

**DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA Y
HUMEDAD DEL LABORATORIO DE METROLOGÍA DEL CDT DE GAS,
UBICADO EN EL MUNICIPIO DE PIEDECUESTA, SANTANDER Y
DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PARA LA SINTONIZACIÓN DE UN
SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA**

IVÁN RAÚL GONZÁLEZ BARAJAS

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA**

2018

**DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA Y
HUMEDAD DEL LABORATORIO DE METROLOGÍA DEL CDT DE GAS,
UBICADO EN EL MUNICIPIO DE PIEDECUESTA, SANTANDER Y
DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PARA LA SINTONIZACIÓN DE UN
SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA**

IVÁN RAÚL GONZÁLEZ BARAJAS

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero electrónico

Director del Proyecto

JUAN CARLOS VILLAMIZAR

Ingeniero Electricista
Magister en Potencia Eléctrica

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRÓNICA

BUCARAMANGA

2018

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
1. OBJETIVOS	11
1.2 Objetivo General.....	11
1.3 Objetivos Específicos.....	11
2. MARCO TEÓRICO	12
2.1 Metrología.....	12
2.1.1 Metrología Industrial	12
2.1.2 Laboratorio de Metrología	12
2.2 Humedad.....	13
2.2.1 Humedad Relativa.....	14
2.3 Temperatura.....	14
2.4 NORMA ISO/IEC 17025:2005: REQUISITOS GENERALES PARA LA COMPETENCIA DE LOS LABORATORIOS DE ENSAYO Y CALIBRACIÓN.....	14
2.4.1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN DE LA NORMA ISO/IEC 17025:2005.	15
2.5 SISTEMA HVAC	15
2.5.1 SISTEMA HVAC SEGÚN EL FLUIDO	15
2.6 TIPOS DE SISTEMAS HVAC SEGÚN LA DISTRIBUCIÓN.....	16
2.6.1 SISTEMA CENTRALIZADO	16
2.6.2 SISTEMA DESCENTRALIZADO	16
2.7 REFRIGERACIÓN.....	17
2.7.1 TIPOS DE REFRIGERACIÓN	17
2.8 SISTEMAS DE CONTROL	19
2.8.1 SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO ABIERTO	19
2.8.2 SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO CERRADO	20
2.9 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS.....	22
2.10 SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR	22
2.11 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC).....	23
2.11.1 PLC SIEMENS S7-1200	25
2.12 REGULACIÓN PROPORCIONAL PWM	25
2.12.1 TIEMPO DE RESPUESTA.....	26

2.12.2 MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO (PWM)	26
2.13. HERRAMIENTA DE REGULACION PID DEL SIMATIC S7-1200	27
2.14. SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD	27
3. DISEÑO METODOLÓGICO	29
3.1 Reconocimiento del funcionamiento del sistema de control de temperatura y humedad.....	29
3.2 Determinación del estado de funcionamiento del sistema de control de temperatura y humedad.....	29
3.3 Desarrollo de la metodología para la sintonización de un sistema de control de temperatura, adaptando un mini refrigerador para que sea controlado con el PLC SIEMENS S7-1200, y emular así, el control utilizado en el laboratorio del CDT.....	29
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	31
4.1 Reconocimiento del funcionamiento del sistema de control de temperatura y humedad del laboratorio del CDT de Gas.....	31
4.2 Determinación del estado de funcionamiento de los elementos que conforman el sistema.....	33
4.3 Sintonización de un sistema de control de temperatura adaptando un mini refrigerador	36
4.3.1 Selección del hardware	36
4.3.2 Acondicionamiento de señal	37
4.3.3 Programación del SIMATIC S7-1200	41
4.3.4 Caracterización del sistema	43
5. CONCLUSIONES	49
6. BIBLIOGRAFÍA.....	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema centralizado	16
Figura 2: Sistema semicentralizado	17
Figura 3: Circuito de refrigeración	18
Figura 4: Sistema de control en lazo abierto	19
Figura 5: Sistema de Control de lazo cerrado	20
Figura 6: Control ON/OFF	21
Figura 7: Diagrama de Control PID	22
Figura 8: Estructura básica de un PLC	24
Figura 9: PLC SIEMENS S7-1200.....	25
Figura 10: Sensor DHT22	28
Figura 11: Diagrama de conexiones PLC	30
Figura 12: Conexión PC-PLC.....	31
Figura 13: Bosquejo circuito de control.....	32
Figura 14: Bosquejo circuito de potencia	33
Figura 15: inspección visual a los equipos HVAC en compañía de expertos	34
Figura 16: Controlador de Humedad Relativa Honeywell.....	36
Figura 17; Refrigerador termoeléctrico utilizado	37
Figura 18: Adaptación del relé a la celda Peltier.....	38
Figura 19: Filtro activo pasa-bajas.....	39
Figura 20: Tarjeta de acondicionamiento de señal.....	40
Figura 21: Lectura y conversión D/A de la lectura del sensor	41
Figura 22: Normalizado y escalado de señales analógicas	42
Figura 23: Objeto Tecnológico PID_Compact.....	42
Figura 24: Curva de enfriamiento del mini refrigerador.....	43
Figura 25: Entrada y salida del sistema a identificar	44
Figura 26: Identificación de la planta	44
Figura 27: Sistema en lazo abierto y lazo cerrado.....	45
Figura 28: Respuesta de la planta en lazo abierto y lazo cerrado	46
Figura 29: Parámetros PI y respuesta de la planta	46
Figura 30: Ventana de configuración de parámetros	48
Figura 31: Respuesta de la planta.....	48

AGRADECIMIENTOS

A Dios, sin Él nada de esto sería posible.

A mis padres Ramiro y Delfina, quienes me apoyaron todo el tiempo.

A mi hermana Leidy Judith, por el aporte de su experiencia en la redacción del documento.

A mis profesores de la facultad de Ingeniería Electrónica, por su amistad, sus enseñanzas y por creer en mí.

A mis compañeras y compañeros, por los momentos compartidos.

Al ingeniero Alex Monclou, por siempre impulsar el desarrollo de nuestra formación profesional.

A los administrativos, ingenieros y técnicos del Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas (CDT de Gas), por abrirme las puertas de sus instalaciones y brindarme su apoyo para el desarrollo de la primera fase del proyecto.

Al auxiliar de laboratorio Luis Peña, por el aporte de su conocimiento, tiempo y experiencia en el trabajo con PLC's y sistemas de refrigeración.

Al Ingeniero Javier Villamizar y su empresa de climatización DYNATEK por la asesoría prestada.

Al Ingeniero Juan Carlos Villamizar, por su compromiso con la dirección del proyecto.

Y a todas aquellas personas que participaron directa o indirectamente en el desarrollo del proyecto. ¡muchas gracias!

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL LABORATORIO DE METEOROLOGÍA DEL CDT DE GAS, UBICADO EN EL MUNICIPIO DE PIEDECUESTA, SANTANDER Y DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PARA LA SINTONIZACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA

AUTOR(ES): Iván Raúl González Barajas

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): Juan Carlos Villamizar

RESUMEN

El presente proyecto se desarrolló en una primera etapa, en las instalaciones del CDT de gas, ubicado en el municipio de Piedecuesta, Santander, en donde se realizó un diagnóstico del sistema de control de condiciones ambientales, iniciando con el reconocimiento del funcionamiento del sistema, estableciendo, para ello, la conexión con el PLC; luego, con la ayuda de un experto en el área, se determinó el estado actual de funcionamiento del sistema concluyéndose que no era viable la optimización de los equipos, dado que éstos han estado en funcionamiento durante un periodo aproximado de 23 años, cuando su vida útil es de 12 años en promedio. Además, se evidenció que el laboratorio no cuenta con dispositivos de control de humedad relativa. En una segunda etapa, y como complemento, se desarrolló en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Pontificia Bolivariana, la metodología para la sintonización de un sistema de control PID de temperatura, usando un mini refrigerador de celda de Peltier el cual se implementó en un PLC de Siemens SIMATIC S7-1200 de SIEMENS, logrando un buen control de temperatura.

PALABRAS CLAVE:

Laboratorio de Meteorología, Controlador PID, Efecto Peltier, PLC, Sistema HVAC

Vº Bº DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DIAGNOSIS OF THE TEMPERATURE AND HUMIDITY CONTROL SYSTEM OF THE GAS CDT METROLOGY LABORATORY, LOCATED IN THE MUNICIPALITY OF PIEDECUESTA, SANTANDER AND DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY FOR THE TUNING OF A TEMPERATURE CONTROL SYSTEM

AUTHOR(S): Iván Raúl González Barajas

FACULTY: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR: Juan Carlos Villamizar

ABSTRACT

The present project was developed in a first stage, in the facilities of the gas CDT, located in the municipality of Piedecuesta, Santander, where a diagnosis of the environmental conditions control system was carried out, starting with the recognition of the system's operation, establishing, for this purpose, the connection with the PLC; Then, with the help of an expert in the field, the current state of operation of the system was determined and it was concluded that the optimization of the equipment was not feasible, given that it has been in operation for approximately 23 years, when its useful life is 12 years on average. In addition, it was found that the laboratory has no relative humidity control devices. In a second stage, and as a complement, the methodology for the tuning of a PID temperature control system was found in the laboratory of Electrical Machines of the Universidad Pontificia Bolivariana, using a Peltier cell mini cooler, which was implemented in a Siemens SIMATIC S7-1200 PLC from SIEMENS, achieving good temperature control.

KEYWORDS:

Metrology Laboratory, PID Controller, Peltier Effect, PLC, HVAC Sys

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo, el sector industrial ha ido evolucionando buscando realizar mejoras que contribuyan a incrementar la competitividad de las empresas, es por esta razón, que surge la necesidad de crear métodos que unifiquen los procesos y que den cumplimiento a los estándares internacionales que exigen las distintas normas; de aquí el interés de tener laboratorios de metrología, que cuenten con condiciones ambientales controladas y normalizadas, para garantizar que no hayan influencias extrañas que afecten la respuesta de las medidas tomadas a la hora de realizar un prueba, o la actividad que se esté desarrollando. Lo anterior garantiza poder repetir este mismo proceso en cualquier otro laboratorio y obtener el mismo resultado¹.

Los laboratorios de metrología de patrones primarios, como el Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas, CDT de Gas. funcionan bajo la norma ISO/IEC 17025 *“Requisitos Generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración”*, y es necesario que se garanticen, entre otros factores, las condiciones mínimas de temperatura y humedad relativa que permitan la estabilidad de los equipos y aseguren el cumplimiento en la ejecución de las diversas normas de ensayo.

Por lo anteriormente expuesto, el presente proyecto propone realizar un diagnóstico que permita conocer el estado actual de los equipos de aire acondicionado del laboratorio de metrología de patrones primarios del CDT de Gas y, de esta manera, garantizar que sea factible la optimización de su sistema de control de condiciones ambientales.

Además, se busca desarrollar una metodología para la sintonización un sistema de control de temperatura, usando un mini refrigerador que ha sido adaptado para emular la temperatura a la que funciona un laboratorio de metrología (20°C), previendo que, en un futuro, cuando se mejoren las condiciones actuales de los equipos del CDT, dicha metodología pueda ser implementada en el proceso de programación del PLC del que se disponga.

¹ CONTRERAS, Edgar; GARCÍA, Eduardo. “Diseño y construcción de un laboratorio básico de metrología dimensional como apoyo de la asignatura máquinas térmicas alternativas”. Proyecto de grado para optar el título de ingeniero mecánico. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. 2010. p. 21

1. OBJETIVOS

1.2 Objetivo General

Diagnosticar el sistema de control de condiciones ambientales del laboratorio de metrología del CDT de gas, simular las condiciones de operación del laboratorio y desarrollar una metodología para la sintonización de un controlador de temperatura y humedad.

1.3 Objetivos Específicos

- Reconocer el funcionamiento del sistema de control de temperatura y humedad haciendo uso del software FPWin GR.
- Determinar el estado de funcionamiento de los elementos que conforman el sistema de control de temperatura y humedad del laboratorio del CDT.
- Desarrollar la metodología para la sintonización de un sistema de control de temperatura, adaptando un mini refrigerador para que sea controlado con el PLC SIMATIC S7-1200 de SIEMENS, y emular así, el control utilizado en el laboratorio del CDT.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Metrología

La metrología es la ciencia de la medición. Su objetivo principal es garantizar la confiabilidad de las mediciones.

La metrología es una ciencia en constante evolución y desarrollo; muchos de los progresos tecnológicos de la actualidad se dan gracias al avance de esta ciencia.

La metrología puede dividirse en metrología legal, metrología científica y metrología industrial² siendo esta última la requerida para la elaboración de este proyecto.

2.1.1 Metrología Industrial

La función de la metrología industrial reside en la calibración, control y mantenimiento adecuados de todos los equipos de medición empleados en producción, inspección y pruebas. Esto con la finalidad, de que se pueda garantizar que los productos están de conformidad con las normas. El equipo se controla con frecuencias establecidas y de forma que se conozca la incertidumbre de las mediciones. La calibración debe hacerse contra equipos certificados, con una relación conocida por medio de patrones, por ejemplo, los patrones nacionales de referencia³.

2.1.2 Laboratorio de Metrología

Un laboratorio de metrología es un lugar que cuenta con la infraestructura y equipos necesarios para ofrecer servicios de calibración, medición y pruebas necesarias en la industria en general. Los laboratorios acreditados en Colombia deben cumplir con las características exigidas por la norma ISO/IEC 17025.

Estos laboratorios pueden ofrecer servicios en las magnitudes de:

² RODRIGUEZ, Luis. Metrología: Conceptos y Mediciones. Pontifica Universidad Javeriana. Cali. 2001. p.1

³ MARBÁN, Rocío. PELLECE, Julio. Metrología para no metrologos. Organización de los Estados Americanos OEA. Sistema Interamericano de Metrología. Segunda edición. Guatemala 2002. p. 20.

- **Dimensional:** Micrómetros, medidores universales, reglas, cintas métricas, indicadores.
- **Masa:** balanzas, masas patrón.
- **Temperatura:** Termómetros (líquido en vidrio, industriales), hornos, baños termostáticos, RTD'S, Termopares.
- **Presión:** Calibración de manómetros y transductores.
- **Flujo:** Calibración de medidores de diversos tipos: turbina, Coriolis, desplazamiento positivo, totalizadores, probadores bidireccionales, etc.
- Patines de medición portátiles para calibrar en sitio, con el fin de mantener un nivel metrológico adecuado en las instalaciones de los clientes, sin necesidad de realizar movimientos.
- **Volumen:** Recipientes volumétricos patrón, recipientes de trabajo, cristalería y tanques.
- **Eléctrica:** Calibración en tensión y corriente eléctrica continua y alterna; resistencia eléctrica; potencia eléctrica continua y alterna; simulación eléctrica de temperatura, medidores y fuentes de voltaje, medidores y fuentes de corriente, medidores y dispositivos de resistencia, simuladores de temperatura y presión.
- **Fuerza:** Calibración de instrumentos de medición de fuerza a tracción o compresión por comparación directa, usando masas⁴.

Es fundamental asegurar las condiciones ambientales del laboratorio, éstas deben estar controladas y normalizadas para garantizar que no haya influencias extrañas que afecten la respuesta a la hora de realizar una investigación, o la actividad que se esté desarrollando y así, poder repetir este mismo proceso en cualquier otro laboratorio y obtener el mismo resultado, llamado normalización.

2.2 Humedad

Se define la humedad como la cantidad de vapor de agua que contiene el aire⁵. Para medir la humedad se utilizan varios índices: Humedad absoluta, humedad específica, entre otros. La medida que se debe tener en cuenta en un laboratorio de metrología es el índice de humedad relativa⁶.

⁴ LABORATORIO DE METROLOGÍA, CIATEQ, Disponible en <http://www.ciateq.mx/servicios-de-laboratorios/51-laboratorio-de-metrologia.html> [Citado en 21 de abril de 2018]

⁵ ZÚÑIGA, Ignacio; LÓPEZ. Meteorología y climatología. Editorial UNED. p.76

⁶ CONTRERAS, Edgar; GARCÍA, Eduard. "Diseño y construcción de un laboratorio básico de metrología dimensional como apoyo de la asignatura máquinas térmicas alternativas". Proyecto de grado para optar el

2.2.1 Humedad Relativa

Es el cociente, entre la masa de vapor de agua contenido en un volumen dado de aire y la masa de vapor de agua que contendría ese mismo volumen si estuviera saturado, ésta se debe expresar en porcentaje. Cuando la humedad relativa es igual al 100% se dice que el aire está saturado⁷. En el laboratorio es recomendable que esté por encima del 50%, para evitar la aceleración de la oxidación de los instrumentos.

2.3 Temperatura

Según el libro Termodinámica de Kurt C. Rolle⁸, la temperatura es la propiedad que describe que tan caliente está un sistema. Mientras mayor sea la temperatura, la sustancia estará más caliente, y mientras menor sea la temperatura, la sustancia estará menos caliente o más fría.

2.4 NORMA ISO/IEC 17025:2005: REQUISITOS GENERALES PARA LA COMPETENCIA DE LOS LABORATORIOS DE ENSAYO Y CALIBRACIÓN

La norma ISO/IEC 17025:2005 establece y determina los requerimientos generales para que los laboratorios de ensayo y calibración demuestren que:

- ✓ Poseen un sistema de calidad.
- ✓ Son técnicamente competentes
- ✓ Capaces de generar resultados técnicamente válidos.

La Norma ISO 17025 no contempla el cumplimiento de requisitos regulatorios y de seguridad relacionados con el funcionamiento del laboratorio⁹.

título de ingeniero mecánico. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. 2010. p.23

⁷ Ibid., p.80

⁸ ROLLE, Kurt. Termodinámica. Sexta edición. México. Pearson Prentice Hall. 2006. P. 71

⁹ ISO/IEC 17025:2005. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración. Disponible en: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:17025:ed-2:v1:es>> [Citado en 5 de abril de 2017]

2.4.1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN DE LA NORMA ISO/IEC 17025:2005

Esta norma especifica los requisitos generales de competencias para llevar a cabo ensayos y/o calibraciones, incluyendo el muestreo. Cubre la ejecución de ensayo y calibración empleando métodos normalizados, métodos no normalizados y métodos desarrollados por el laboratorio.

Es aplicable a todas las organizaciones que realizan ensayos y/o calibraciones. Éstas incluyen, por ejemplo, los laboratorios de primera, segunda y tercera parte, y los laboratorios donde el ensayo y/o la calibración hacen parte de la inspección y certificación del producto. Es aplicable a todos los laboratorios, independientemente de la cantidad de personal o la extensión del alcance de los ensayos¹⁰.

2.5 SISTEMA HVAC

Un sistema HVAC (HVAC, por sus siglas en inglés de Heating, Ventilating and Air Conditioning) es un sistema de ventilación, calefacción y aire acondicionado. Se trata de un conjunto de métodos y técnicas que estudian y trabajan sobre el tratamiento del aire en cuanto a su enfriamiento, calentamiento, deshumidificación, calidad, movimiento, entre otras variables.

La finalidad de un sistema HVAC, es proporcionar una corriente de aire, calefacción y enfriamiento adecuado a cada área; manteniendo de forma fiable los valores requeridos de temperatura, humedad del aire y calidad del aire, con independencia de las fluctuaciones en el ambiente (zonas adyacentes, exteriores)¹¹.

2.5.1 SISTEMA HVAC SEGÚN EL FLUIDO

2.5.1.1 SISTEMA TODO AIRE

¹⁰ ISO/IEC 17025:2005. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración. Disponible en: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:17025:ed-2:v1:es>> [Citado en 5 de abril de 2017]

¹¹ Ingeniería & Energías Renovables. Seiter srl. Disponible en <<http://es.seitersrl.com/soluciones-servicios:sistemas-hvac-heating-ventilation-air-conditioning>> [Citado en 5 de abril de 2017]

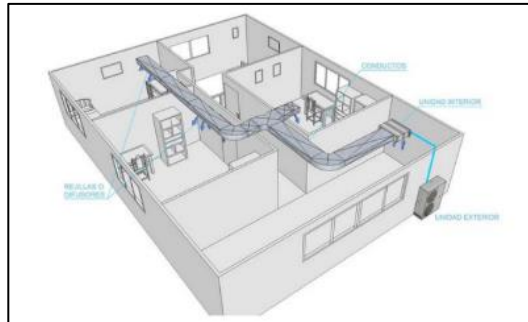
Se trata de instalaciones que emplean únicamente un caudal de aire frío o caliente para conseguir las condiciones deseadas en el área a climatizar. Se utilizan equipos de expansión directa como roof-top, compactos verticales u horizontales, equipos partidos o climatizadores con baterías de agua¹².

2.6 TIPOS DE SISTEMAS HVAC SEGÚN LA DISTRIBUCIÓN

2.6.1 SISTEMA CENTRALIZADO

Se utiliza una central donde se enfría o calienta el aire o el agua que posteriormente se distribuye a las distintas áreas que se desean climatizar (figura 1). Solo se cuenta con un mando para todas las habitaciones, por lo que todas estarán a la misma temperatura que se fije en el termostato principal generando un gasto excesivo de energía¹³.

Figura 1: Sistema centralizado



Fuente: ¿Por qué instalar un Aire Acondicionado por conductos?
Disponible en <http://plameya.es/por-que-instalar-un-aire-acondicionado-por-conductos/>

2.6.2 SISTEMA DESCENTRALIZADO

Se utilizan máquinas individuales que realizan el tratamiento completo del aire en cada área a climatizar (Figura 2). Por ejemplo, los acondicionadores de ventana, que se colocan uno en cada área.

¹² Sistemas de climatización, Guías de ahorro y eficiencia energética. CIAT Group. Disponible en <https://www.fenercom.com/pages/pdf/informacion/formacion/Sistemas-de-Climatizacion.pdf> [Citado en 5 de abril de 2017]

¹³ NEWBAL, Carlos. RANGEL, Lizney "Dossier del sistema de aire acondicionado del edificio K de la UPB Seccional Bucaramanga". Informe de monografía de grado para optar el título de Especialista en Control e Instrumentación Industrial. Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga. Facultad de Ingeniería Electrónica. 2010. p. 25

Figura 2: Sistema semicentralizado



Fuente: Sistemas de refrigerante variable VRV. Disponible en:
<http://www.aireacondicionadoyclima.com/2013/01/sistemas-de-refrigerante-variable.html>

2.7 REFRIGERACIÓN

Se dice que hay refrigeración cuando la temperatura deseada es menor que la del ambiente. Se emplea para extraer calor de un recinto, disipándolo en el ambiente.

2.7.1 TIPOS DE REFRIGERACIÓN

2.7.1.2 REFRIGERACIÓN CONVENCIONAL

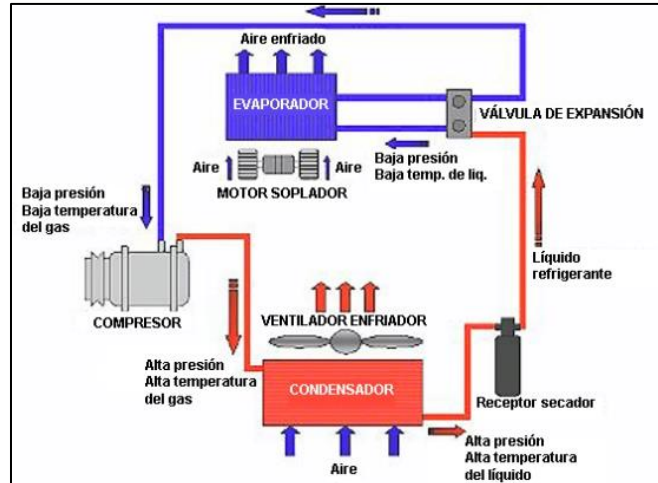
La refrigeración por compresión consiste en forzar mecánicamente la circulación de un fluido refrigerante en un circuito cerrado creando zonas de alta y baja presión con el propósito de que el fluido absorba calor en un lugar y lo disipe en el otro.

El ciclo de refrigeración consta de 4 etapas, como se ilustra en la figura 3:

- ✓ **Evaporación:** El refrigerante enfría el espacio que lo rodea mediante la absorción de calor. Tiene lugar en un evaporador, en donde el refrigerante se evapora cambiando de líquido a vapor.
- ✓ **Compresión:** Después de evaporarse, el refrigerante se encuentra en forma de vapor, baja presión y pasa al compresor en donde se comprime incrementando la presión.
- ✓ **Condensación:** Se lleva a cabo en un condensador localizado a un extremo del espacio refrigerado en donde el gas refrigerante a alta presión y temperatura rechaza calor hacia el medio ambiente (enfriado por una corriente de agua o aire) cambiando de gas a líquido frío a alta presión.

- ✓ **Control y expansión:** Es desarrollada por un mecanismo de control de flujo, el cual, retiene el flujo y expandiona el refrigerante para facilitar la posterior evaporación. Después de que el refrigerante deja el control de flujo se dirige al evaporador para absorber calor y comenzar un nuevo ciclo¹⁴.

Figura 3: Circuito de refrigeración



Fuente: <http://www.otkachka-auto.ru/ciclo-de-refrigeracion/>

2.7.1.3 REFRIGERACIÓN TERMOELÉCTRICA

La refrigeración termoeléctrica utiliza el efecto Peltier para crear un flujo térmico a través de la unión de dos materiales diferentes, como metales o semiconductores tipo P y N. Un refrigerador es una bomba de calor activa en estado sólido que transfiere calor de un lado del dispositivo a otro, oponiéndose al gradiente de temperatura, consumiendo para ello energía eléctrica.

El Efecto Peltier consiste en la creación de una diferencia térmica a partir de una diferencia de potencial eléctrico. Ocurre cuando una corriente pasa a través de dos metales diferentes o semiconductores (tipo-n y tipo-p) que están

¹⁴ MIRANDA, Alfredo. Ciclo Termodinámico de Refrigeración. Instituto Politécnico Nacional. Disponible en: http://www.academia.edu/6523000/CICLO_TERMODINAMICO_DE_REFRIGERACION [Citado en 5 de abril de 2017]

conectados entre sí en dos soldaduras (uniones Peltier). La corriente produce una transferencia de calor desde una unión, que se enfría, hasta la otra, que se calienta. El efecto es utilizado para la refrigeración termoeléctrica¹⁵.

2.8 SISTEMAS DE CONTROL

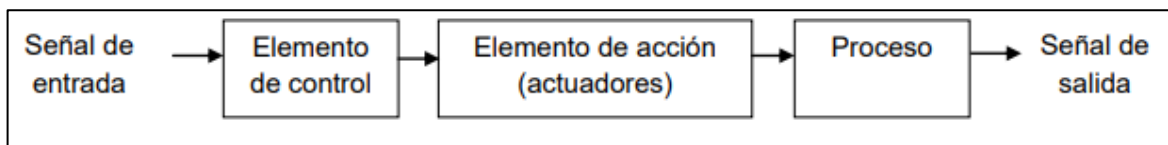
Un sistema de control es un conjunto de dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener resultados teóricamente verdaderos¹⁶.

Existen dos clases comunes de sistemas de control, sistemas de lazo abierto y sistemas de lazo cerrado.

2.8.1 SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO ABIERTO

Se denominan *sistemas de control en lazo abierto* (Figura 4) los sistemas en los cuales la salida no tiene efecto sobre la acción de control. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada.

Figura 4: Sistema de control en lazo abierto



Fuente: OGATA, Katsuhico, *Ingeniería de Control Moderna*

En cualquiera de estos sistemas la salida no se compara con la entrada de referencia. Así, a cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija; como resultado de ello, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada. En la práctica, el control en lazo abierto sólo se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas ni externas.

En los sistemas de control de lazo abierto, la salida se genera dependiendo de la entrada; mientras que en los sistemas de lazo cerrado la salida depende de las

¹⁵ Tecnomedición, Disponible en <http://www.tecnomedicion.com/inicio/efecto-seebeck-y-peltier.html>

¹⁶ Martín García, Juan (2017). *Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas*

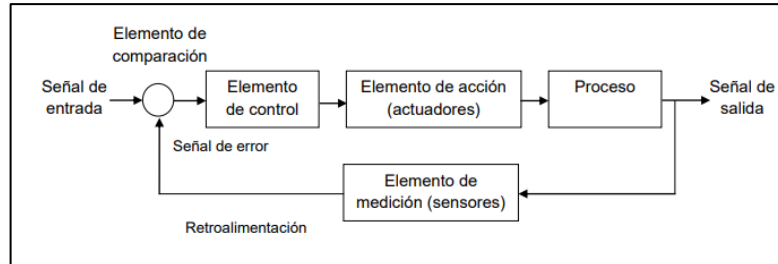
consideraciones y correcciones realizadas por la retroalimentación. Un sistema de lazo cerrado es llamado también sistema de control con realimentación.

2.8.2 SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO CERRADO

Los sistemas de control en lazo cerrado (figura 5), se definen como aquellos en los que existe una realimentación de la señal de salida, o, dicho de otra forma, aquellos en los que la señal de salida tiene efecto sobre la acción de control.

Los sistemas de control en lazo cerrado se denominan también sistemas de control realimentados. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la propia señal de salida o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema¹⁷.

Figura 5: Sistema de Control de lazo cerrado



Fuente: OGATA, Katsuhico, Ingeniería de Control Moderna

Entre los sistemas de control de lazo cerrado están el control ON/OFF y el control PID

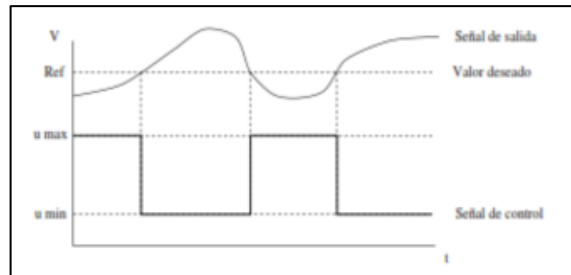
2.8.2.1 CONTROL ON/OFF

Es un sistema de control que sólo tiene dos posiciones fijas, las cuales, en muchos casos, son simplemente encendido y apagado. Este tipo de control es

¹⁷ SISTEMAS DE CONTROL, OGATA Capítulo 1. Introducción a los sistemas de control, p.7

relativamente simple y económico, razón por la cual su uso es extendido en sistemas de control tanto industriales como domésticos (figura 6).

Figura 6: Control ON/OFF



Fuente: <http://www.contaval.es/tag/regulacion/>

2.8.2.2 CONTROL PID

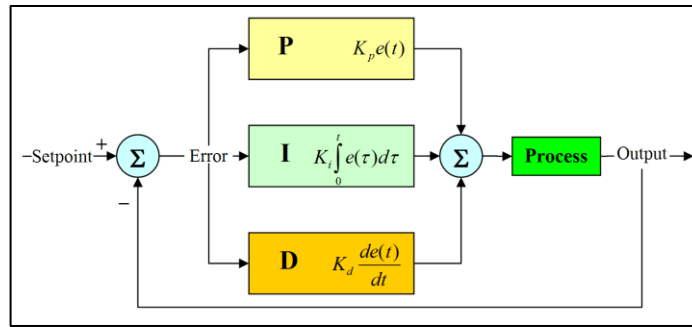
El control PID es un mecanismo de control que a través de un lazo de retroalimentación, permite regular la velocidad, temperatura, presión y flujo entre otras variables de un proceso en general. El controlador PID, calcula la diferencia entre nuestra variable real contra la variable deseada. Por ejemplo, en sistemas de control de temperatura, regularmente se quiere mantener la temperatura constante, por lo tanto, el control PID mide la diferencia entre la temperatura del salón que se desea mantener y actúa variando la velocidad del motor de la condensadora para mantener esta temperatura.

El algoritmo de control incluye tres parámetros fundamentales: Ganancia proporcional (P), Integral (I) y Derivativo (D).

El parámetro Proporcional (P) mide la diferencia entre el valor actual y el set-point (en porcentaje) y aplica el cambio. El parámetro Integral (I) se refiere al tiempo que se toma para llevar a cabo la acción correctiva. Mientras el valor sea más pequeño, el ajuste es más rápido, pero puede causar inestabilidad en el sistema como oscilaciones, vibración de motor de la bomba, etc.¹⁸. En la figura 7 se muestra el diagrama de un sistema de control PID.

¹⁸ FRANKLIN ELECTRIC, ¿Qué es el control PID? Disponible en <https://franklinlinkmx.wordpress.com/2013/09/05/que-es-el-control-pid/>, [Citado en 21 de abril de 2018]

Figura 7: Diagrama de Control PID



Fuente: <https://programacionsiemens.com/wp-content/uploads/2013/03/pid.jpg.png>

El parámetro Derivativo (D) emite una acción predictiva, es decir, prevé el error e inicia una acción oportuna. Responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande.

2.9 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

Una fase importante en el diseño de controladores es la identificación de la planta que tiene como objetivo obtener un modelo matemático que reproduzca con suficiente exactitud el comportamiento del proceso. De la exactitud del modelo obtenido dependerá posteriormente el buen comportamiento del controlador diseñado.

Existen dos métodos básicos de identificación: identificación analítica (modelado) e identificación experimental (identificación clásica). Para el modelado se requiere un conocimiento muy especializado sobre la tecnología del proceso, mientras que para la identificación clásica (que es el método más directo) se requiere aplicar al proceso señales especiales como escalones, rampas, impulsos, sinusoides o señales pseudoaleatorias¹⁹.

2.10 SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR

La sintonización de los controladores PID, consiste en la determinación del ajuste de sus parámetros (K_c , T_i , T_d), para lograr un comportamiento del sistema de control aceptable y robusto de conformidad con algún criterio de desempeño

¹⁹C. Betancur, J. Cerezo, A. Vega, DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA, Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática, Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada (IUMA), Universidad de Las Palmas de G.C.

establecido. Para poder realizar la sintonización de los controladores, primero debe identificarse la dinámica del proceso, y a partir de ésta determinar los parámetros del controlador utilizando el método de sintonización seleccionado²⁰.

El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de comportamiento dadas se conoce como sintonía del controlador. Ziegler y Nichols sugirieron reglas para sintonizar los controladores PID (esto significa dar valores a K_p , T_i y T_d) basándose en las respuestas escalón experimentales o en el valor de K_p que produce estabilidad marginal cuando sólo se usa la acción de control proporcional²¹.

Los controladores PID se pueden describir mediante sus funciones de transferencia, relacionando el error con la salida del controlador.²²

2.11 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC)

Según lo define la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos de los Estados Unidos un PLC – Programable Logic Controller (Controlador Lógico Programable) es un dispositivo electrónico digital con una memoria programable para el almacenamiento de instrucciones, permitiendo la implementación de funciones específicas como: lógicas, secuenciales, temporizadas, de conteo y aritméticas; con el objeto de controlar máquinas y procesos.

También se puede definir como un equipo electrónico, el cual realiza la ejecución de un programa de forma cíclica. La ejecución del programa puede ser interrumpida momentáneamente para realizar otras tareas consideradas más prioritarias, pero el aspecto más importante es la garantía de ejecución completa del programa principal. Estos controladores son utilizados en ambientes industriales donde la decisión y la acción deben ser tomadas en forma muy rápida, para responder en tiempo real. Los PLC son utilizados donde se requieran tanto controles lógicos como secuenciales o ambos a la vez²³.

²⁰ *Métodos de sintonización de controladores PID que operan como servomotores*, Disponible en https://www.researchgate.net/publication/260058488_M

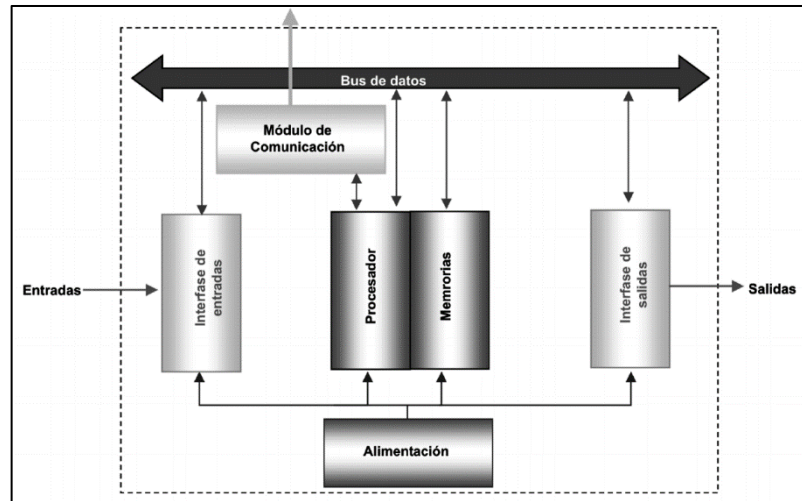
²¹ OGATA, Katsuhiko, Ingeniería de Control Moderna, 5 ed. Capítulo 1 p.571

²² <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo270/informacion/CLASES/12%20CONTROL%20PID.pdf>

²³ M. Moreno. Curso 061. Controlador Lógico Programable (PLC). Automation Micromecánica. Disponible en:

<http://www.microautomacion.com/capacitacion/Manual061ControladorLgicoProgramablePLC.pdf>

Figura 8: Estructura básica de un PLC



Fuente: Curso 061. Controlador Lógico Programable (PLC). Automation Micromecánica p. 11

Entre las ventajas del uso de PLC's se tienen:

- ✓ Menor tiempo empleado en la elaboración de proyectos, debido a que no es necesario dibujar previamente el esquema de contactos, es preciso simplificar las ecuaciones lógicas, ya que por lo general la capacidad de almacenamiento del módulo de memoria es lo suficientemente grande.
- ✓ La lista de materiales queda sensiblemente reducida, y al elaborar el presupuesto correspondiente eliminaremos parte del problema que supone el contar con diferentes proveedores, distintos plazos de entrega.
- ✓ Posibilidad de introducir modificaciones sin cambiar el cableado ni añadir aparatos.
- ✓ Mínimo espacio del tablero donde se instala el autómata programable.
- ✓ Menor costo de mano de obra de la instalación. Economía de mantenimiento. Además de aumentar la fiabilidad del sistema, al eliminar contactos móviles, los mismos autómatas pueden indicar y detectar averías.
- ✓ Posibilidad de gobernar varias máquinas con un mismo autómata.

- ✓ Menor tiempo para la puesta en funcionamiento del proceso al quedar reducido el tiempo de cableado.
- ✓ Si por alguna razón la máquina queda fuera de servicio, el autómata sigue siendo útil para otra máquina o sistema de producción.

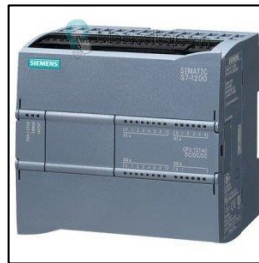
Algunos inconvenientes son:

- ✓ Hace falta un programador, lo que obliga a adiestrar a uno de los técnicos en tal sentido. Esta capacitación puede ser tomada en distintos cursos, inclusive en universidades.
- ✓ El costo inicial²⁴.

2.11.1 PLC SIEMENS S7-1200

El controlador compacto SIMATIC S7-1200 (figura 9) es el modelo modular y compacto para pequeños sistemas de automatización que requieran funciones simples o avanzadas para lógica, HMI o redes. Gracias a su diseño compacto, su bajo coste y sus potentes funciones, los sistemas de automatización S7-1200 son idóneos para controlar tareas sencillas.

Figura 9: PLC SIEMENS S7-1200



Fuente: www.siemens.com

2.12 REGULACIÓN PROPORCIONAL PWM

La regulación ON/OFF, no puede evitar una fluctuación de la temperatura del proceso (PV), alrededor del Set Point (SP).

²⁴ M. Moreno. Curso 061. Controlador Lógico Programable (PLC). Automation Micromecánica. Disponible en <http://www.microautomacion.com/capacitacion/Manual061ControladorLgicoProgramablePLC.pdf>

En los sistemas que pueden admitir dicha fluctuación se usa este método, pero hay aplicaciones que requieren una exactitud mayor y por lo tanto hay que recurrir a otra forma de lazo de control. Aquí es donde interviene el control proporcional y sus distintas modalidades. El control proporcional suministra una energía de refrigeración, de forma gradual, entre 0% y 100%. Esta proporción de energía, que se suministra en cada momento, es proporcional a la desviación de la temperatura real del proceso con respecto a la deseada. Dicha desviación se denomina Error y se representa matemáticamente mediante la ecuación (1):

$$Error = SP - PV \quad (1)$$

Los reguladores de temperatura que realicen un control proporcional deben disponer de una salida analógica (0-10V ó de 4-20mA) para que, accionando un relé, puedan suministrar una energía gradual entre 0% y 100%.

Para controlar una nevera que refrigera haciendo uso de Celdas de Peltier se utilizan reguladores con salidas de relé que suministran una señal gradual y proporcional al error de la temperatura. Para comprender cómo un relé que sólo tiene dos estados, encendido o apagado, suministra energía entre el 0% y 100%, se deben tener en cuenta los conceptos de Tiempo de Respuesta y Modulación por Ancho de Pulso PWM.

2.12.1 TIEMPO DE RESPUESTA

Es el tiempo que tarda en apreciarse una disminución de la temperatura a partir del momento en que se da la orden de enfriamiento.

2.12.2 MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO (PWM)

Consiste en modular la activación del relé dentro de un lapso denominado *Tiempo de Ciclo* (T_c) que sea inferior al tiempo de respuesta del sistema. Esto quiere decir que el relé está activado un tiempo determinado y está desactivado el resto del tiempo hasta transcurrir el tiempo de ciclo. De esta forma, si el regulador debe dar una potencia de calefacción del 50%, el relé estará activo la mitad del tiempo de ciclo y permanecerá desactivado el otro 50%.

2.13. HERRAMIENTA DE REGULACION PID DEL SIMATIC S7-1200

El objeto tecnológico PID_Compact es un regulador PID universal con optimización integrada. Permite configurar un regulador continuo o de impulsos. Es posible elegir entre el modo manual y el automático.

PID-Compact registra de forma continua el valor real medido dentro de un lazo de regulación y lo compara con la consigna deseada. A partir del error de regulación resultante, la instrucción PID_Compact calcula un valor de salida, con el que el valor real se iguala con la consigna con la máxima rapidez y estabilidad. En los reguladores PID, el valor de salida se compone de tres acciones:

- **Acción P:** La acción P del valor de salida aumenta proporcionalmente al error de regulación.
- **Acción I:** La acción I del valor de salida aumenta hasta que se compensa el error de regulación.
- **Acción D:** La acción D aumenta con una velocidad de variación creciente del error de regulación.

El valor real se iguala lo más rápidamente posible con la consigna. Si la velocidad de variación del error de regulación vuelve a reducirse, también lo hace la acción D.

La instrucción PID_Compact calcula los parámetros P, I y D de forma automática o se determinan manualmente.

2.14. SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD

Los sensores de temperatura son dispositivos que transforman los cambios de temperatura en señales eléctricas, las cuales son procesados por equipos eléctricos o electrónicos.

Un sensor de humedad es un dispositivo que mide la humedad relativa en un área dada.

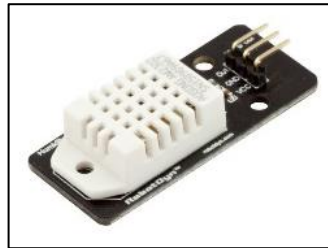
El DHT22 (figura 10) es un sensor de temperatura y humedad que posee una señal digital de salida calibrada, este dispositivo mide la humedad relativa y la temperatura.

Este sensor dispone de un procesador interno que realiza el proceso de medición, proporcionando la medición mediante una señal digital, por lo que resulta muy sencillo obtener la medición desde un microprocesador como Arduino.

Las características del DHT22 son las siguientes:

- Medición de temperatura entre -40 a 50°C, con una precisión de 0.5°C
- Medición de humedad entre 0 a 100%, con precisión del 2%.
- Frecuencia de muestreo de 2 muestras por segundo (1 Hz)
- Tiempo de respuesta menor a 10 segundos
- Voltaje de alimentación: 3.3 V a 5.5 V

Figura 10: Sensor DHT22



Fuente: <https://robotdyn.com/temperature-and-humidity-sensor-dht22.html>

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1 Reconocimiento del funcionamiento del sistema de control de temperatura y humedad.

Haciendo uso del software FPWin GR se estableció la conexión con el PLC, para extraer el programa que controla el sistema y se realizó un análisis e interpretación de la información obtenida, para finalmente monitorear en tiempo real la operación del sistema.

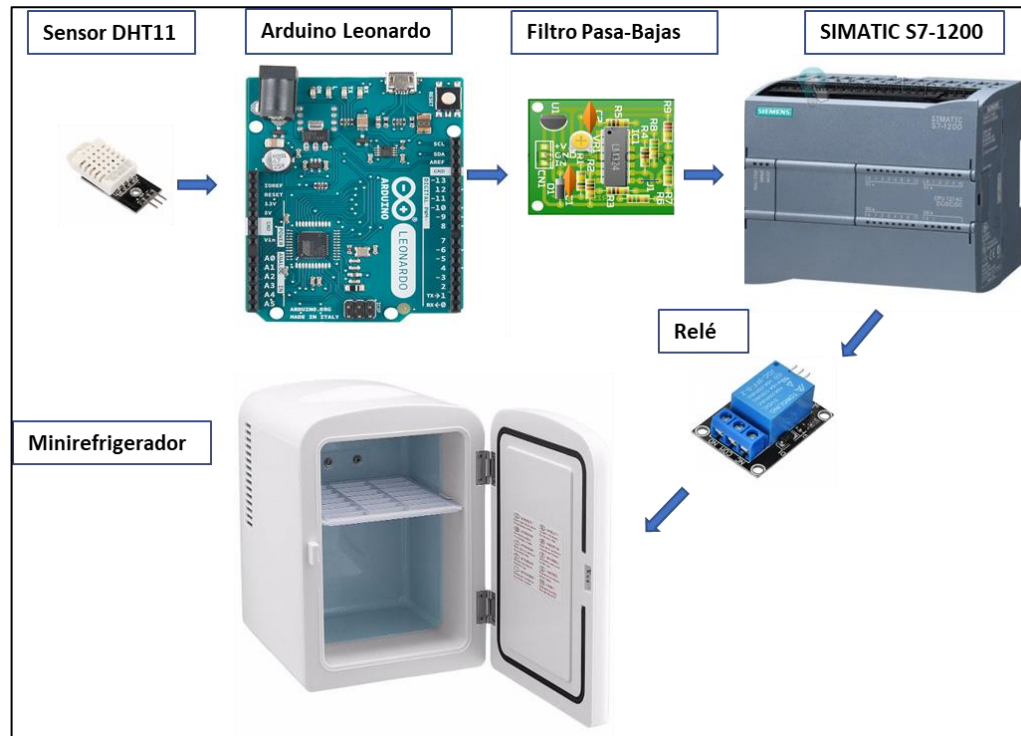
3.2 Determinación del estado de funcionamiento del sistema de control de temperatura y humedad.

Con la ayuda de expertos en el área, se inspeccionaron los equipos de aire acondicionado, identificándose así el estado actual de funcionamiento de los elementos que conforman el sistema y las especificaciones técnicas de los equipos. Además, se hizo una consulta sobre las características técnicas de cada uno de sus componentes y se procedió con la realización de pruebas de continuidad y medidas de tensión y corriente en los circuitos de control y de potencia, para identificar los puntos de conexión del cableado y establecer el esquema eléctrico, puesto que no se dispone de los diagramas correspondientes.

3.3 Desarrollo de la metodología para la sintonización de un sistema de control de temperatura, adaptando un mini refrigerador para que sea controlado con el PLC SIEMENS S7-1200, y emular así, el control utilizado en el laboratorio del CDT.

Con el fin de simular el control de las condiciones de temperatura de un laboratorio de metrología, se desensambló un mini refrigerador de estado sólido, con el propósito de analizar y comprender su funcionamiento. Posteriormente se modificó el circuito interno, incorporándole un relé electromecánico de 10A, para controlar la corriente que llega a la celda de Peltier, haciendo uso de la técnica PWM. Seguidamente se acondicionó el sensor digital de temperatura y humedad DHT22 para que entregara señales de 0-10V. En la figura 11 se muestra un diagrama de las conexiones realizadas.

Figura 11: Diagrama de conexiones PLC



Fuente: Autor

Luego, mediante el software Matlab, se caracterizó el sistema haciendo uso de la herramienta IDENT, y se hallaron las constantes P, I y D mediante la herramienta PID Controller. Posteriormente, se programó el PLC SIEMENS S7-1200, para que mantenga la temperatura en 20°C, mediante el bloque *PID_Compact* del software TIA PORTAL V13.

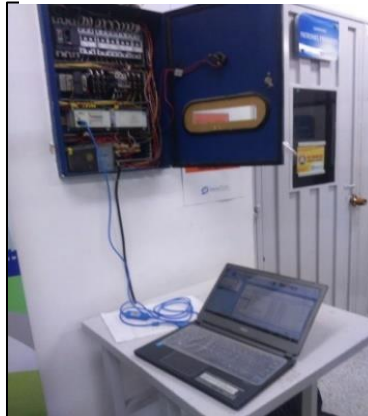
Como complemento y haciendo uso de la misma herramienta (TIA PORTAL), se utilizó el método de sintonización automática incorporado en el PLC, para comparar la respuesta de los dos controladores y así determinar cuál presenta un mejor desempeño.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Reconocimiento del funcionamiento del sistema de control de temperatura y humedad del laboratorio del CDT de Gas.

Una vez establecida la conexión con el PLC (figura 12) haciendo uso del software FPWin GR, se extrajo el programa que controla el sistema (Ver Anexo A) lo cual corrobora que el control es del tipo ON/OFF y, que la temperatura del laboratorio es controlada al encender y apagar las condensadoras de la siguiente forma: Cuando el laboratorio registra una temperatura igual o superior a 21°C, se activan las condensadoras 1 y 2, mientras que si registra una temperatura entre el rango de 19°C y 20°C se activa la condensadora 1, con el fin de mantener la temperatura en 20°C que corresponde al valor de consigna de la temperatura establecido en la norma ISO/IEC 17025. Cuando se alcanza dicho valor la condensadora se apaga para evitar que la temperatura siga descendiendo y, vuelvan a encenderse, al alcanzar los rangos antes mencionados. Esto se logra manteniendo la unidad evaporadora siempre en funcionamiento, dado que esto garantiza que el aire se mantenga circulando dentro del recinto.

Figura 12: Conexión PC-PLC



Fuente: Autor

Posteriormente, haciendo uso de la función de “Monitoreo en tiempo real”, del programa FPWin GR, se determinó cómo estaban conectadas las salidas del PLC a los diferentes elementos que conforman el sistema, las cuales se registran en la tabla 1, ayudando a la comprensión de su funcionamiento y facilitando así la detección de fallas, proceso que demandaba gran cantidad de tiempo por parte de los funcionarios del laboratorio, quienes consideraban el sistema de control como una “caja negra”.

Tabla 1: Dispositivos conectados a las salidas del PLC

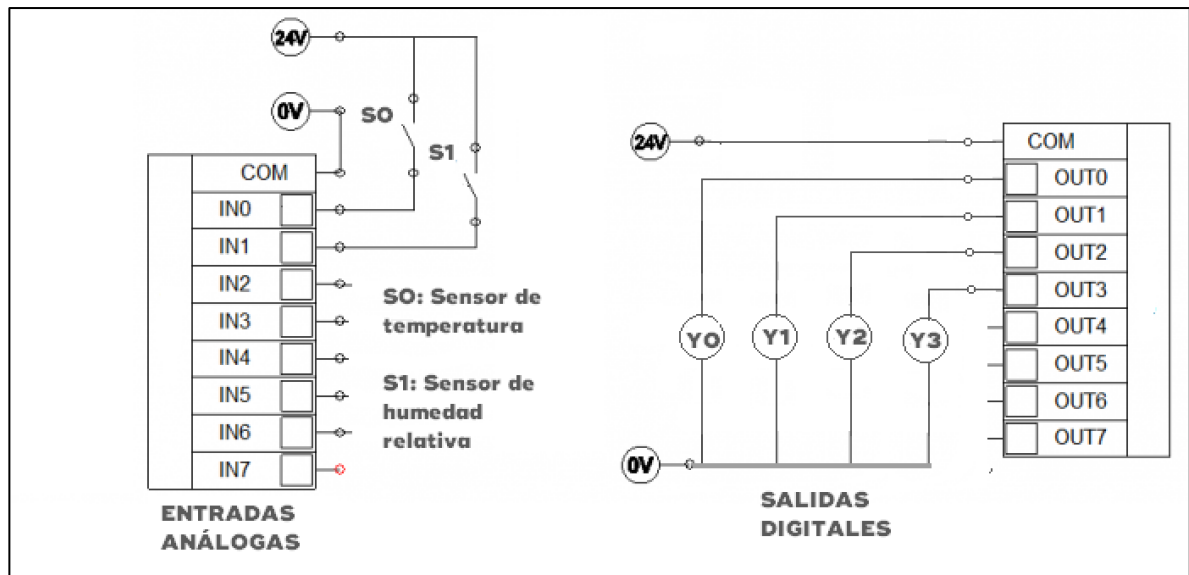
Salida del PLC	Dispositivo conectado
Y0	Evaporadora
Y1	Condensadora 1
Y2	Condensadora 2
Y3	Resistencia de calentamiento
Y4	Control de Humedad

Fuente: Autor

La resistencia asociada a la salida Y3 del PLC, se denomina *Resistencia de Carter* y tiene como funciones calentar el aceite del compresor para que en el momento de su arrancada éste se encuentre lo más disuelto posible y no provoque un golpe de aceite en los pistones del compresor ocasionando desgaste mecánico y deterioro en el sistema, e impedir que el líquido refrigerante se mezcle con el aceite del compresor.

Los bosquejos de los circuitos de control y de potencia se muestran en las figuras 13 y 14 respectivamente.

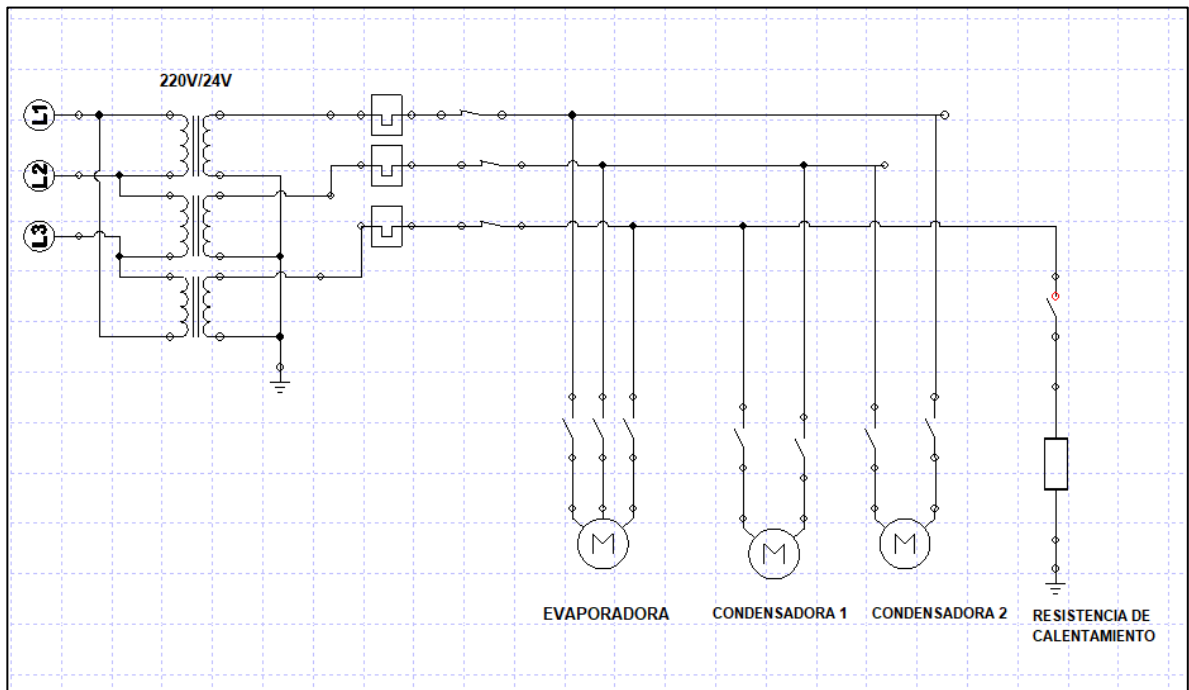
Figura 13: Bosquejo circuito de control



Fuente: Autor

El PLC usa dos entradas análogas. En la entrada analógica 0 se encuentra conectada la RTD que corresponde al sensor de temperatura y en la entrada analógica 1 se conecta un higrómetro para la lectura de la humedad relativa.

Figura 14: Bosquejo circuito de potencia



Fuente: Autor

4.2 Determinación del estado de funcionamiento de los elementos que conforman el sistema.

A partir de la inspección visual realizada en compañía de expertos, a todas las partes que conforman el sistema, se encontró que se cuenta con un sistema HVAC, todo-aire, del tipo semicentralizado de la marca YORK, con una capacidad de refrigeración nominal de cinco toneladas térmicas, compuesto por dos unidades condensadoras y una unidad evaporadora, ubicadas en el techo del laboratorio. El sistema está gobernado por un PLC MATSUSHITA FP1.

Figura 15: inspección visual a los equipos HVAC en compañía de expertos



Fuente: Autor

Estos equipos han estado en funcionamiento durante un periodo aproximado de 23 años, cuando su vida útil es de 12 años, lo que ha ocasionado un desgaste mecánico en el sistema de compresión, y como consecuencia, pérdida de capacidad de enfriamiento, debido a que ya no se impulsa la cantidad de refrigerante necesaria.

El refrigerante utilizado es el R-22, que pertenece a los refrigerantes hidrofluorocarbonados (HFC), los cuales han sido prohibidos por la comunidad internacional²⁵, por las graves implicaciones para la salud y el medio ambiente, razón por la cual, actualmente, no se fabrican.

La antigüedad de los equipos y el refrigerante usado no solo conlleva a los problemas ya mencionados, sino que, al no ser producidos industrialmente, no es posible adquirirlos, lo que implicaría cambiar los equipos en caso de fallas. También es importante resaltar que el equipo HVAC del laboratorio de patrones primarios del CDT es de uso residencial y fue adaptado para ser utilizado en un ambiente industrial, sin tener en cuenta que, para este tipo de laboratorios, el control de humedad y temperatura requiere de un control especial, que se consigue mediante equipos HVAC de precisión.

Finalmente, se evidenció que el controlador de Humedad Relativa (HR) HONEYWELL, también ubicado en el techo del laboratorio, está completamente oxidado, deteriorado y fuera de operación, como se muestra en la figura 16, y que el laboratorio no cuenta con ningún tipo de dispositivos, que humidifiquen y deshumidifiquen. El equipo humidificador puede ser una válvula de aspersión que libere agua cuando la HR es baja y el deshumidificador normalmente es una bomba de calor, lo que conlleva a deducir que no existe control de Humedad Relativa. No obstante, las condiciones de humedad del laboratorio se mantienen dentro de los rangos permisibles (50% +/- 10)²⁶, debido a que la media de Humedad Relativa en Piedecuesta es del 80%²⁷ y los aires acondicionados absorben entre un 25 y 30% de la Humedad Relativa del ambiente²⁸.

²⁵ Decisión 54/39 del Protocolo de Montreal

²⁶ Norma ISO/IEC 17025:2005, Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración, Apartado 5.1

²⁷ Tiempo y temperatura, Disponible en: <http://tiempoytemperatura.es/colombia/piedecuesta.html#por-dias>

²⁸ Organización Serin, Aires acondicionado, disponible en: <http://www.airesacondicionados.com.co/portal/medicion-y-control-de-humedad-relativa.php>

Figura 16: Controlador de Humedad Relativa Honeywell



Fuente: Autor

Por las situaciones planteadas, la probabilidad de fallas en el sistema es alta, y para evitar interrupciones que afecten la prestación del servicio que se ofrece, se propuso al laboratorio adquirir un nuevo sistema de aire acondicionado. Para esto se solicitaron dos cotizaciones a la empresa DYNATEK (ver anexo B); y a partir de éstas, se sugirió al laboratorio adquirir el equipo de precisión, ya que como se mencionó anteriormente, es el recomendado para los laboratorios de metrología.

4.3 Sintonización de un sistema de control de temperatura adaptando un mini refrigerador

Las condiciones de temperatura de un laboratorio de metrología se simularon mediante la adaptación de una nevera termoeléctrica, dentro de las instalaciones del laboratorio de Máquinas Eléctricas de la UPB. Implementándose un control PID de temperatura en un PLC. El procedimiento desarrollado se describe a continuación.

4.3.1 Selección del hardware

Ya que la implementación del control PID requiere encender y apagar repetida y frecuentemente el compresor para controlar el flujo de refrigerante en circulación, no es conveniente utilizar una nevera convencional debido a que está diseñada para trabajar con un control ON/OFF, que requiere de dos a tres minutos para que las presiones de alta y de baja se equilibren, y al implementar un control PID no se dispondría del tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio y los pistones del compresor sufrirían daños mecánicos irreparables²⁹. Por lo anterior, para la

²⁹ Los equipos de aires acondicionados, disponible en: <http://www.aires-acondicionados.info/apaga-y-enciende-muy-seguido-el-aire/>

simulación de la temperatura se utilizó el mini refrigerador termoeléctrico que se muestra en la figura 17, dado que este tipo de refrigeradores funciona sin compresor.

Figura 17; Refrigerador termoeléctrico utilizado



Fuente: Autor

El control se implementó en el autómata SIMATIC S7-1200 de SIEMENS, seleccionando un controlador PID, para asegurar que la temperatura se mantenga en 20°C, ya que éste es el que proporciona un control más preciso.

Como sensor de temperatura se optó por usar, en lugar de una RTD, el sensor digital DHT22, teniendo en cuenta que éste mide también la humedad relativa, variable que debe ser monitoreada en los laboratorios de metrología, como lo establece la norma ISO/IEC 17025. Finalmente, como elemento actuador se utilizó un relé electromecánico de 10A, ya que es necesario que soporte mayor corriente a la que circula por el circuito (5A)

4.3.2 Acondicionamiento de señal

Al desensamblar el mini refrigerador se encontró que el circuito interno está compuesto por una fuente conmutada que recibe una tensión de 110V AC y entrega 12V DC. También dispone de un switch que permite seleccionar la función de enfriar o calentar y otro selector que permite escoger el tipo de alimentación que puede ser: conexión a una batería de 12VDC o a la red de energía eléctrica de 110V AC, opción seleccionada para el desarrollo del proyecto. Además, se

determinó que circula una corriente de 5A que es la que, al atravesar la celda, produce el enfriamiento.

Para realizar la acción de control, se utilizó la técnica PWM, para controlar la energía que llega a la celda. Para ello se abrió el circuito y se instaló como interruptor el relé electromecánico de 10A (figura 18). Sin embargo, al activarse el relé la temperatura disminuía 2°C, lo que se debía a que la placa Arduino no tiene la capacidad de energizar al mismo tiempo el relé y el sensor de temperatura, así que fue necesario usar el regulador de tensión LM7805 para alimentar dicho relé.

Figura 18: Adaptación del relé a la celda Peltier

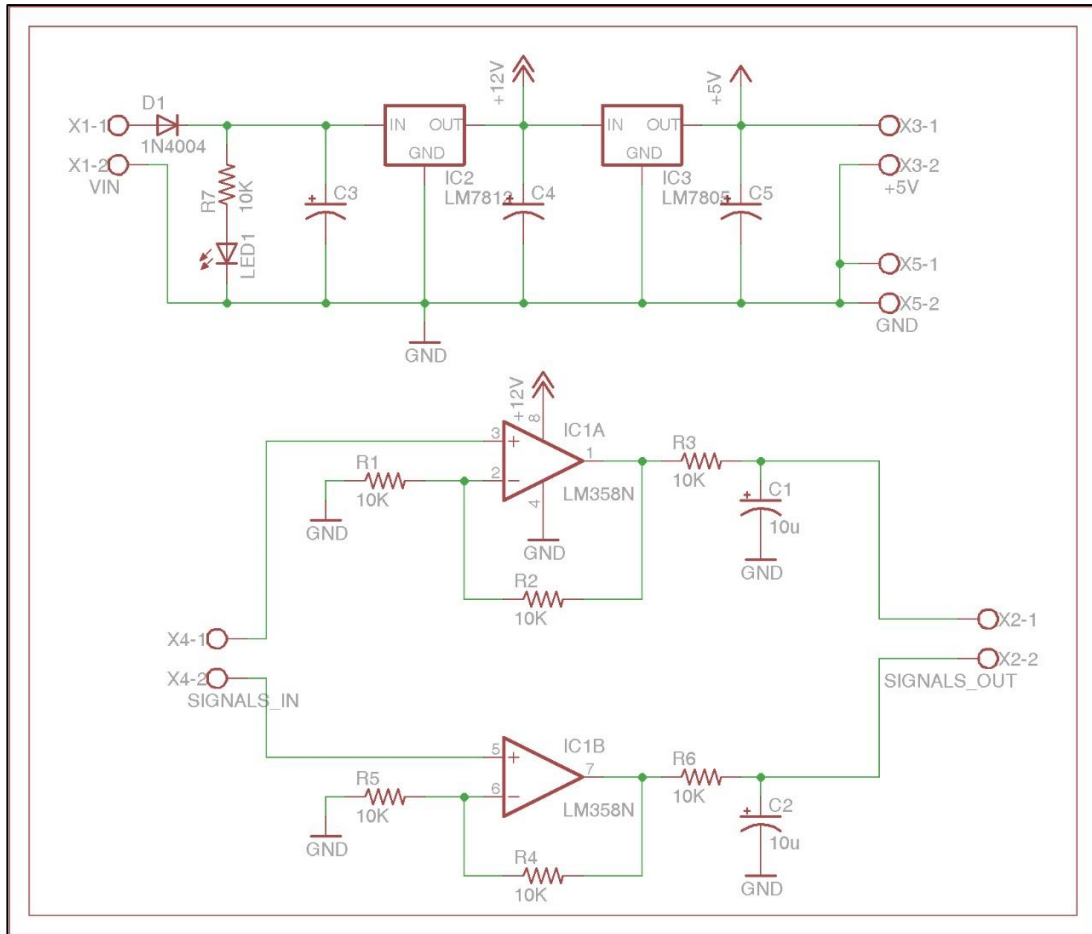


Fuente: Autor

Como el Arduino Leonardo no dispone de salidas analógicas puras, usa la técnica de Modulación por Ancho de Pulso (PWM) para simularlas, generando una señal digital pulsada, cuyo valor promedio es el valor analógico deseado; dicha técnica provoca comportamientos oscilantes en la señal de salida, y dado que ésta no puede ser usada para la lectura de temperatura, fue necesario suavizarla. Para esto se diseñó un filtro activo pasa-bajos con ganancia dos, ya que las entradas analógicas del PLC requieren señales de 0-10V y el Arduino las entrega de 0-5V.

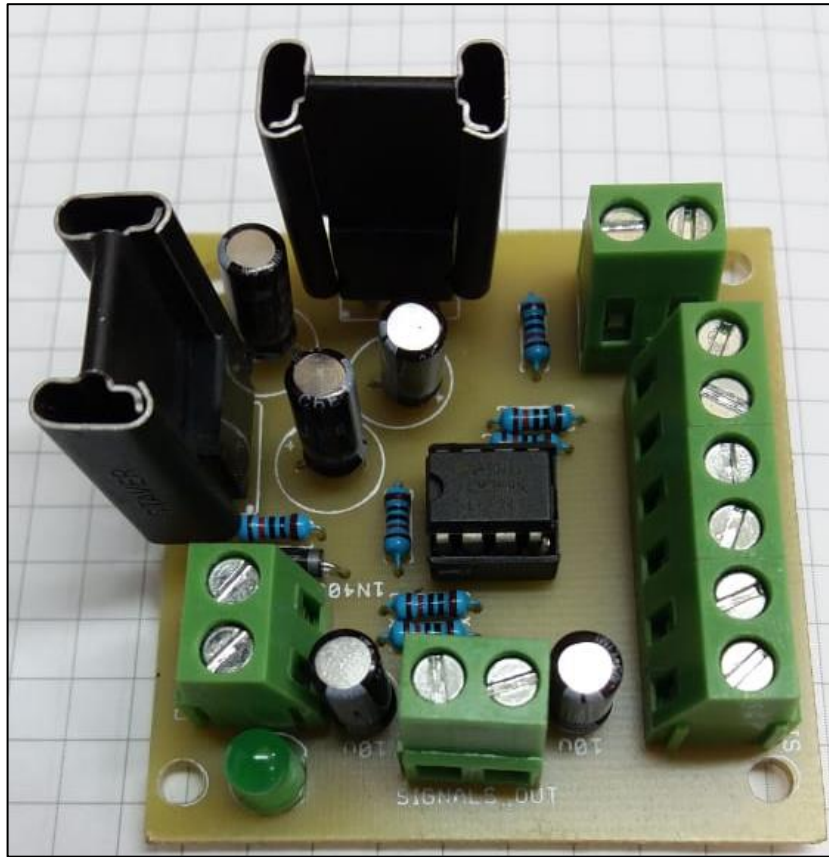
En la figura 18 se muestra el esquemático del circuito diseñado y en la figura 19, la tarjeta elaborada.

Figura 19: Filtro activo pasa-bajas



Fuente: Autor

Figura 20: Tarjeta de acondicionamiento de señal



Para convertir la señal digital, que entrega el sensor, a señal analógica se hace uso de la instrucción ***analogwrite (value, pin)***, para lo cual fue necesario linealizar el sensor, definiendo su rango de medición de 10°C a 30°C y teniendo en cuenta que las salidas analógicas del Arduino entregan valores entre 0 y 255. Cuando la temperatura sea de 10°C, el valor de salida será 0 y cuando sea de 30°C será de 255°C. Con estas consideraciones se hallaron las ecuaciones (1) y (2), para la temperatura y la humedad relativa respectivamente:

$$valor_{temp} = 12.75 * T - 127819 \quad (1)$$

$$valor_{hr} = 2.55 * h \quad (2)$$

Estas ecuaciones se programaron en Arduino mediante el código que se muestra en la figura 21.

Figura 21: Lectura y conversión D/A de la lectura del sensor

```
//Programa para convertir la señal Digital del DHT22 a señal Análoga

#include "DHT.h"
#define DHTTYPE DHT22 // Tipo de sensor utilizado

const int DHTPin = 2; // what digital pin we're connected to
const int pintemp = 3; // pin de salida temperatura
const int pinhumedad = 5; // pin de salida humedad

DHT dht(DHTPin, DHTTYPE);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("DHTxx test!");
  dht.begin();
  pinMode(pintemp, OUTPUT);
  pinMode(pinhumedad, OUTPUT);
}

void loop() {

  delay(2000); // Tiempo de espera entre medidas

  float h = dht.readHumidity();
  float t = dht.readTemperature();

  int tnuevo=12.75*t-127.5; // Mide temperaturas en el rango de 10°C y 30°C
  int hnuevo=2.55*h; // Mide humedad en el rango de 0% y 99.9%

  if (isnan(h) || isnan(t)) {
    Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
    return;
  }
  char text[40];

  Serial.print(dtostrf(h,1,2,text));
  Serial.print(" ", " ");
  Serial.print(dtostrf(t,1,2,text));
  Serial.print("°C");
  Serial.print("\n");

  delay(100);

  analogWrite(pintemp, tnuevo); // Salida de señal PWM temperatura
  analogWrite(pinhumedad, hnuevo); // Salida de señal PWM humedad
}
```

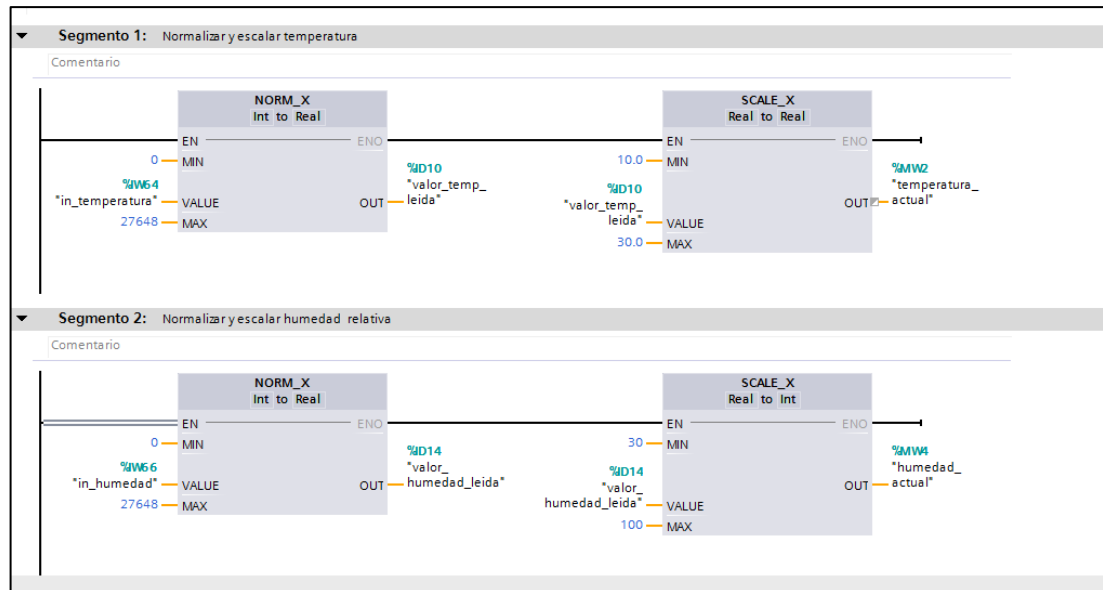
Fuente: Autor

Las señales de humedad y temperatura que fueron acondicionadas se convirtieron en señales de tensión entre 0V y 10V, luego se conectaron las salidas de los filtros a las entradas analógicas del PLC y posteriormente se procedió a programarlo.

4.3.3 Programación del SIMATIC S7-1200

Para programar el PLC se hizo uso del entorno de programación TIA PORTAL V13. Inicialmente se normalizaron y escalaron las señales analógicas leídas, como se muestra en la figura 22.

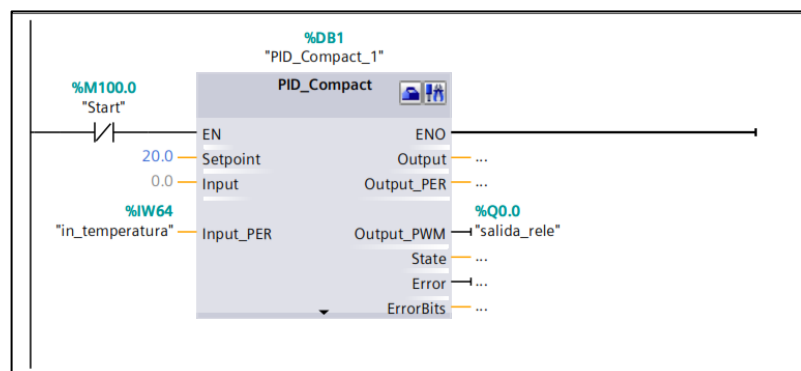
Figura 22: Normalizado y escalado de señales analógicas



Fuente: Autor

El SIMATIC S7 1200 dispone de un regulador por software. Para ponerlo en funcionamiento se agregó el Objeto Tecnológico "PID-Compact_V3" que se configura como se ve en la figura 23 y se agrega una interrupción cíclica de 1 segundo que es el tiempo en el que se hará la llamada al bloque PID_Compact.

Figura 23: Objeto Tecnológico PID_Compact



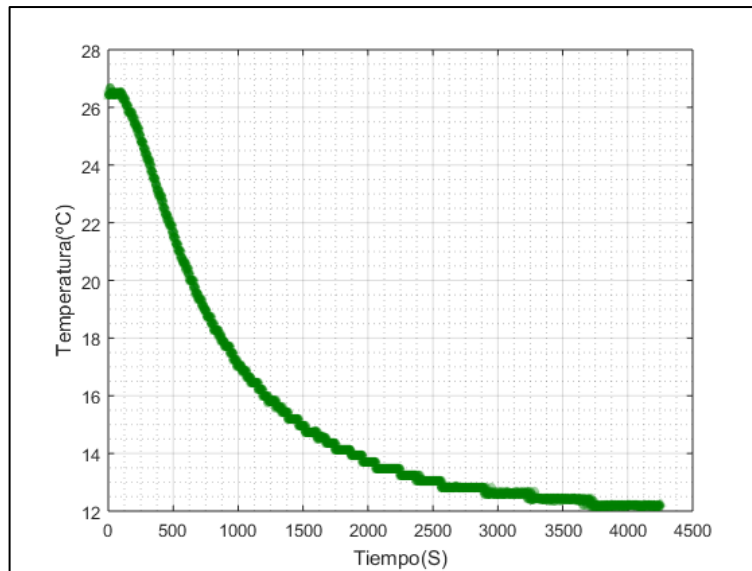
Fuente: Autor

El programa completo se muestra en el anexo B.

4.3.4 Caracterización del sistema

Para el diseño del control se realizó la identificación de la planta a controlar, esto es, se encontró una función de transferencia que describiera, de forma aproximada, el comportamiento físico del sistema, para lo cual se registró la variación de temperatura de la nevera, al energizarla con 12V DC, obteniéndose una curva que se asimila a un sistema de primer orden sin retardo (figura 24), la cual se representa mediante la función $G(S) = \frac{k}{1+\tau S}$.

Figura 24: Curva de enfriamiento del mini refrigerador



Para la identificación del sistema se hizo uso de la herramienta *PID Tuner – Plant identification* de Matlab, con la cual se preprocesó la señal de salida para eliminar el offset y se identificó la planta utilizando como señal de entrada el valor de 12V DC, y como señal de salida la variación de la temperatura. Figuras 25 y 26

Figura 25: *Entrada y salida del sistema a identificar*

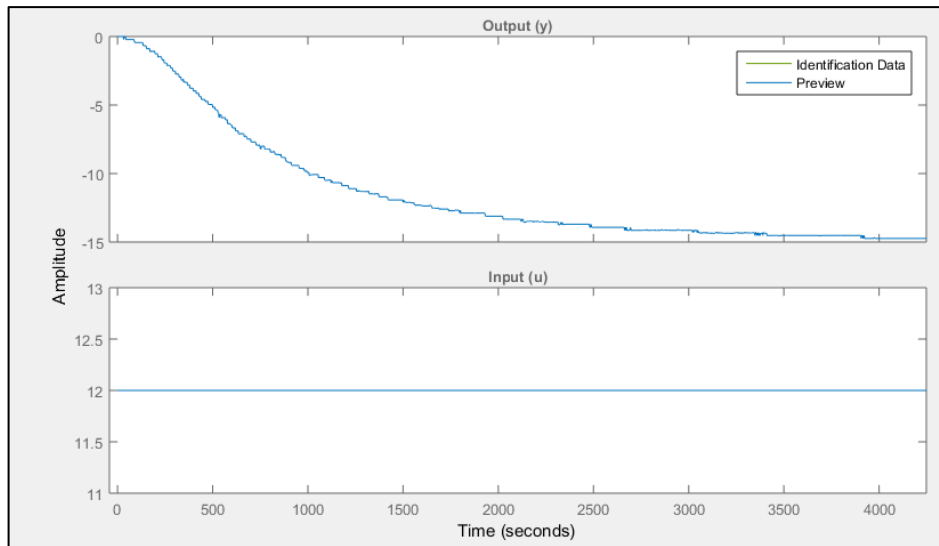
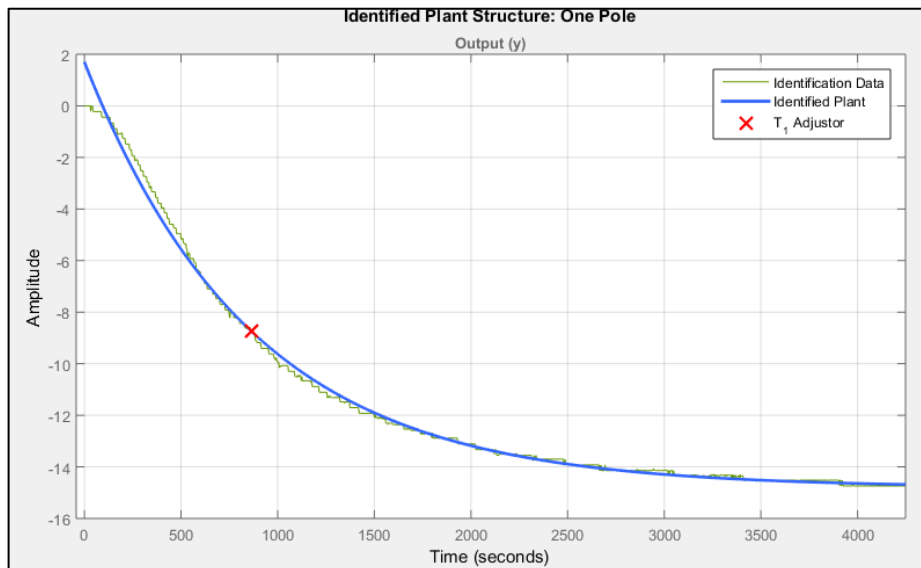


Figura 26: *Identificación de la planta*



Fuente: Autor

Como se aprecia en la figura 26, el modelo matemático calculado, se ajusta muy bien (fit del 94%) a los datos experimentales. Razón por la cual es posible usar un modelo matemático linealizado en un sistema que claramente es no lineal.

La función de transferencia obtenida para una entrada de 12V es:

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + T_{p1}s}$$

$K_p = -1.2334$
 $T_{p1} = 862.42$

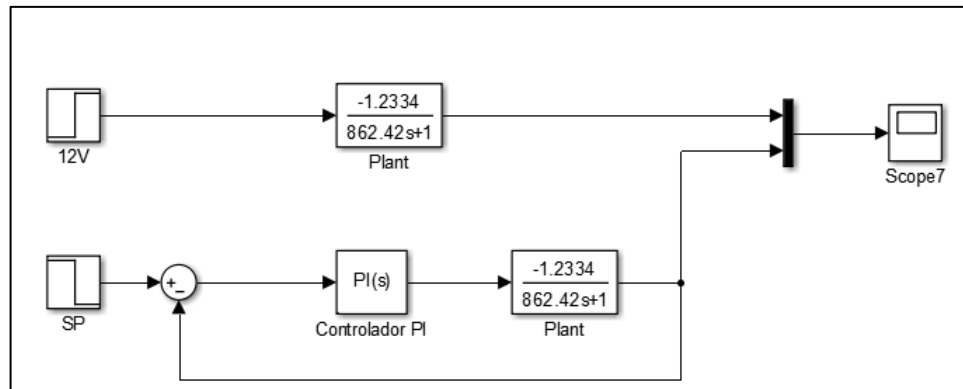
La constante de tiempo τ según la función obtenida es de 862 segundos. El tiempo de establecimiento para que el valor de la respuesta se encuentre en la banda del 2% es 5τ , luego $5 \cdot 862 = 4310$, valor que corresponde a lo observado experimentalmente.

Obtenida la función de transferencia de la planta se hallaron los parámetros del controlador con la herramienta *PID Tuner*, teniendo en cuenta como criterio de sintonización que el overshoot fuera del 0% y que el tiempo de establecimiento en lazo cerrado fuera igual al de lazo abierto (4310 segundos aproximadamente).

Los valores obtenidos fueron: $K_p = -0.6303$ y $k_i = -0.00073086$

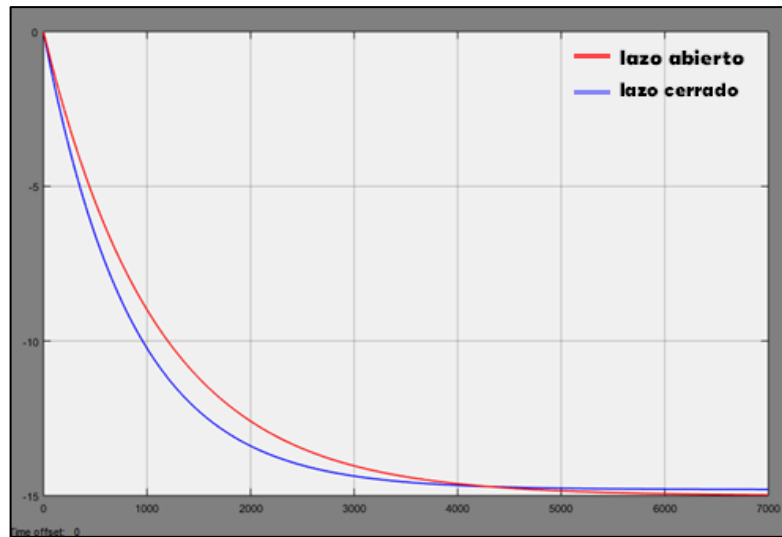
Se utilizó la herramienta *Simulink* para simular la acción del controlador y la respuesta de la planta (Figura 27).

Figura 27: Sistema en lazo abierto y lazo cerrado



En la figura 28 se visualizan las respuestas del sistema en lazo abierto y en lazo cerrado.

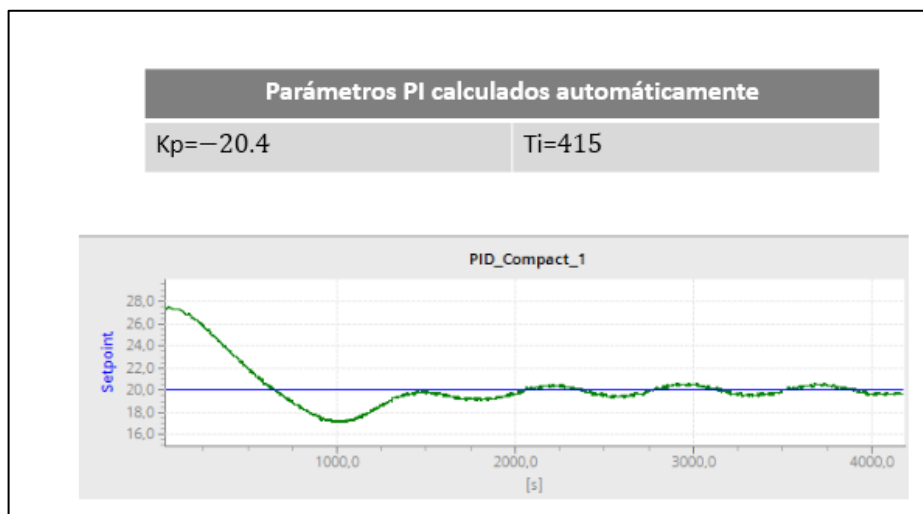
Figura 28: *Respuesta de la planta en lazo abierto y lazo cerrado*



Fuente: Autor

La herramienta PID_COMPACT, tiene la capacidad de calcular de forma automática los parámetros PI que permitan el control de la planta. Esta opción es muy útil, pero en la práctica se debe usar con mucha precaución pues se podrían llegar a causar daños irreparables a los sistemas a controlar. Se hizo uso de esta herramienta para entender cómo funcionaba y para comprobar que las adaptaciones realizadas al refrigerador fuesen las adecuadas para lograr el control de temperatura. En la figura 29 se muestran los valores PI calculados y como es la respuesta en temperatura del refrigerador.

Figura 29: *Parámetros PI y respuesta de la planta*



Fuente: Autor

Se comprueba que el sistema si logra mantener la temperatura en 20°C.

Se procede a realizar las pruebas con las constantes calculadas analíticamente. Se debe tener en cuenta que, para poder ingresar los valores hallados a la ventana de Parámetros PID, se debe tener en cuenta que los algoritmos que implementa el bloque *PID_Compact* corresponden a un regulador 2DOF representado por la ecuación 2, mientras que el algoritmo de la herramienta de sintonización de Matlab es un controlador de forma Paralela, representado por la ecuación 3.

$$y = Kp * s * \left[(b * w - x) + \frac{1}{Ti} (w - x) + \frac{Td*s}{a*Td*s+1} (c * w - x) \right] \quad (2)$$

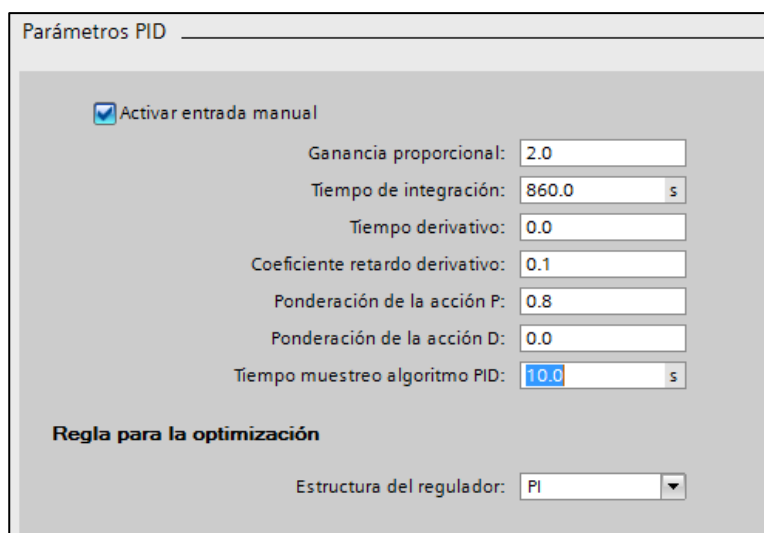
Donde:

<i>y</i>	<i>Valor de salida algoritmo PID</i>
<i>Kp</i>	<i>Ganancia proporcional</i>
<i>s</i>	<i>Operador Laplaciano</i>
<i>b</i>	<i>Ponderación de la acción P</i>
<i>w</i>	<i>Consigna</i>
<i>x</i>	<i>Valor real</i>
<i>Ti</i>	<i>Tiempo de integración</i>
<i>Td</i>	<i>Tiempo derivativo</i>
<i>a</i>	<i>Coeficiente para el retardo de la acción derivativa</i>
<i>c</i>	<i>Ponderación de la acción D</i>
<i>w-x</i>	<i>Error</i>

$$P + I \frac{1}{s} \quad (3)$$

Por lo tanto, al asumir en la ecuación (2) que b=c=1 D=0, se obtiene la ecuación (3), pudiendo de esta forma introducir los parámetros en la ventana de configuración del bloque PID_COMPACT (figura 27).

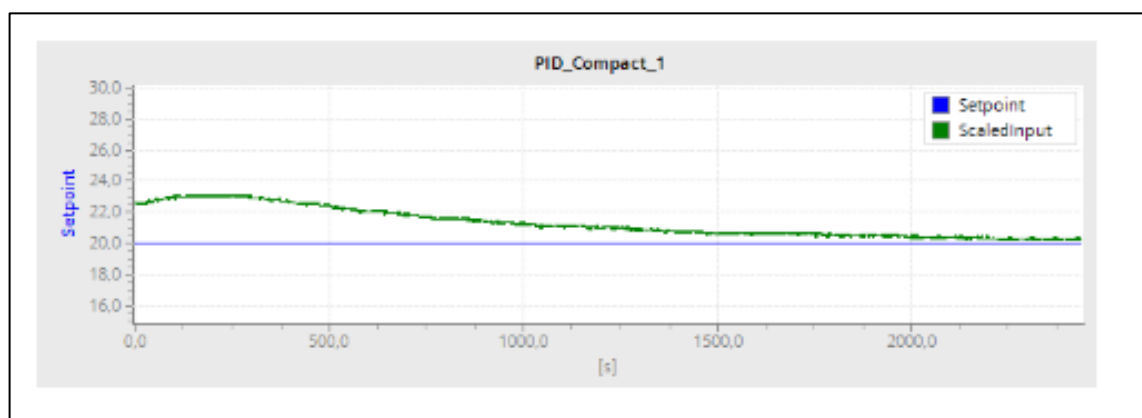
Figura 30: Ventana de configuración de parámetros



Fuente: Autor

La respuesta del sistema con los parámetros PI implementados se muestra en la figura 31. El valor de la constante proporcional P se ajustó experimentalmente para obtener un mejor resultado

Figura 31: Respuesta de la planta



Fuente: Autor

El control de temperatura se realiza de forma adecuada, aun así estos resultados son posibles mejorarlos, si se cambia el relé por una fuente controlada de corriente, ya que tendremos un control más preciso de la corriente que le inyectamos a la celda.

5. CONCLUSIONES

- El laboratorio de metrología del CDT de Gas no dispone de un sistema de control de humedad relativa, no obstante, ésta se mantiene en el rango, $50\pm 10\%$, establecido por la norma ISO/IEC 17025, debido a que la media de Humedad Relativa en Piedecuesta es del 80% y los aires acondicionados absorben entre un 25 y 30% de la Humedad Relativa del ambiente.
- La optimización del sistema de aire acondicionado del laboratorio de metrología del CDT de Gas no fue factible, puesto que por la antigüedad y el estado en que se encuentran los equipos, su manipulación desencadenaría una falla en todo el sistema.
- La implementación del control PID en un refrigerador es posible, siempre y cuando éste funcione con tecnología de estado sólido, ya que para realizar este proceso se requiere encender y apagar repetida y frecuentemente el compresor para controlar el flujo de refrigerante en circulación, y una nevera convencional se averiaría rápidamente con esta acción, debido a que está diseñada para trabajar con un control ON/OFF, que requiere de un tiempo prudencial para que las presiones de alta y de baja se equilibren.
- En el control de temperatura del mini refrigerador lo más conveniente es utilizar, en lugar de un relé, una fuente de corriente para regular la energía que llega a la celda de Peltier y así obtener mejores resultados.

6. BIBLIOGRAFÍA

- CONTRERAS, Edgar; GARCÍA, Eduard. “Diseño y construcción de un laboratorio básico de metrología dimensional como apoyo de la asignatura máquinas térmicas alternativas”. Proyecto de grado para optar el título de ingeniero mecánico. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. 2010. p.21,23
- Decisión 54/39 del Protocolo de Montreal
- FRANKLIN ELECTRIC, ¿Qué es el control PID? Disponible en <https://franklinlinkmx.wordpress.com/2013/09/05/que-es-el-control-pid/>, [Citado en 21 de abril de 2018]
- Ingeniería & Energías Renovables. Seiter srl. Disponible en <<http://es.seitersrl.com/soluciones-servicios:sistemas-hvac-heating-ventilation-air-conditioning>> [Citado en 5 de abril de 2017]
- ISO/IEC 17025:2005. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración. Disponible en: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:17025:ed-2:v1:es>> [Citado en 5 de abril de 2017]
- LABORATORIO DE METROLOGÍA, CIATEQ, Disponible en <http://www.ciateq.mx/servicios-de-laboratorios/51-laboratorio-de-metrologia.html> [Citado en 21 de abril de 2018]
- LJUNG, L. System Identification. Theory for the user. 1999
- Los equipos de aires acondicionados, disponible en: <http://www.aires-acondicionados.info/apaga-y-enciende-muy-seguido-el-aire/>
- MARBÁN, Rocío. PELLECCER, Julio. Metrología para no metrólogos. Organización de los Estados Americanos OEA. Sistema Interamericano de Metrología. Segunda edición. Guatemala 2002. p. 20.

- M. Moreno. Curso 061. Controlador Lógico Programable (PLC). Automation Micromecánica. Disponible en: <http://www.microautomacion.com/capacitacion/Manual061ControladorLgicoProgramablePLC.pdf>
- MIRANDA, Alfredo. Ciclo Termodinámico de Refrigeración. Instituto Politécnico Nacional. Disponible en: http://www.academia.edu/6523000/CICLO_TERMODINAMICO_DE_REFRI GERACION [Citado en 5 de abril de 2017]
- NEWBAL, Carlos. RANGEL, Lizney “Dossier del sistema de aire acondicionado del edificio K de la UPB Seccional Bucaramanga”. Informe de monografía de grado para optar el título de Especialista en Control e Instrumentación Industrial. Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga. Facultad de Ingeniería Electrónica. 2010. p. 25
- Norma ISO/IEC 17025:2005, Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración, Apartado 5.1
- OGATA, Katsuhiko, Ingeniería de Control Moderna, 5 ed. Capítulo 1 p.568
- Organización Serin, Aires acondicionado, disponible en: <http://www.airesacondicionados.com.co/portal/medicion-y-control-de-humedad-relativa.php>
- RODRIGUEZ, Luis. Metrología: Conceptos y Mediciones. Pontifica Universidad Javeriana. Cali. 2001. p.1
- ROLLE, Kurt. Termodinámica. Sexta edición. México. Pearson Prentice Hall. 2006. P. 71
- SIMATIC. S7-1200 1200-1500, Regulación PID, Manual de Funciones
- Sistemas de climatización, Guías de ahorro y eficiencia energética. CIAT Group. Disponible en <https://www.fenercom.com/pages/pdf/informacion/formacion/Sistemas-de-Climatizacion.pdf> [Citado en 5 de abril de 2017]

- SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO CERRADO, WIKITECA, Disponible en <https://www.wikiteka.com/apuntes/sistemas-de-control-en-lazo-cerrado/> [Citado en 21 de abril de 2018]
- Tiempo y temperatura, Disponible en: <http://tiempoytemperatura.es/colombia/piedecuesta.html#por-dias>
- ZÚÑIGA, Ignacio; LÓPEZ. Meteorología y climatología. Editorial UNED. p.76