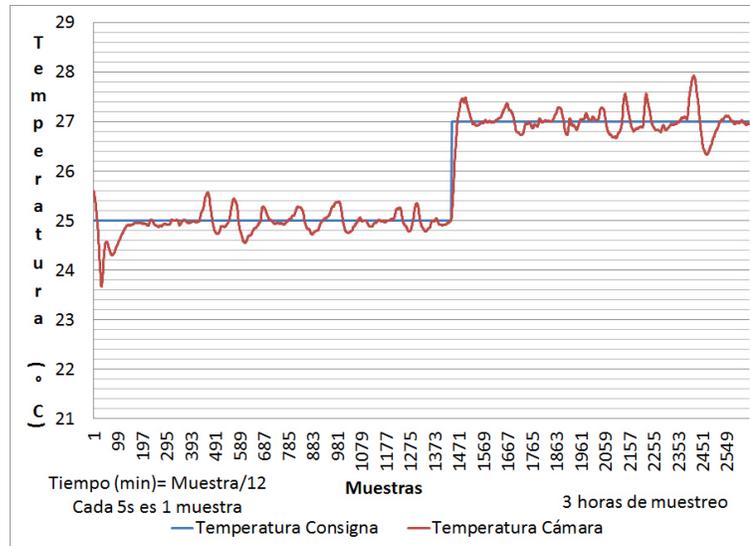


Figura 3.13: Acercamiento en la trayectoria de temperatura dentro de la cámara climática

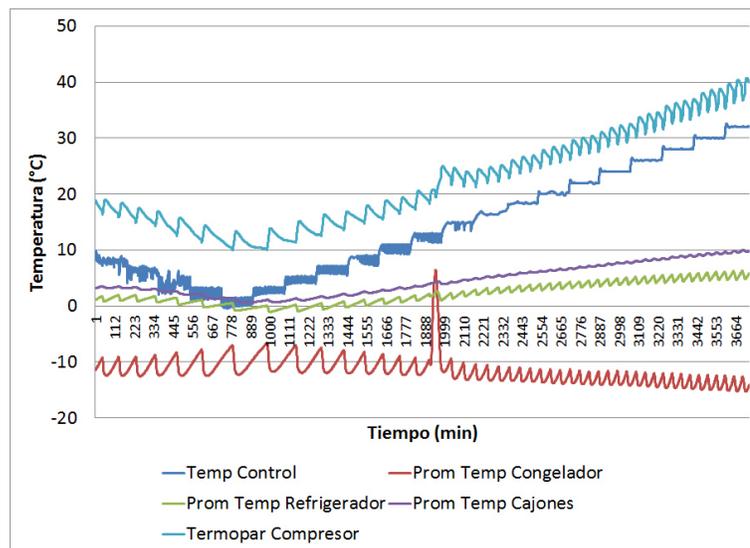


Figura 3.14: Recopilación de temperaturas en los refrigeradores

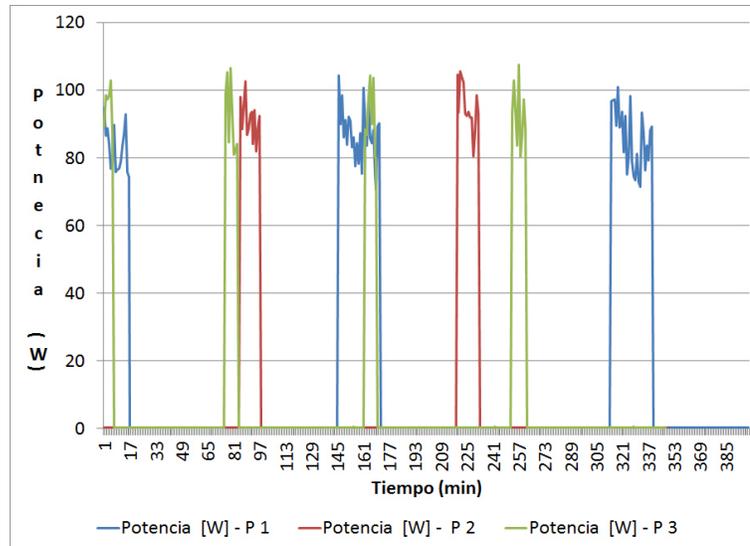


Figura 3.15: Acercamiento en la recopilación de datos energéticos

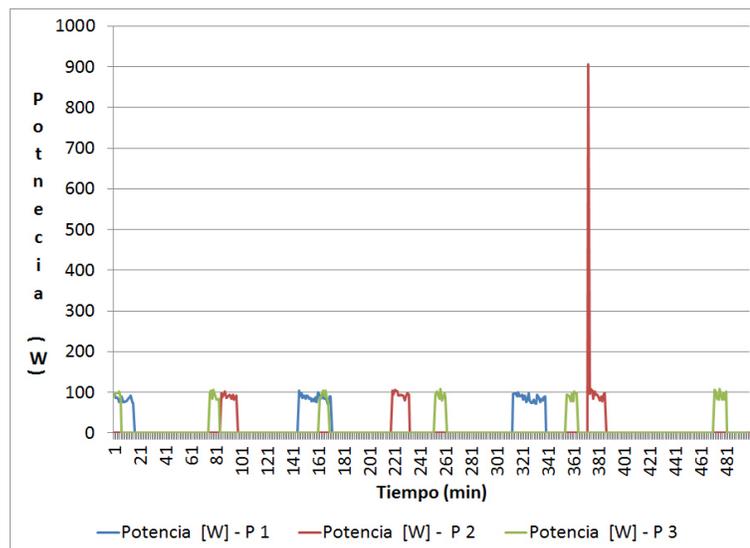


Figura 3.16: Picos en la recopilación de datos energéticos

Capítulo 4

Conclusiones

El objetivo general que es la implementación de un sistema de control de alta precisión (variación de ± 0.5 °C, ver figura 3.3) para la cámara de clima controlado se alcanzó. La cámara de clima controlado construida en la FIME supera ampliamente las capacidades de la cámara de bajo costo realizada en las instalaciones del CETEC de Whirlpool. Las capacidades superadas son:

- Precisión en la temperatura del recinto.
- Ampliación de rango en temperatura.
- Preparación para el sistema de humidificación.

Los sistemas de control con los que fueron equipados originalmente de fábrica los equipos de refrigeración que se emplean en la cámara climática empleaban controladores lógicos programables (PLC) que fueron sustituidos por controladores de automatización programables (PAC) de National Instruments. Con este cambio fue posible desarrollar aplicaciones personalizadas en relación al control del sistema de refrigeración, además de aumentar la precisión del sistema mediante aplicaciones desarrolladas en LabVIEW.

En su versión actual, la cámara permite controlar de manera estable la temperatura en el interior en un rango de -2 a 50 °C. Esta cámara está provista con el equipamiento necesario para operar con un límite inferior de -30 °C. Es posible, mediante el uso de librerías e instrumentos virtuales (VI) desarrollados durante este trabajo, la implementación de algoritmos de control de distinta naturaleza. Por mencionar algunos, es factible mantener la temperatura inte-

rior de la cámara en un valor constante durante largos periodos de tiempo (días o semanas) o variaciones dinámicas de temperatura en las que la consigna de temperatura en el interior cambia cada cierto tiempo. Los ciclos y circuitos de refrigeración, y calefacción están enlazados en un solo programa. La humidificación está en etapa de preparación, al igual que la operación con los sistemas de baja temperatura que permitirán alcanzar temperaturas de hasta -30°C . El programa desarrollado contiene todas las restricciones termodinámicas, eléctricas y algoritmos mejorados. En la sección de trabajo futuro, se exponen las labores futuras que se sugieren realizar para tener una mejor herramienta de trabajo en investigación. El sistema de control implementado como se explica en la sección de trabajo futuro, requiere más labor de programación, así como ensayos para corroborar las mejoras.

La estrategia de control empleada en esta investigación consiste en el uso de dos controladores proporcional integral derivativo (PID), uno de ellos dedicado exclusivamente al control del sistema de refrigeración cuidando la integridad del mismo al perseguir un factor de sobrecalentamiento fijo de 10°C por defecto, aunque otro valor puede ser asignado por el usuario hasta un máximo de 90°C . El segundo controlador PID se emplea para ajustar de manera precisa la temperatura en el interior de la cámara en la etapa de calefacción o enfriamiento. Para poder hacer frente al extenso rango de temperaturas de uso, los controladores PID y en especial el de precisión, se han implementado distintos parámetros de sintonizado. La estrategia consistió en dividir el rango de temperaturas de operación en grupos de manera que existen cinco combinaciones para los factores del control PID.

Se ha dotado además a la cámara con la capacidad de adquisición de datos de variables eléctricas de alto detalle empleando herramientas de programación de LabVIEW, de modo que se pueden medir consumos energéticos de aparatos eléctricos en cuatro estaciones distintas. El programa de adquisición de datos de variables eléctricas permite medir el consumo eléctrico, factor de potencia, armónicos, potencias aparente y reactiva, entre otros. Además, permite al sistema de adquisición de datos registrar la información generada a partir del uso de termopares tipo T en cuatro estaciones diferentes con capa-

cidad de hasta 24 sensores cada una. El algoritmo de adquisición de datos de variables eléctricas y temperatura se encuentra integrado en la aplicación de control de la cámara, y al igual que éste, es susceptible de ser modificado con base a las necesidades del usuario. El sistema de control implementado puede mejorarse, debido a las variaciones que hay entre la señal consigna y la real. El proceso de implementación se ha culminado satisfactoriamente gracias al gran esfuerzo del grupo.

4.1. Trabajo Futuro

En ésta ultima sección se plantearán las actividades por realizar en la cámara de clima controlado. Las actividades a realizar se desarrollarán con apoyo del grupo de trabajo. Las actividades son las siguientes:

- **Optimizar las etapas de temperatura en media temperatura. (Etapas 32-20, 20-12, 12-4, 4-0).**

Actualmente las etapas de programación son: mayores a 22 °C, entre 22 y 16 °C, entre 16 y 8°C, y finalmente de 8 a 0 °C. Utilizando métodos de programación, optimización y estadísticos, la cámara climática puede prolongar su estabilidad y precisión en la temperatura del recinto.

- **Uso de las válvulas de presión**

Actualmente el sistema de refrigeración utiliza las válvulas de expansión electrónica, y By-pass de gas caliente. La implementación de las válvulas de presión abre un panorama más versátil en el control del sistema de refrigeración. Controlando la presión en el evaporador podremos obtener un manejo diferente en la sintonización y la temperatura tendrá una mejor precisión con menos oscilaciones.

- **Implementación y puesta en operación del sistema de baja temperatura (-30 °C).**

Actualmente el rango de operación de la cámara climática se encuentra entre los 50 y 0 °C. El sistema de baja temperatura amplía el rango de temperatura de la cámara climática, dando la capacidad de evaluar en situaciones por debajo de 0 °C. Con la ventaja de abrir la posibilidades de

ensayos a más prototipos de usos múltiples.

- **Implementación y puesta en operación del sistema de control de humedad.**

Actualmente la cámara está constituido por los sistemas de adquisición de datos, refrigeración y calefacción. El sistema de humidificación se tiene preparado solamente por programación. Se tiene pendiente la instalación de los componentes físicos. Se requiere la implementación para tener la capacidad de generar vapor en el recinto. La humedad no entra como factor determinante en la norma mexicana, pero también afecta el desempeño de los dispositivos térmicos.

Bibliografía

- [1] **Adrian Martín Cobos, Santos Méndez Díaz, Hugo Ramírez Hernández, Simon Martínez Martínez, Fausto Sánchez Cruz,** *Cámara climática de bajo costo para evaluación de refrigeradores SOMIM, (2013)*
- [2] **García Yera Miguel, et. al.,** *Diseño de un conducto de aire para cámara climática mediante CFD XVI congreso internacional anual de la sociedad de Ingeniería Mecánica, Monterrey, Nuevo León 22-24 de septiembre, 2010.*
- [3] **Ziegler, J.B. y N.B. Nichols,** *Optimum Settings for Automatic Controls, ASME Transactions (EUA), Vol. 64 pág. 759-768, 1942*
- [4] **Cohen, G.H. y G.A. Coon,** *theoretical Consideration of Retarded Control*
- [5] **Jiangjiang Wang y Youjin Jing,** *Study of Neuron Adaptive PID Controller in a single-zone HVAC system, North China Electric Power University.*
- [6] **Rahul L. Navalea, Ron M. Nelson,** *Use of genetic algorithms and evolutionary strategies to develop an adaptive fuzzy logic controller for a cooling coil – Comparison of the AFLC with a standard PID controller*
- [7] **Xiaohong Yin, Wenjian Cai, Shaoyuan Li, and Xudong Ding,** *Control Structure Selection for Vapor Compression Refrigeration Cycle*
- [8] **Alexandre Tizzei; Carlos R. Meneghetti; Nelson L. Cappelli; Claudio K. Umezu,** *System for studies of control strategies applied in the refrigerated chambers*
- [9] **Alessandro Beghia, Luca Cecchinatob, Mirco Rampazzoa,** *On-line, auto-tuning control of Electronic Expansion Valves*

-
- [10] **G.L. Wedekind, W.F. Stoecker**, *Transient response of the mixture-vapor transition point in horizontal evaporating flow*, 1996
- [11] **H. Yasuda, S. Touber, C.H.M. Machielsen**, *Simulation model of a vapor compression refrigeration system*, 1983
- [12] **Z.R. Huelle**, *The MSS line-a new approach to hunting problem*, 1967
- [13] **Huelle, ZR.**, *Heat load influence upon evaporator parameters*, 1967
- [14] **W.D. Gruhle, H. Isermann**, *Modeling and control of a refrigerant evaporator*, 1995
- [15] **Dhar, M., Soedel, W.**, *Transient analysis of vapor compression refrigeration system: part I, mathematical model and part II, computer simulation*, 1979
- [16] **K. Higuchi, M. Hayano**, *Dynamic characteristics of thermostatic expansion valves*, 1982
- [17] **P.M.T. Broersen**, *Control with a thermostatic expansion valve*, 1982
- [18] **P. Mithraratne, N.E. Wijesundera, T.Y. Bong**, *Dynamic simulation of a thermostatically controlled counter-flow evaporator*, 200
- [19] **Orhan Ekrena, Savas Sahinb, Yalcin Islerc**, *Comparison of different controllers for variable speed compressor and electronic expansion valve*
- [20] **C. Aprea, C. Renno**, *Experimental modelling of variable speed system*, 2009
- [21] **K. Astrom, T. Hagglund**, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, 1995
- [22] **O. Katsuhiko**, *Modern Control Engineering*, 2002
- [23] **C. Aprea, R. Mastrullo, C. Renno**, *Determination of the optimal working of compressor*, 2009
- [24] **H. Nasutin, M.N.W. Hassan**, *Potential electricity savings by variable speed control of compressor for air conditioning systems*, 2006
- [25] **C. Aprea, R. Mastrullo, C. Renno**, *Experimental analysis of the scroll compressor performances varying its speed*, 2006
- [26] **C. Aprea, R. Mastrullo, C. Renno**, *Performance of thermostatic and electronic expansion valves controlling the compressor*, 2006

-
- [27] **K.S. Narendra, K. Parthasarathy**, *Identification and control of dynamical systems using neural networks*, 1990
- [28] **Narendra, K.S.**, *Hierarchical neural network models for identification and control*, 1993
- [29] **C. Aprea, R. Mastrullo, C. Renno**, *Fuzzy control of the compressor speed in a refrigeration plant*, 2004
- [30] **T.J. Ross**, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, 2004
- [31] **Y.J. Ding, G.Y. Ma, Q.H. Chai**, *Experiment investigation of reverse cycle defrosting methods on air source heat pump with TXV as the throttle regulator*, *Int J Refrig*, 27 (2004), pp. 671–678
- [32] **J.S. Byun, C.D. Jeon, J.H. Jung, J. Lee** *The application of photo-coupler for frost detecting in an air-source heat pump*, *Int J Refrig*, 29 (2006), pp. 191–198
- [33] **X.D. He, S. Liu, H.H. Asada** *Modeling of vapor compression cycles for multi variable feedback control of HVAC systems*, *ASMEJ J Dyn Syst Meas Control*, 119 (1997), pp. 183–191
- [34] **C. Aprea, R. Mastrullo** *Experimental evaluation of electronic and thermostatic expansion valves performances using R22 and R407C*, *Appl Therm Eng*, 22 (2002), pp. 205–218
- [35] **J.M. Choi, Y.C. Kim** *The effects of improper refrigerant charge on the performance of a heat pump with an electronic expansion valve and capillary tube*, *Energy*, 27 (2002), pp. 391–401
- [36] **X.Q. Li, J.P. Chen, Z.J. Chen, W.H. Liu, W. Hu, X.B. Liu** *A new method for controlling refrigerant flow in auto mobile air conditioning*, *Appl Therm Eng*, 24 (2004), pp. 1073–1085
- [37] **W. Chen, X.X. Zhou, S.M. Deng**, *Development of control method and dynamic model for multi-evaporator air conditioners (MEAC)*, *Energy Convers Manage*, 46 (2005), pp. 451–465
- [38] **Y.M. Chen, S.M. Deng, X.G. Xu, M.Y. Chan** *A study on the operational stability of a refrigeration system having a variable speed compressor*, *Int J Refrig*, 31 (2008), pp. 1368–1374

- [39] **Y. Yao, Y.Q. Jiang, S.M. Deng, Z.L. Ma** *A study on the performance of the airside heat exchanger under frosting in air source heat pump water heater/chiller unit, Int J Refrig, 47 (2004), pp. 3745–3756*
- [40] **K.I. Krakow, L. Yan, S. Lin,** *An idealized model of reversed-cycle hot gas defrosting of evaporators. Part 1: theory, ASHRAE Trans, 99 (1993), pp. 317–328*
- [41] **D.L. O’Neal, K. Peterson, N.K. Anand** *Effect of short-tube orifice size on the performance of an air source heat pump during the reverse-cycle defrost, Int J Refrig, 14 (1991), pp. 52–57*