



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Modelación y control de sistema de refrigeración
doméstica**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico - Eléctrico

Juan Carlos Arrasco Oblitas

**Asesor(es):
Dr. Ing. José José Manrique Silupú**

Piura, agosto de 2023



Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Juan Carlos Arrasco Oblitas, egresado del Programa Académico de Ingeniería Mecánica - Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI N° 73032253.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor del trabajo final titulado:
"Modelación y control de sistema de refrigeración doméstica"
El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis¹ para optar el Título profesional² de Ingeniero Mecánico - Eléctrico.
2. Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.
 - Juan Carlos Arrasco Oblitas, identificado con DNI N° 73032253
3. La asesoría del trabajo estuvo a cargo de:
 - Dr. Ing. José José Manrique Silupú, identificado con DNI N° 44235652
4. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros o de ser el caso derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
5. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
6. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
7. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad de Piura.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: 18/08/2023.



.....
Firma del autor optante³

¹ Indicar si es tesis, trabajo de investigación, trabajo académico o trabajo de suficiencia profesional.

² Grado de Bachiller, Título profesional, Grado de Maestro o Grado de Doctor.

³ Idéntica al DNI; no se admite digital, salvo certificado.



Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que, con su apoyo, contribuyeron al desarrollo y culminación de esta tesis.

En primer lugar, agradezco a Dios, cuya presencia y guía han sido esenciales en cada paso de esta ardua labor académica.

Agradezco de corazón a mi familia, quienes han sido mi mayor fuente de inspiración y apoyo incondicional.

Mi más profundo agradecimiento a mi asesor, por su invaluable dedicación y conocimiento compartido. Su orientación y paciencia han sido fundamentales para la culminación exitosa de este trabajo.





Resumen

La tesis se enfocó en el modelado y control de sistemas de aire acondicionado del Laboratorio de Sistemas Automáticos de Control (SAC) de Ingeniería Mecánica Eléctrica UDEP. Se ha desarrollado un modelo matemático basado en balances de energía para analizar detalladamente la temperatura en la sala de tesis del laboratorio de SAC. El propósito principal fue evaluar el nivel de confort de las personas en dicho espacio y estudiar cómo la temperatura ambiente afecta la temperatura interior. Para validar la precisión del modelo, se recolectó y utilizó data real correspondiente a un período de 12 horas de funcionamiento del equipo de aire acondicionado. Asimismo, se han diseñado dos estrategias de control: una de tipo ON-OFF, ampliamente empleada en edificaciones en el Perú, y otra de tipo PID, la cual es ampliamente reconocida y utilizada en la industria a nivel mundial. En la fase de comparación entre ambas estrategias de control durante un lapso de 12 horas, se llevaron a cabo experimentos con setpoints constantes, así como frente a cambios inesperados, como el incremento de la cantidad de personas en el entorno o la apertura de puertas, situaciones que pueden afectar el ambiente en estudio. Los resultados obtenidos demuestran de manera concluyente que el controlador PID muestra un seguimiento de la temperatura deseada de mayor precisión. Además, se observó que la variable controlada (frecuencia del compresor) presenta una respuesta más suave en comparación con el control ON-OFF, lo que se traduce en un mejor cuidado y funcionamiento del compresor. Este enfoque representa un avance importante en el campo del control de sistemas HVAC&R, permitiendo un funcionamiento más eficiente y un mayor confort para los usuarios.

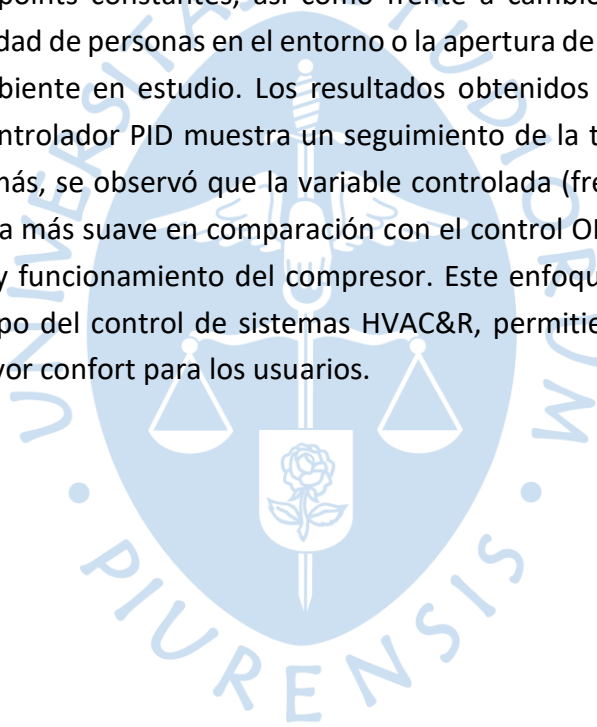
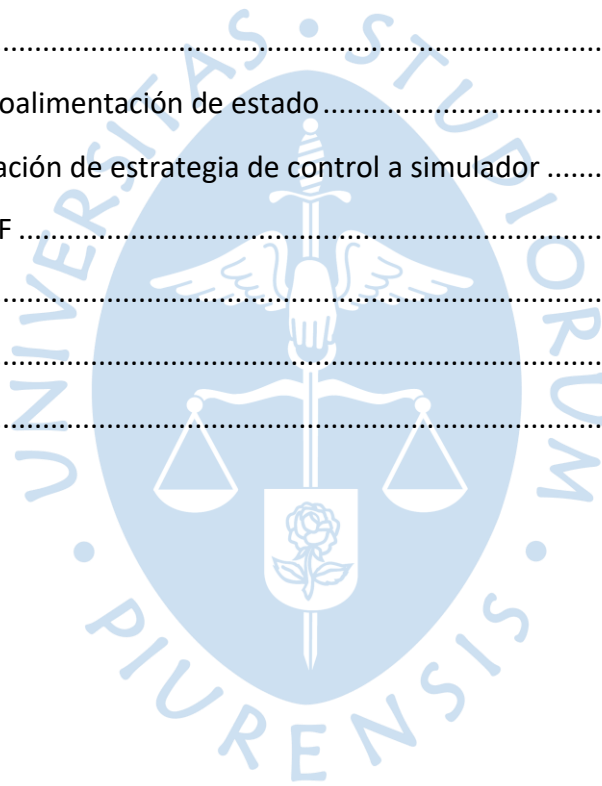




Tabla de contenido

Introducción	13
Capítulo 1 Sistema de aire acondicionado	15
1.1 Sistema de aire acondicionado.....	15
1.2 Clasificación	16
1.2.1 Según características constructivas y de funcionamiento	16
Capítulo 2 Modelación matemática de sistema de aire acondicionado.....	23
Capítulo 3 Diseño de estrategia de control.....	31
3.1 Control ON-OFF	31
3.2 Control PID.....	33
3.3 Control de retroalimentación de estado.....	33
Capítulo 4 Implementación de estrategia de control a simulador	35
4.1 Control ON-OFF	35
4.2 Control PID.....	40
Conclusiones.....	53
Referencias.....	55





Lista de figuras

Figura 1 Sistemas de aire acondicionado para habitaciones individuales.....	17
Figura 2 Sistemas de aire acondicionado de refrigeración por evaporación.....	18
Figura 3 Operatividad de la rueda desecante	19
Figura 4 Sistemas de aire acondicionado de almacenamiento térmico	20
Figura 5 Sistemas de aire acondicionado para acondicionamiento de espacios.....	21
Figura 6 Modelo de sistema de refrigeración	24
Figura 7 Plano del sistema de aire acondicionado.....	25
Figura 8 Vista de una parte lateral del ambiente.....	26
Figura 9 Vista de las paredes del fondo del Laboratorio S.A.C.	27
Figura 10 Vista de las paredes laterales del Laboratorio S.A.C.	27
Figura 11 Modelo de refrigeración.....	28
Figura 12 Simulación a lazo abierto del modelo de refrigeración	29
Figura 13 Regulación de la capacidad del sistema usando el sistema ON-OFF	32
Figura 14 Estrategia de control del tipo ON-OFF	35
Figura 15 Temperatura ambiente	35
Figura 16 Comportamiento del controlador ON-OFF	36
Figura 17 Comportamiento del controlador ON-OFF en el tiempo de 300 min y 400 min	37
Figura 18 Cambio de referencia en el comportamiento del controlador ON-OFF	38
Figura 19 Disturbio en el minuto 500 en el comportamiento del controlador ON-OFF.....	39
Figura 20 Comportamiento del controlador ON-OFF a 25°C.....	40
Figura 21 Control PID según la temperatura ambiente	41
Figura 22 Control PID	42
Figura 23 SIMULINK.....	44
Figura 24 Comportamiento del control PID según los parámetros establecidos	45
Figura 25 Comportamiento del control PID con el saturador	46
Figura 26 Comportamiento del control PID según nuevos parámetros	47
Figura 27 Comportamiento del control PID con aumentos de la temperatura ambiente	48
Figura 28 Disturbio en el minuto 500 en el comportamiento del control PID	49
Figura 29 Comparación de los dos controladores.....	50

Figura 30 Disturbio en el controlador ON-OFF y PI.....	51
Figura 31 Variable manipulable ON-OFF y PI	51
Figura 32 Controlador ON-OFF y PI para la variable disturbio.....	52
Figura 33 Controlador ON-OFF y PI para la variable manipulable	52



Introducción

Con el transcurrir del tiempo el nivel de vida en general ha ido elevándose, convirtiendo en muchos casos a la climatización en viviendas y edificios, en una necesidad que permita satisfacer requerimientos de confort de sus ocupantes lo que conlleva, de manera evidente, a que los mismos puedan tener una mayor satisfacción. Asimismo, en otros casos, la climatización se convierte en un equipamiento esencial del edificio para dar cumplimiento a la función intrínseca de este (Díaz et al., 2020). Según Naidu y Rieger (2011) se ha informado que el consumo energético debido a los sistemas HVAC&R, es un acrónimo que significa “Calefacción, Ventilación, Aire acondicionado y Refrigeración” en español, en edificios comerciales e industriales, constituye casi la mitad del consumo mundial total de energía.

Por otro lado, Li et al. (2020) afirman que los sistemas HVAC&R deben tener una especial atención puesto que representan una gran parte del consumo energético de los edificios. Lo mismo afirma Díaz et al. (2020) quienes mencionan que representan uno de los costes energéticos más importantes del edificio, superior al gasto que genera la iluminación y demás consumos eléctricos del edificio.

Fasiuddin y Budaiwi (2011), señalan que con la selección y el funcionamiento apropiado de los sistemas HVAC se puede llegar a tener hasta un 25% de ahorro de energía mientras se mantiene un satisfactorio ambiente interno.

Para que un sistema HVAC funcione de manera eficiente se hace necesario tener adecuados parámetros de optimización y sistema de control. Es mucho más sostenible y rentable mejorar los algoritmos de control para lograr una mayor eficiencia que reemplazar los equipos HVAC con tecnologías modernas más eficientes (Rahman et al., 2010).

Como ya se ha mencionado anteriormente, aquellos, forman parte cada vez más de los requerimientos básicos de una edificación puesto que cumplen un papel fundamental en la comodidad de las personas, por lo que una óptima y adecuada aplicación de estrategias de control en los sistemas HVAC&R es clave para lograr una mejora en la eficiencia energética.



Capítulo 1

Sistema de aire acondicionado

El sistema de Aire acondicionado es un proceso integral que desempeña diversas funciones de manera simultánea. Su finalidad principal es acondicionar el aire, transportarlo y distribuirlo en el espacio designado. Además, proporciona tanto refrigeración como calefacción, ya sea a través de una unidad central o mediante unidades instaladas en el techo. Se encarga de regular y mantener los parámetros ambientales dentro de límites preestablecidos para garantizar el confort y la salud de los ocupantes, así como cumplir con los requisitos de procesamiento de productos. HVAC&R significa: calefacción, ventilación, aire acondicionado y refrigeración, engloba una serie de procesos interrelacionados que trabajan en conjunto para brindar confort y control climático en diversos espacios. Esta denominación global, ampliamente utilizada en el sector, refleja la evolución y complejidad de los sistemas de climatización modernos, los cuales integran múltiples funciones para asegurar condiciones óptimas de bienestar y eficiencia energética en entornos residenciales, comerciales e industriales (Miller y Miller, 2011).

1.1 Sistema de aire acondicionado

Según McQuiston et al.,(2004) consta de una secuencia de componentes y equipos diseñados para cumplir varias funciones relacionadas con el acondicionamiento del aire. Estos componentes trabajan en conjunto para regular el aire, transportarlo hacia el espacio que se desea acondicionar y controlar los parámetros ambientales internos dentro de los límites establecidos. Algunas de las funciones más resaltantes son:

Proporcionar la energía de refrigeración y calefacción necesaria.

- Acondicionar el aire de suministro mediante diferentes procesos, como la calefacción o refrigeración para ajustar la temperatura, la humidificación o deshumidificación para controlar la humedad, la limpieza y purificación, y la reducción de ruido para mitigar cualquier sonido molesto generado por los equipos.
- Distribuir el aire de manera efectiva, asegurándose de que contenga una cantidad adecuada de aire exterior, hacia el espacio acondicionado. Esto garantiza una adecuada ventilación y renovación del aire, proporcionando un ambiente saludable y confortable para los ocupantes del espacio.
- Controlar y mantener los diferentes parámetros ambientales en el espacio acondicionado (temperatura, el nivel de sonido, la diferencia de presión con el entorno circundante, etc.).

La selección y disposición de sus componentes se determinan considerando diversos factores, como el tamaño y la ocupación del espacio acondicionado, los parámetros ambientales a controlar, la calidad y eficiencia del control, y los costos involucrados. Estos

aspectos son cruciales para elegir los componentes adecuados y establecer su disposición óptima en el sistema. Asimismo, es relevante aspectos del entorno, como el tamaño del espacio, la cantidad de personas y las necesidades de climatización, con el fin de lograr un equilibrio entre el rendimiento, la eficiencia energética y la comodidad de los usuarios. Asimismo, la calidad del control desempeña un papel fundamental para asegurar que los parámetros ambientales se mantengan dentro de los límites preestablecidos de manera precisa y confiable. Por último, el aspecto económico también es considerado al seleccionar los componentes y la disposición del sistema, buscando una solución eficiente y rentable sin comprometer la calidad del ambiente acondicionado.

1.2 Clasificación

1.2.1 Según características constructivas y de funcionamiento

1.2.1.1 Sistemas de aire acondicionado para habitaciones individuales. También conocidos como sistemas individuales, se caracterizan por utilizar unidades independientes y autónomas, como acondicionadores de aire de habitación individual, terminales empaquetadas, unidades divididas interiores y exteriores separadas, o bombas de calor. Las bombas de calor, en particular, extraen calor de una fuente y lo liberan al aire o al agua a una temperatura más alta para proporcionar calefacción. A diferencia de otros sistemas de aire acondicionado, estos sistemas suelen utilizar una unidad o unidades completamente independientes en cada habitación (Maximiliano, 2022).

Se clasifican en:

Aire acondicionado de habitación (montado en ventana).

Acondicionador de aire terminal compacto (PTAC), instalado en un manguito a través de la pared exterior.

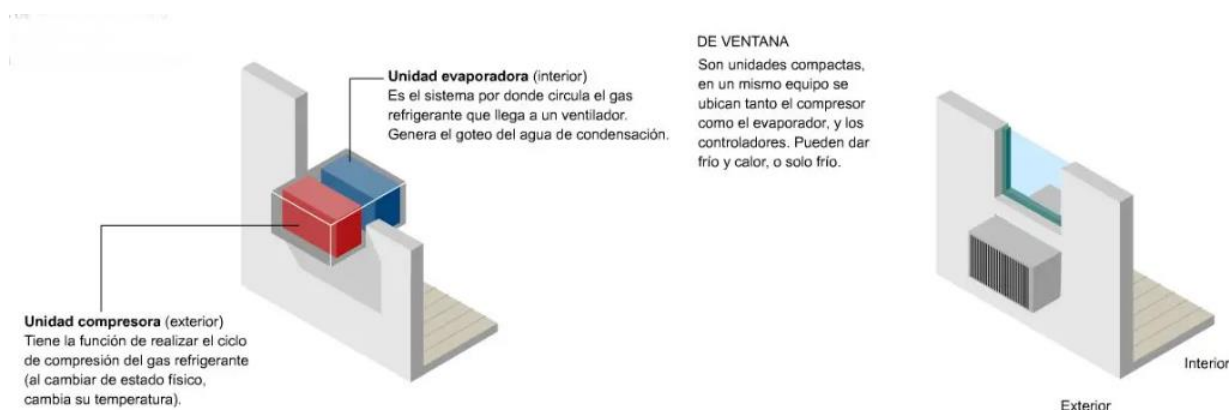
Los componentes principales ensamblados en fábrica y listos para usar incluyen lo siguiente: Un ventilador evaporador presuriza y suministra el aire acondicionado al espacio. En el serpentín de tubo y aleta, el refrigerante se evapora, se propaga directamente dentro de los tubos y absorbe la energía térmica del aire ambiente durante la temporada de enfriamiento; se llama bobina de expansión directa (DX). Cuando el refrigerante caliente libera energía térmica al espacio acondicionado durante la temporada de calefacción. Un filtro de aire elimina las partículas en el aire. Un compresor comprime el refrigerante desde una presión de evaporación más baja a una presión de condensación más alta. Un condensador licua el refrigerante de gas caliente a líquido y rechaza el calor a través de un serpentín y un ventilador de condensador. Un sistema de control de temperatura detecta la temperatura del aire del espacio (sensor) y enciende o detiene el compresor para controlar su capacidad de refrigeración y calefacción a través de un termostato.

La diferencia entre un acondicionador de aire de habitación y una bomba de calor de habitación, y un acondicionador de aire terminal compacto y una bomba de calor terminal compacta, es que se agrega una válvula inversora de cuatro vías a todas las bombas de calor de habitación. A veces, los acondicionadores de aire de las habitaciones se separan en dos unidades divididas: una unidad de condensación exterior con compresor y condensador, y un controlador de aire interior para tener el controlador de aire en una ubicación más ventajosa y reducir el ruido del compresor en el interior.

Se caracterizan por el uso de una batería DX para una habitación individual. La mayoría de los sistemas individuales no emplean conductos de conexión. El aire exterior se introduce a través de una abertura o a través de una pequeña compuerta de aire. Los sistemas individuales generalmente se usan solo para la zona perimetral del edificio, ver figura 1.

Figura 1

Sistemas de aire acondicionado para habitaciones individuales



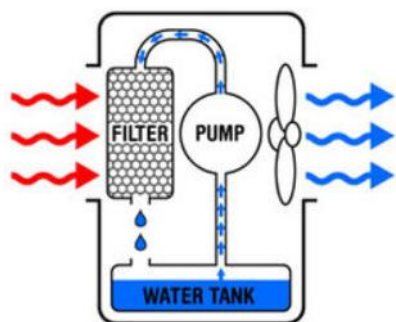
Nota. Díaz et. Al (2020)

1.2.1.2 Sistemas de aire acondicionado de refrigeración por evaporación. Según Vargas y García, (2020), este tipo de sistema utiliza el efecto de enfriamiento de la evaporación del agua líquida para enfriar una corriente de aire directa o indirectamente. Podría ser una unidad empaquetada ensamblada en fábrica o un sistema construido en campo. Cuando un enfriador evaporativo proporciona sólo una parte del efecto de enfriamiento, entonces se convierte en un componente de un sistema hidrónico central o de una unidad empaquetada.

Asimismo, consta de una cámara de admisión, filtro(s), ventilador de suministro, intercambiador de calor de contacto directo o indirecto, ventilador de escape, rociadores de agua, bomba de recirculación de agua y sumidero de agua. Los sistemas de enfriamiento por evaporación se caracterizan por un bajo consumo de energía en comparación con el enfriamiento por refrigeración.

Figura 2

Sistemas de aire acondicionado de refrigeración por evaporación



Nota. Fission Engineering (2018)

1.2.1.3 Sistemas de aire acondicionado a base de desecante. Un desecante es una sustancia que tiene la capacidad de absorber y eliminar la humedad del aire circundante. Este tipo de tecnología utiliza una sustancia desecante, como sílice gel o zeolita, para eliminar la humedad del aire antes de enfriarlo y distribuirlo en el espacio interior. Un sistema de aire acondicionado basado en desecante es un sistema en el que el enfriamiento latente se realiza por deshumidificación por desecante y el enfriamiento sensible por enfriamiento evaporativo o refrigeración. Por lo tanto, una parte considerable de la costosa refrigeración por compresión de vapor se reemplaza por enfriamiento evaporativo económico. Además, suele ser un sistema híbrido de deshumidificación, enfriamiento por evaporación, refrigeración y regeneración de desecante (Pariona, 2020).

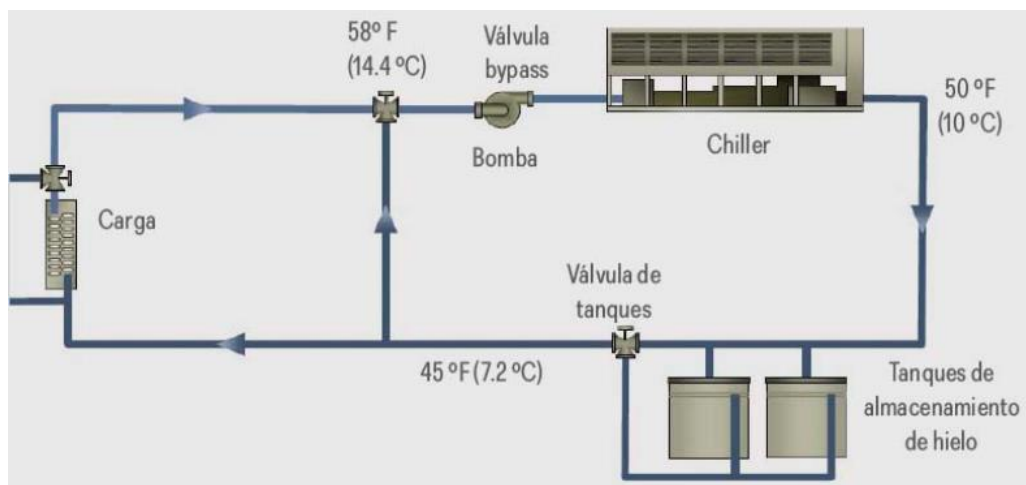
Hay dos corrientes de aire en un sistema de aire acondicionado basado en desecante: una corriente de aire de proceso y una corriente de aire regenerativa. El aire de proceso puede ser todo aire exterior. El aire de proceso también es aire acondicionado que se suministra directamente al espacio acondicionado o al proceso de fabricación cerrado, o a la unidad de tratamiento de aire (AHU), la unidad compacta (PU) o la terminal para su posterior tratamiento. La corriente de aire regenerativa es una corriente de aire de alta temperatura que se utiliza para reactivar el desecante.

Un sistema de aire acondicionado basado en desecante consta de los siguientes componentes: deshumidificadores desecantes rotativos, intercambiadores de calor de tubería de calor, enfriadores evaporativos directos o indirectos, serpentines DX y unidad de compresión de vapor o serpentines y enfriadores de agua, ventiladores, bombas, filtros, controles, conductos y tuberías.

Figura 3*Operatividad de la rueda desecante**Nota.* H2O TEK (2015)

1.2.1.4 Sistemas de aire acondicionado de almacenamiento térmico. Un sistema de aire acondicionado de almacenamiento térmico o simplemente un sistema de almacenamiento térmico, los compresores de refrigeración accionados por electricidad funcionan durante las horas de menor actividad. El agua refrigerada almacenada o el hielo almacenado en tanques se utilizan para proporcionar refrigeración en los edificios durante las horas pico cuando están en vigor altos cargos por demanda eléctrica y tarifas de energía eléctrica. Un sistema de almacenamiento térmico reduce la alta demanda eléctrica de HVAC&R y cambia parcial o totalmente las altas tarifas de energía eléctrica de las horas pico a las horas valle (Díaz Torres et al., 2020).

Además, es un sistema de aire acondicionado central que utiliza agua enfriada como medio de enfriamiento. Además de los sistemas de control de aire, agua y refrigeración, existen tanques de agua fría o tanques de almacenamiento de hielo, bombas de circulación de almacenamiento y controles.

Figura 4*Sistemas de aire acondicionado de almacenamiento térmico*

Nota. Campos (2019)

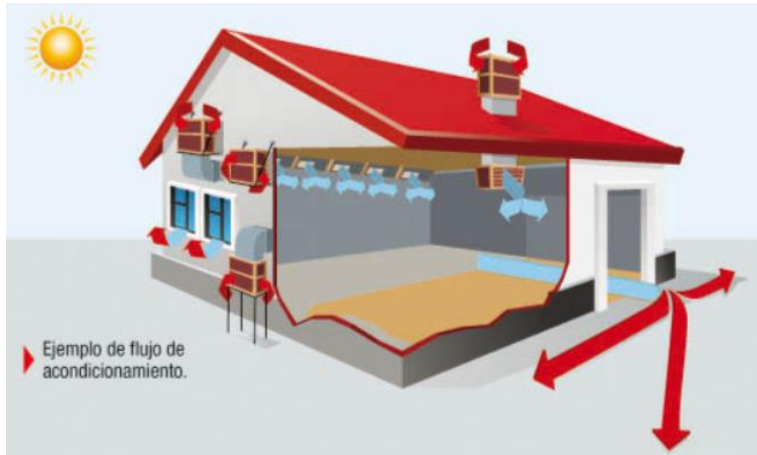
1.2.1.5 Sistemas de aire acondicionado para acondicionamiento de espacios. Los sistemas de aire acondicionado para acondicionamiento de espacios también se denominan sistemas de aire acondicionado para espacios. Tienen enfriamiento, deshumidificación, calefacción y filtración realizados predominantemente por fancoils, bombas de calor de fuente de agua u otros dispositivos dentro o sobre el espacio acondicionado, o muy cerca de él. Un fancoil consta de un pequeño ventilador y un serpentín. Una bomba de calor de fuente de agua generalmente consta de un ventilador, un serpentín con aletas para acondicionar el aire y un serpentín de agua para rechazar calor a un circuito de agua durante el enfriamiento o para extraer calor del mismo circuito de agua durante el calentamiento. Los fancoils individuales o múltiples siempre se utilizan para dar servicio a una sola habitación acondicionada (Díaz et al., 2020).

Además, tienen sólo conductos de suministro cortos dentro del espacio acondicionado, y no hay conductos de retorno, excepto las bombas de calor de fuente de agua de núcleo grande. La mayor parte de la energía necesaria para transportar el aire de retorno y recirculación se ahorra en un sistema de aire acondicionado espacial, en comparación con un paquete unitario o un sistema de aire acondicionado hidrónico central. Los sistemas de aire acondicionado de espacios generalmente se emplean con un sistema de aire de ventilación exterior dedicado (separado) para proporcionar aire exterior a los ocupantes del espacio acondicionado.

Los sistemas de aire acondicionado de los espacios a menudo tienen un nivel de ruido comparativamente más alto y necesitan un mantenimiento más periódico dentro del espacio acondicionado.

Figura 5

Sistemas de aire acondicionado para acondicionamiento de espacios



Nota. Mundo HVAC & R (2015)



Capítulo 2

Modelación matemática de sistema de aire acondicionado

Permitirá observar la variación tanto de la temperatura en un determinado lugar. Para la realización de un modelo matemático se tiene en cuenta los siguientes pasos:

- Se calcula y formula las ecuaciones que rigen el sistema de acondicionamiento de aire empleando los balances de energía, en base a los mecanismos de control de temperatura del sistema.
- Se introducen las constantes del sistema que se va a estudiar, así como los datos pertenecientes a la temperatura.
- Se procede a validar el modelo a través de la comparación entre los datos reales y los arrojados por el modelo.

Para mantener las condiciones requeridas en el ambiente se hace necesario que se realice un intercambio energético que se lleva a cabo mediante un equipo acondicionador, dicho equipo es el encargado de extraer calor. El balance térmico permite determinar tanto la capacidad como el desarrollo de la instalación de los equipos de aire acondicionado y se puede calcular mediante la ecuación (1):

$$VC_p\rho \frac{dT_{\text{room}}}{dt} = Q_{\text{Cooling}} - Q_{\text{AC}} \quad (1)$$

Donde:

V: volumen [m³].

c_p: calor específico [W/(kg.K)].

ρ: densidad [kg/m³].

T_{room}: temperatura del aire interior [°C].

Q_{Cooling}: carga total de refrigeración del edificio [W].

Q_{AC}: potencia de refrigeración (valor negativo) [W].

De donde se tiene:

$$VC_p\rho \frac{dT_{\text{room}}}{dt} = (UA)_{\text{amb}}(T_{\text{amb}} - T_{\text{room}}) + Q_{\text{human}} + Q_{\text{eq}} + Q_{\text{lum}} - [A * f + B]$$

Donde:

UA: Coeficiente relacionado con el área y la resistencia térmica de la envolvente del edificio.

T_{amb} : Temperatura ambiente [°C].

T_{room} : Temperatura del aire interior [°C].

Para mantener estable la temperatura del aire interior es necesario regular la potencia de refrigeración (Q_{AC}) para que pueda coincidir con la carga total de refrigeración ($Q_{Cooling}$). Es por ello que es necesario calcular Q_{AC} mediante la ecuación (2).

$$Q_{AC} = A * f + B \quad (2)$$

Donde:

f : Frecuencia del compresor.

A, B: coeficientes relevantes proporcionados por los fabricantes.

El sistema de aire acondicionado al que se realizará la modelación matemática es el (figura 6), así como, el plano del sistema se muestra en la figura 7.

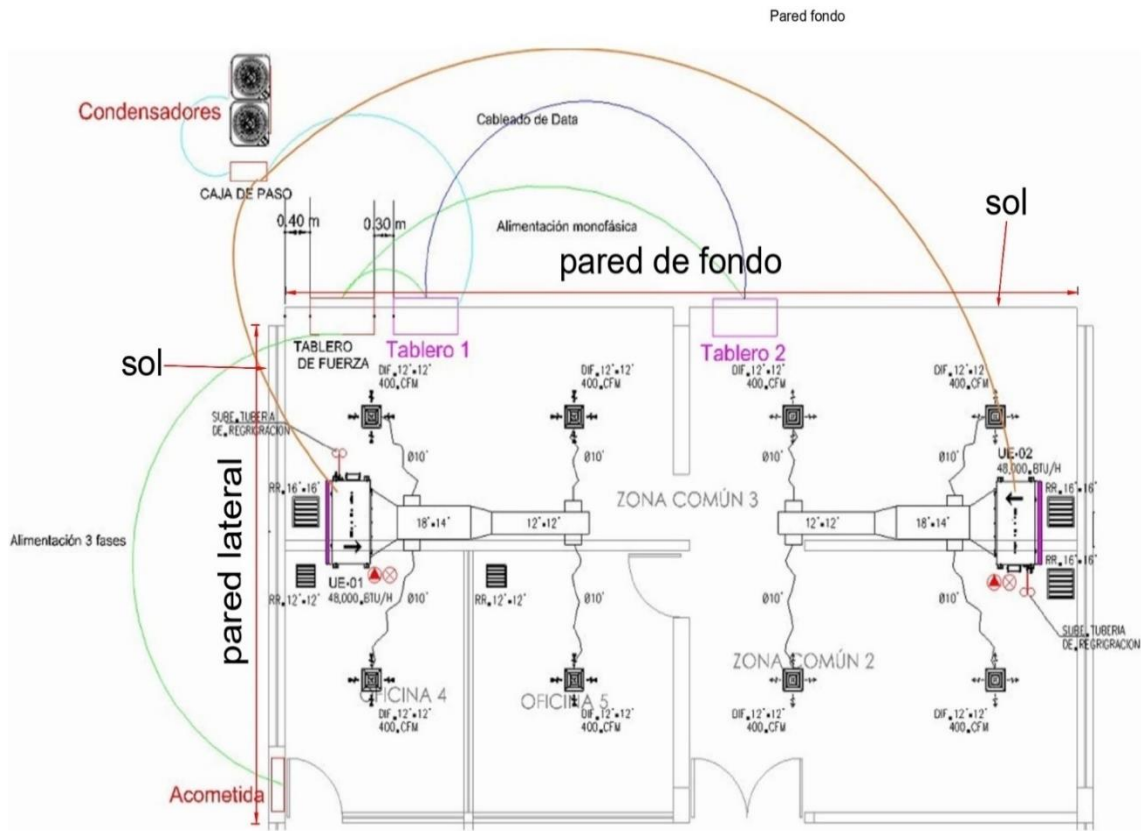
Figura 6

Modelo de sistema de refrigeración



Figura 7

Plano del sistema de aire acondicionado



Tomando los siguientes valores:

$$C_p = 1005 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}; \rho = 1.1567 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; U = \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$$

Haciendo un análisis de unidades, se tiene:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{K}{J} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} * \text{m}^2 * \text{K} + \text{W} - \text{W} \right]$$

$$\frac{dT}{dt} = \left[\frac{\text{K}}{\text{J}} \right] [\text{W}] = \frac{\text{K}}{\text{J}} * \frac{\text{J}}{\text{s}} = \frac{\text{K}}{\text{s}}$$

Donde según Carrier. Manual del Aire Acondicionado. 2009, Parte 1, c.7, p. 1-69, se obtuvo el valor de Q_{human} :

$$Q_{\text{human}} = 139 \text{ W (1 persona)}$$

Tomando a 10 personas en el recinto se obtiene el valor total de 1390 W, como se muestra a continuación:

$$Q_{\text{human}} |_{\text{Total}} = 1390 \text{ W}$$

Siguiendo los parámetros según la curva de enfriamiento que se ha tomado por 24 horas en la sala de reuniones de SAC, podemos determinar:

$$Q_{ac} = 50 * f + 700$$

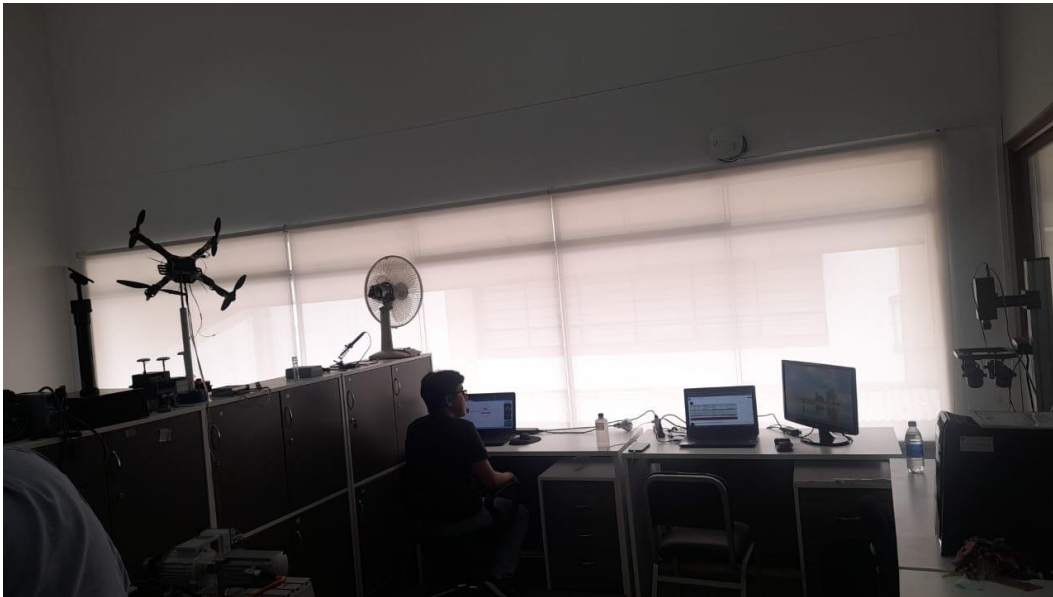
Se obtuvo las unidades de la vista lateral del ambiente, las cuales se muestran en la siguiente ecuación y la figura 8:

$$V = 4.5 * 7.05 * 12.4 = 393.39 \text{ m}^3$$

$$V \approx 395 \text{ m}^3$$

Figura 8

Vista de una parte lateral del ambiente



En las figuras 9 y 10 se pueden ver las paredes laterales y del fondo del ambiente del laboratorio Sac, y en la siguiente ecuación se detalla el cálculo del área del ambiente:

$$\text{Área}_{\text{ambiente}} = \text{paredes laterales} + \text{pared del fondo}$$

$$\text{Área}_{\text{ambiente}} = (4.5 * 7.05) * 2 \text{ m}^2 + (4.5 * 12.4) \text{ m}^2$$

$$\text{Área}_{\text{ambiente}} = 63.45 \text{ m}^2 + 55.8 \text{ m}^2$$

$$\text{Área}_{\text{ambiente}} = 119.25 \text{ m}^2$$

Figura 9

Vista de las paredes del fondo del Laboratorio S.A.C.

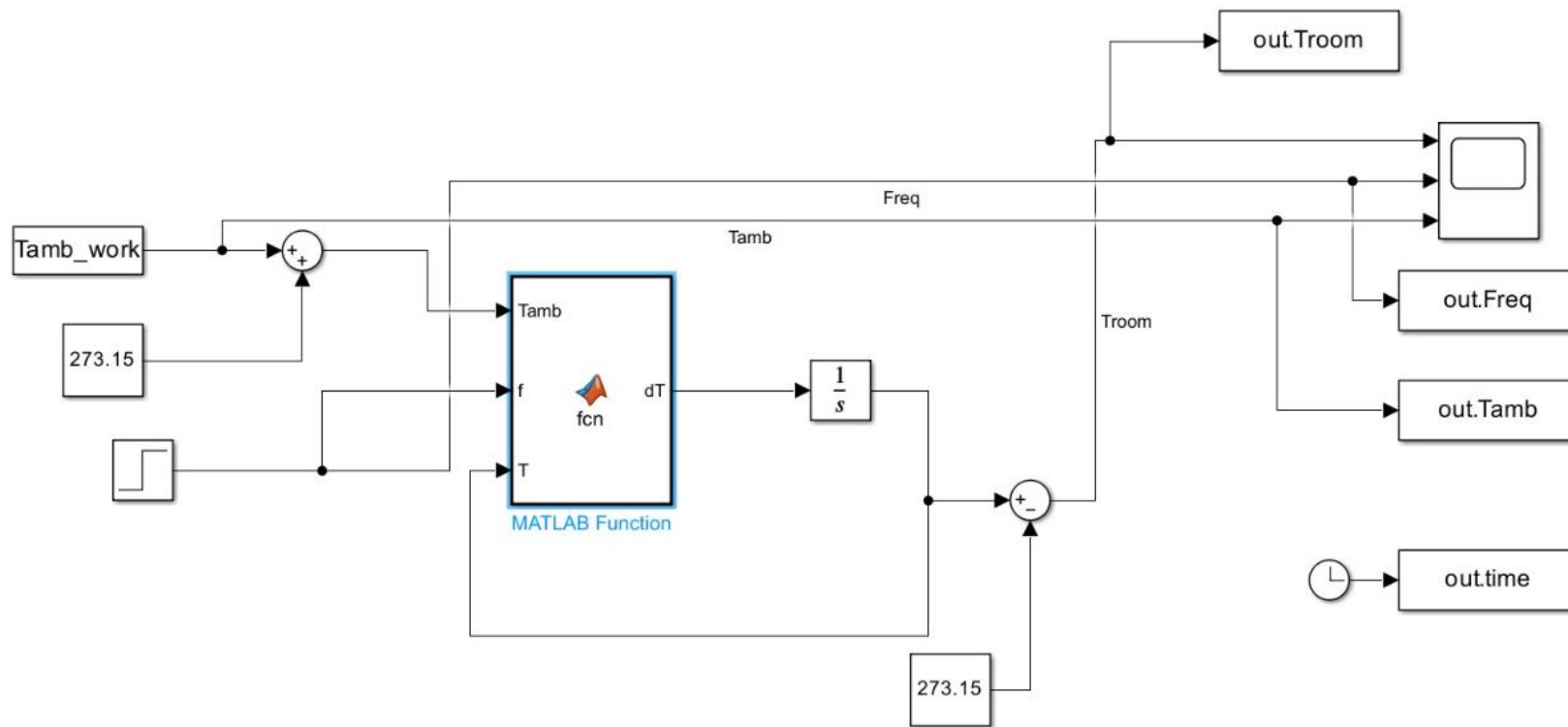
**Figura 10**

Vista de las paredes laterales del Laboratorio S.A.C.



En base a lo anterior mencionado, el modelo implementado en el software MATLAB-SIMULINK de refrigeración es el siguiente:

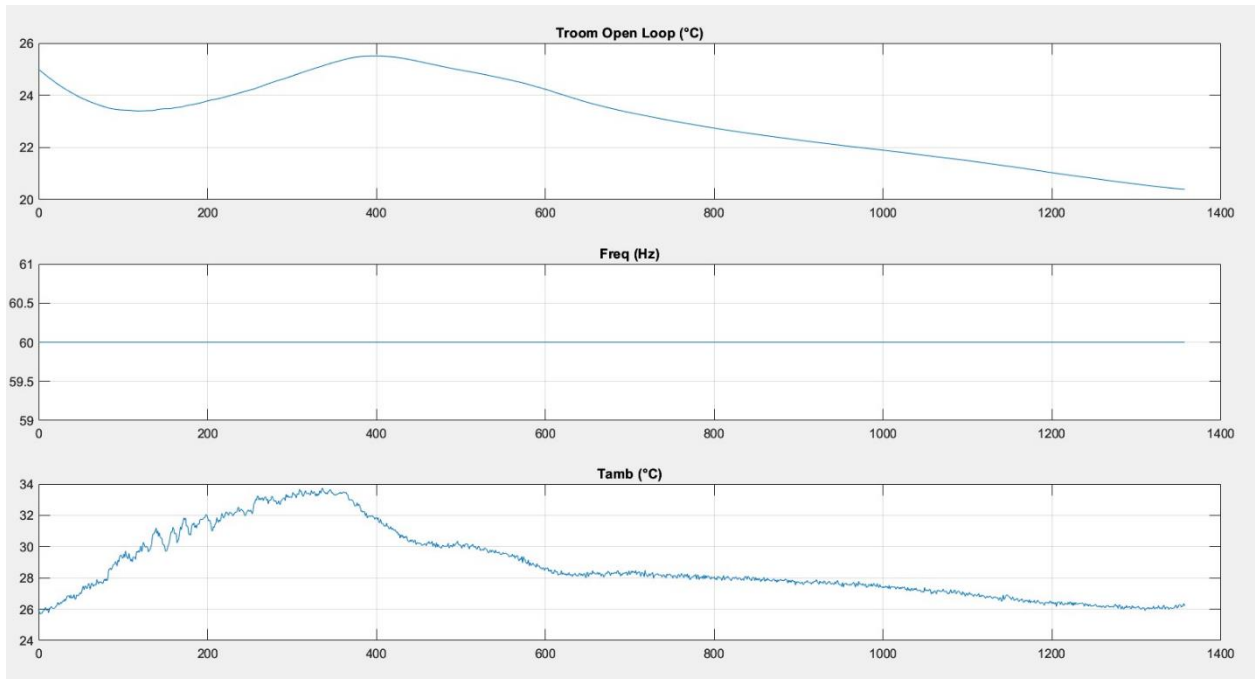
Figura 11

Modelo de refrigeración

Así mismo la simulación a lazo abierto del modelo, validado con la curva de enfriamiento de la sala de tesis del laboratorio de SAC por 24 horas, se muestra en la Figura 12.

Figura 12

Simulación a lazo abierto del modelo de refrigeración



Nota. Tiempo en minutos



Capítulo 3

Diseño de estrategia de control

Un sistema de control de temperatura es esencial para asegurar un ambiente confortable en edificios y, al mismo tiempo, optimizar su eficiencia. La temperatura adecuada y constante es un factor clave para proporcionar un entorno agradable en hogares, oficinas, centros comerciales y otras instalaciones, lo que contribuye al bienestar y productividad de las personas que los ocupan.

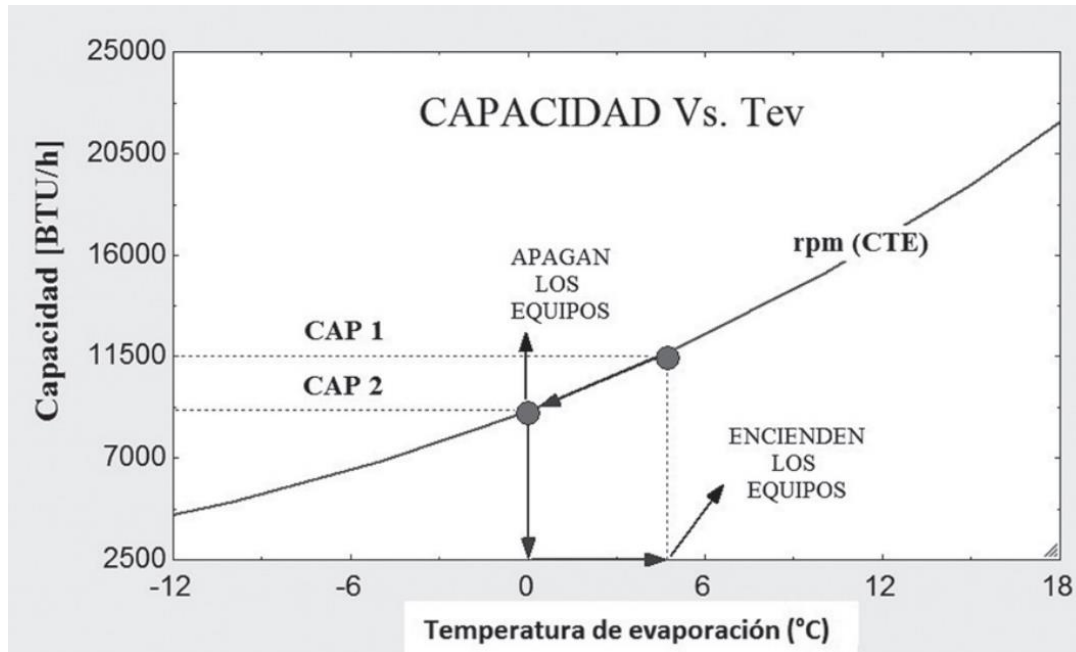
Dentro de los esquemas de control, en el Perú, el más usado y común de implementar es el control ON-OFF, quien establece los períodos de funcionamiento del compresor. No obstante, según Unezaki et al. (2005) existen otros esquemas como el control de velocidad o el control continuo del compresor los cuales arrojan un mejor desempeño en el control de los sistemas de refrigeración. Para que un sistema de refrigeración se pueda regular se necesita principalmente de dos acciones: mantener la temperatura de evaporación constante, esto quiere decir que el ambiente refrigerado posea una temperatura constante, y que la capacidad de refrigeración que posea el equipo se ajuste a la carga. Para el cumplimiento de dichos objetivos, se recurre a estrategias que permiten tener un control en los sistemas de refrigeración, dentro de las cuales se tiene:

3.1 Control ON-OFF

Gelvéz-Arocha et al. (2012) afirma que, en esta estrategia de control es el intermitente funcionamiento del compresor el que logra un control en la temperatura de evaporación. Esta cíclica operación se emplea para poder tener una regulación de la Capacidad de Refrigeración mediante ciclos de descanso y operación del compresor, como lo indica la figura 13. En el modelo de control ON-OFF, una función de la actual carga térmica es el tiempo en que opera el ciclo ON. Por medio de un diferencial de temperatura se ajusta la amplitud del ciclo, este diferencial es conocido como rango de diferencia el cual se basa en el tipo de aplicación y se le asocia a las operaciones de apagado y encendido del compresor. Por consiguiente, la temperatura del producto en refrigeración tiene un valor que se aproxima al de referencia, mas no es constante.

Figura 13

Regulación de la capacidad del sistema usando el sistema ON-OFF



Nota. Gelvéz Arocha et al. (2012)

Asimismo, emplean un algoritmo que verifica si la variable de proceso se encuentra por encima o por debajo del punto de ajuste. En la práctica, la variable controlada experimenta un cambio abrupto, pasando completamente de un estado "on" a un estado "off" o viceversa, sin presentar estados intermedios (Villajulca, 2020).

Este método de control puede llevar a una regulación imprecisa de la variable de proceso. Un ejemplo común es el control de temperatura en aires acondicionados mediante termostatos, el cual, enciende el aire frío si la temperatura es mayor al valor de referencia y lo apaga cuando es menor. En aplicaciones prácticas, se consideran puntos de ajuste altos y bajos (PAB) o una banda de control para los controles On-Off. No obstante, este método de control no resulta adecuado para procesos que requieran alta precisión, ya que la variable de proceso oscilaría constantemente, lo que no permitiría una estabilización adecuada.

Por tanto, el control On-Off es adecuado sólo en algunos casos, como en el control de nivel de un tanque para evitar derrames o vaciado completo. Sin embargo, para procesos que requieran mayor precisión y evitar problemas de fatiga mecánica y pérdidas de energía, es necesario emplear un algoritmo de control proporcional, que permita una regulación más precisa y ajustada a los valores de la variable de proceso (Villajulca, 2020).

3.2 Control PID

Según Naidu y Rieger (2011) el controlador PID es el controlador más utilizado en la industria. Básicamente, las acciones PID se relacionan con el presente (proporcional), el pasado (integral) y el futuro (derivada). Aunque existen muchos métodos mejorados de diseño de controladores PI/PID, muchos ingenieros de control de HVAC&R todavía utilizan las técnicas tradicionales de Ziegler-Nichols (Z-N). Sin embargo, el método Z-N adolece de un largo tiempo de prueba y un rendimiento limitado; por lo tanto, se utiliza mejor como primer paso para ajustar los controladores PID. En las primeras investigaciones que emplearon métodos de control de entrada única y salida única (SISO), como los controladores PID, se encontraron con el desafío de ajustar los parámetros K_p , K_i y K_d . Estos controladores dependen de estas tres constantes para su correcto funcionamiento. Sin embargo, también se enfrentaron a la limitación de no poder considerar las interacciones entre los diferentes lazos del sistema.

Dexter (1988) investigó los problemas asociados con la simulación en tiempo discreto de un sistema HVAC&R con estructura de cuatro niveles, con especial referencia a la selección de parámetros y el autoajuste de controladores PID utilizando un estimador de parámetros y un algoritmo de control. Geng y Geary (1993) estudiaron los efectos de las perturbaciones en el sobre impulso y el tiempo de establecimiento utilizando controladores PID.

Utilizando algunos de los resultados recientes en controladores PID que implican polinomios de Hurwitz para mejorar el rendimiento y la robustez, se desarrollan algunas herramientas de diseño sencillas e intuitivas y se aplican a dos ejemplos sobre el control de temperatura de una unidad VAV (Volumen de Aire Variable) y el control del recalentamiento del evaporador utilizando una válvula de expansión electrónica (Lim et al., 2009). Asimismo, Elliott et al. (2009) propusieron un híbrido de controles mecánicos y electrónicos para el control del sobrecalentamiento del evaporador en términos de control interno para regular la presión del evaporador y control externo para regular el sobrecalentamiento del evaporador, lo que resultó en un rendimiento transitorio mejorado en comparación con el control mecánico.

3.3 Control de retroalimentación de estado

Según Naidu y Rieger (2011) abordaron los temas de controlabilidad y la retroalimentación de estado, en el contexto de un modelo no lineal VAV HVAC&R de zona única. Este modelo está descrito por tres variables de estado: temperatura del espacio térmico, índice de humedad del espacio térmico y temperatura del aire de suministro. Además, cuenta con dos variables de control: tasa de flujo volumétrico de aire y tasa de flujo de agua enfriada. Asimismo, el modelo posee dos salidas: relación de temperatura y humedad del espacio térmico. En este estudio, se examina la posibilidad de aplicar técnicas de control y

observación para mejorar el rendimiento y la eficiencia del sistema VAV HVAC&R mencionado. Específicamente, se busca optimizar la regulación de las variables de estado y control, considerando las interacciones no lineales entre las variables y utilizando retroalimentación de estado para lograr una respuesta más precisa y estable del sistema.

Argüello-Serrano y Vélez-Reyes (1999), desarrollaron un controlador de retroalimentación de estado para mantener el confort térmico en un espacio térmico en presencia de cargas térmicas variables en el tiempo. Primero linealizaron el modelo en torno a un punto de operación y diseñaron un observador de estado y carga térmica. Luego, implementaron un controlador de retroalimentación de estado para rechazar las perturbaciones basándose en la estabilidad de Lyapunov y la ecuación algebraica de Riccati. Gracias a esta metodología, lograron reducir el impacto de las cargas térmicas al extraer más calor del espacio térmico, disminuyendo la temperatura del aire de suministro. Con enfoques avanzados como la retroalimentación de estado y la estabilidad de Lyapunov, mantuvieron un ambiente térmico más estable y confortable, incluso ante cambios o perturbaciones en el sistema a lo largo del tiempo.

Yeh et al., (2009), evaluaron dos estrategias de control para regular el sobrecalentamiento del condensador (CSR) y del evaporador (ESR) en una estructura en cascada. Esta estructura presenta dinámicas lentas y rápidas debido al ciclo de compresión de vapor y a la dinámica interna del sistema. Las estrategias se aplicaron en una configuración experimental con el propósito de alcanzar un rendimiento óptimo tanto en situaciones transitorias como en estado estable, al tiempo que se buscaba ahorrar energía. Los resultados demostraron que la combinación de las estrategias CSR y ESR en la configuración experimental resultó ser efectiva para el sistema de cascada, ofreciendo una respuesta óptima en diversas condiciones de operación y carga. Este enfoque representa un avance significativo en el control de sistemas HVAC&R.

Capítulo 4

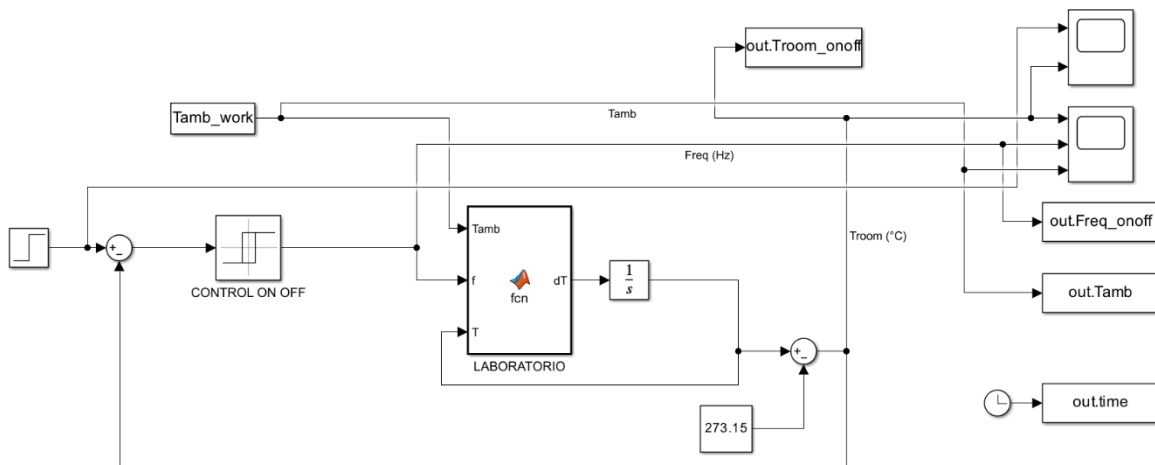
Implementación de estrategia de control a simulador

4.1 Control ON-OFF

Al simulador desarrollado en el capítulo 2, se le ha implementado una estrategia de control del tipo ON-OFF. Tal como se aprecia en la figura 14:

Figura 14

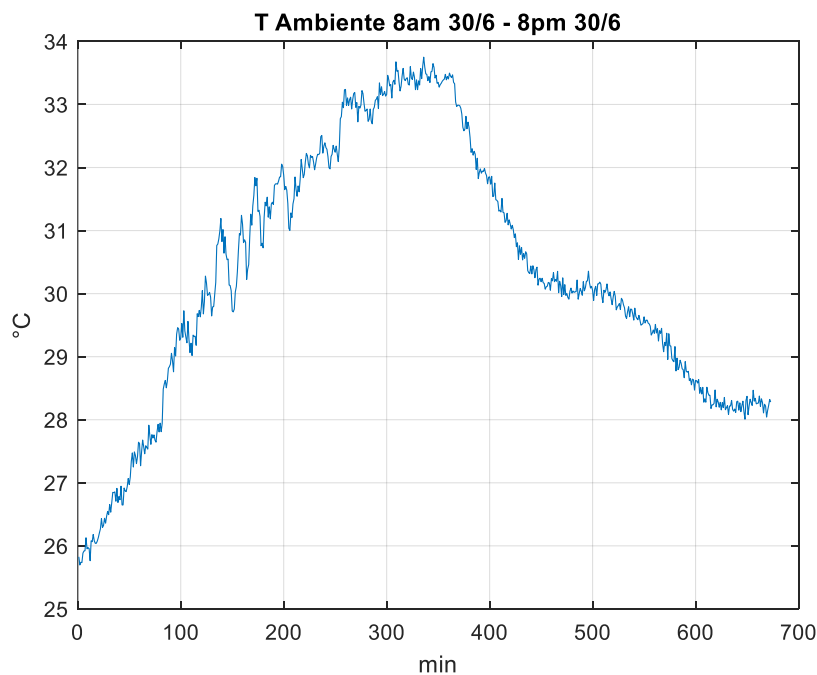
Estrategia de control del tipo ON-OFF



Donde la Temperatura ambiente ha sido medida en tiempo real, figura 15:

Figura 15

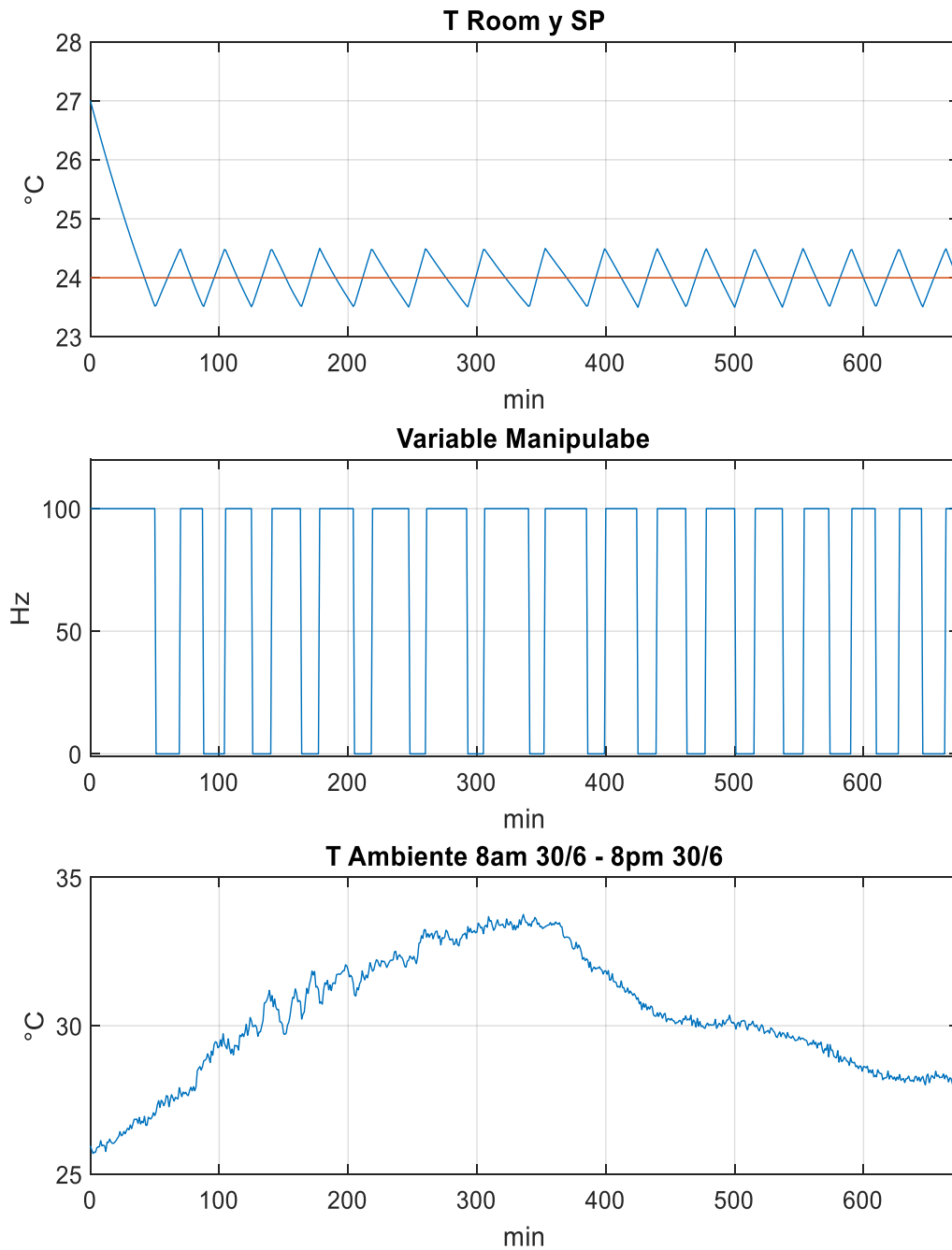
Temperatura ambiente



Asumiendo una condición inicial de 27°C y un set point constante de 24°C constante, el controlador ON-OFF presenta el siguiente comportamiento mostrado en la figura 16:

Figura 16

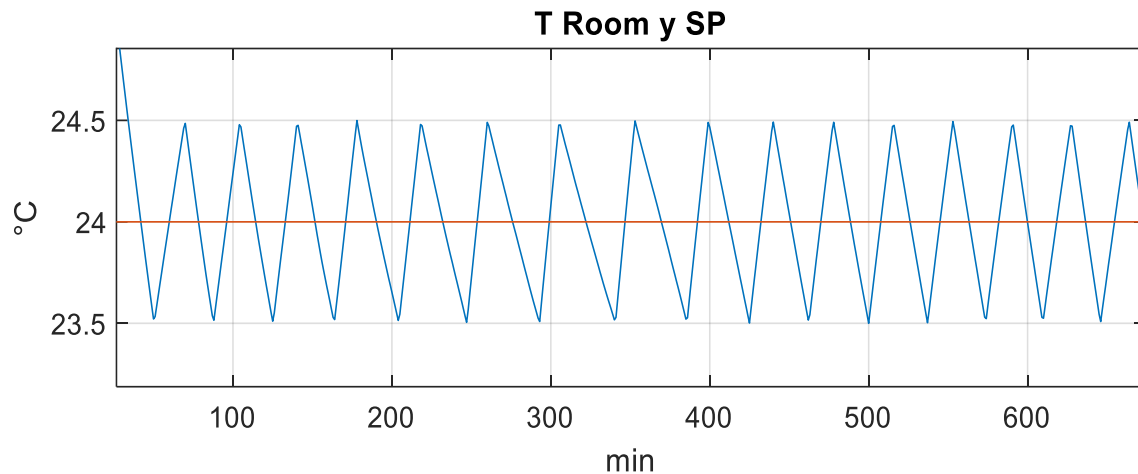
Comportamiento del controlador ON-OFF



Al realizar un acercamiento al valor de 24 °C, se puede apreciar que entre 300 min y 400 min el controlador presenta un comportamiento peculiar y, esto es ocurre porque la temperatura ambiente llega a su máximo valor e inicia el descenso, ver figura 17:

Figura 17

Comportamiento del controlador ON-OFF en el tiempo de 300 min y 400 min

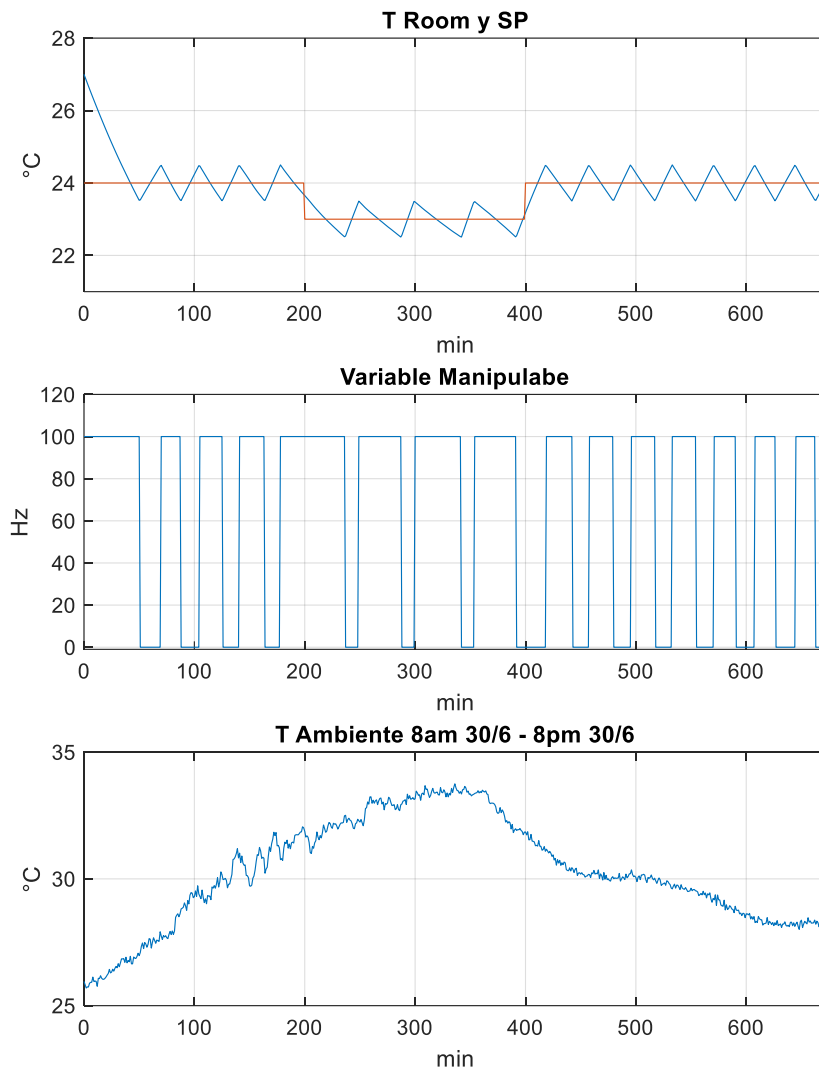


Este controlador ha sido configurado para tener un error máximo de ± 0.5 °C. Se puede apreciar que aproximadamente en 50 min llega a oscilar alrededor del setpoint.

Para un cambio de referencia se tiene el siguiente comportamiento (figura 18):

Figura 18

Cambio de referencia en el comportamiento del controlador ON-OFF



Se puede observar que cuando la referencia disminuye el modo OFF de 100 Hz tiene mayor duración de tiempo y cuando la referencia aumenta el modo OFF de 0 Hz tiene mayores minutos.

Para continuar con el análisis se ha agregado un disturbio en el minuto 500, que es un aumento de 1 °C, que puede representar a ingreso de personas y/o apertura de alguna de las puertas de ingreso, como se muestra en la figura 19:

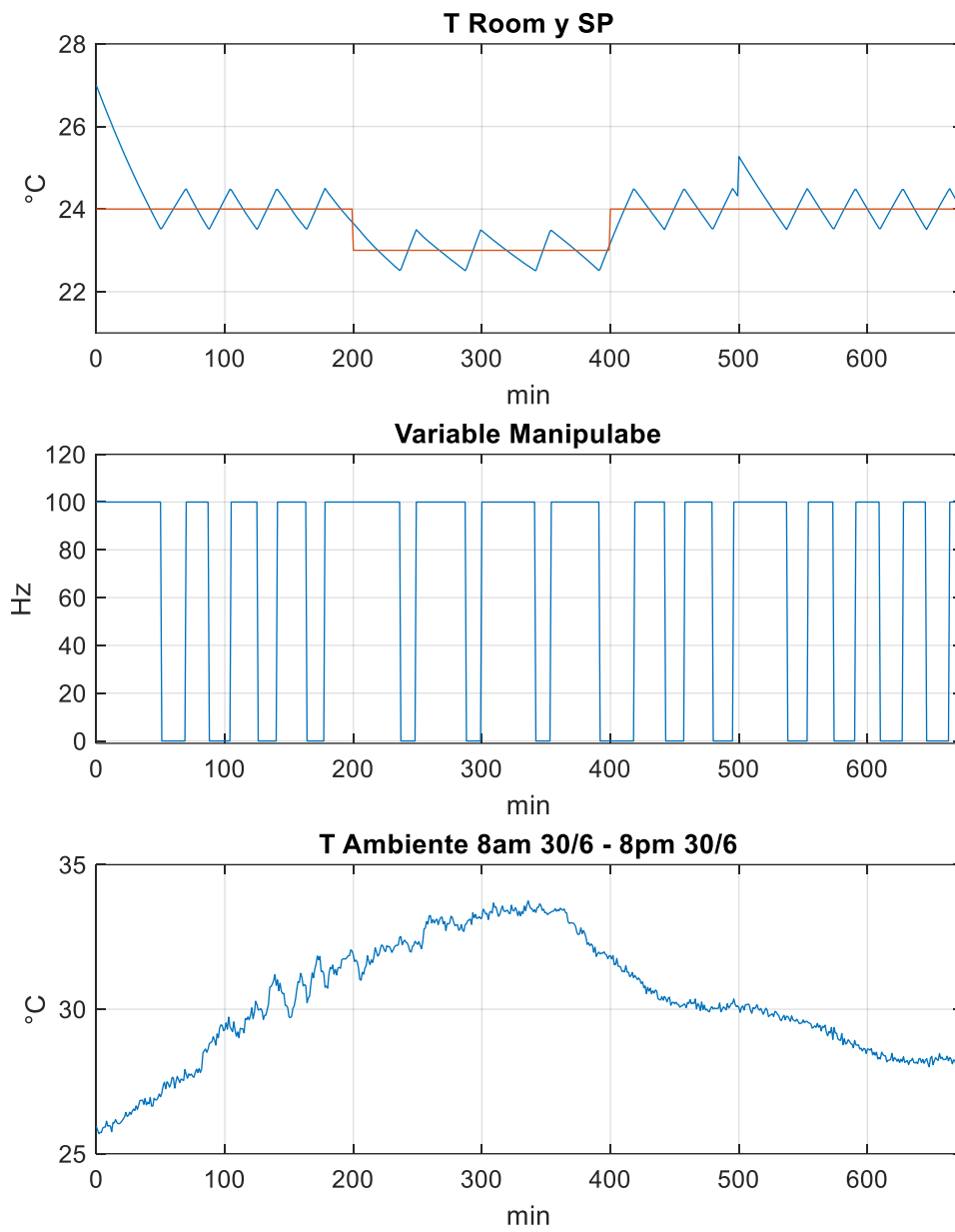
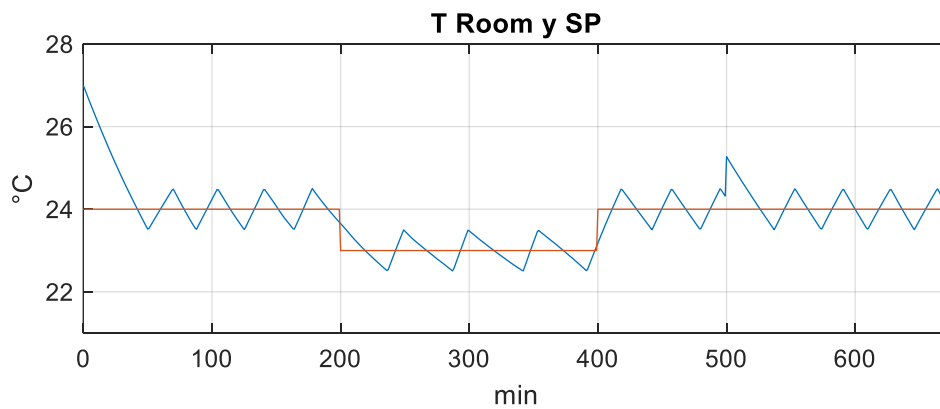
Figura 19*Disturbio en el minuto 500 en el comportamiento del controlador ON-OFF*

Figura 20

Comportamiento del controlador ON-OFF a 25°C



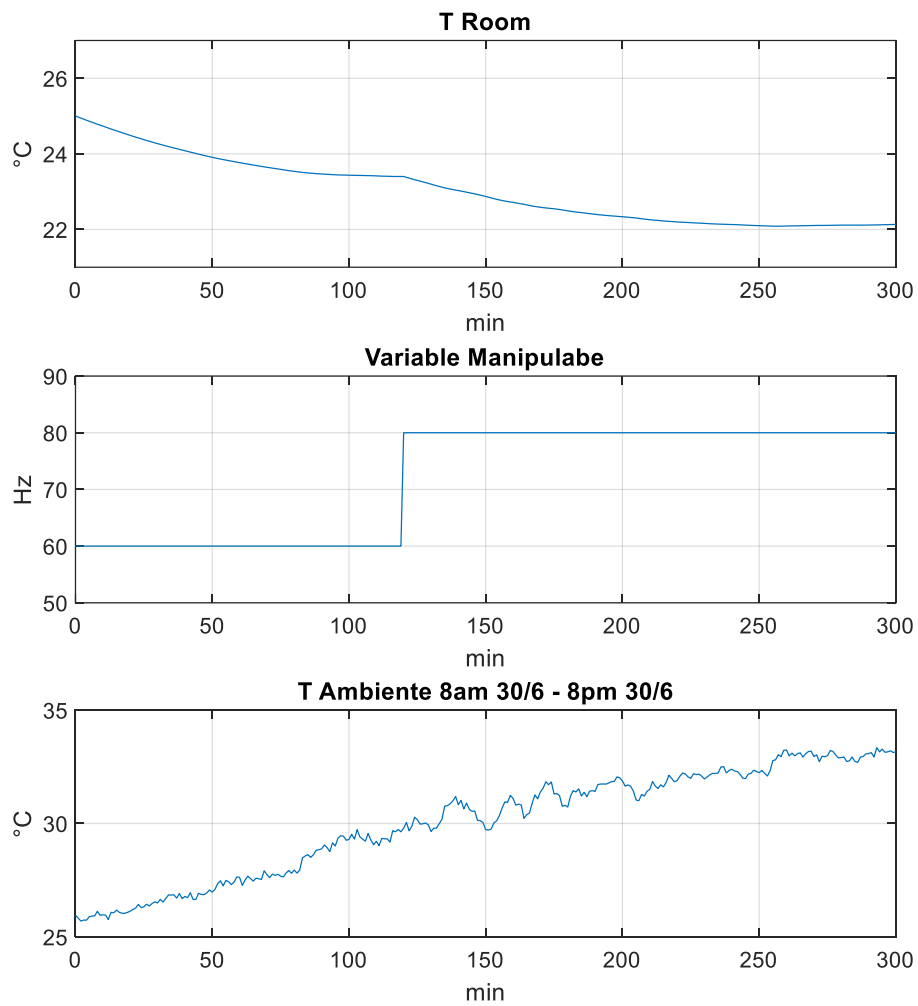
El controlador en aproximadamente 40 minutos contrarrestar el disturbio presentado.

4.2 Control PID

Para el diseño del controlador PID, se tiene que contar con una función de transferencia del proceso. Para ello, se ha realizado una prueba a lazo abierto al simulador de la sala de reuniones del laboratorio de SAC, donde se ha considerado la influencia de la temperatura ambiente (figura 21):

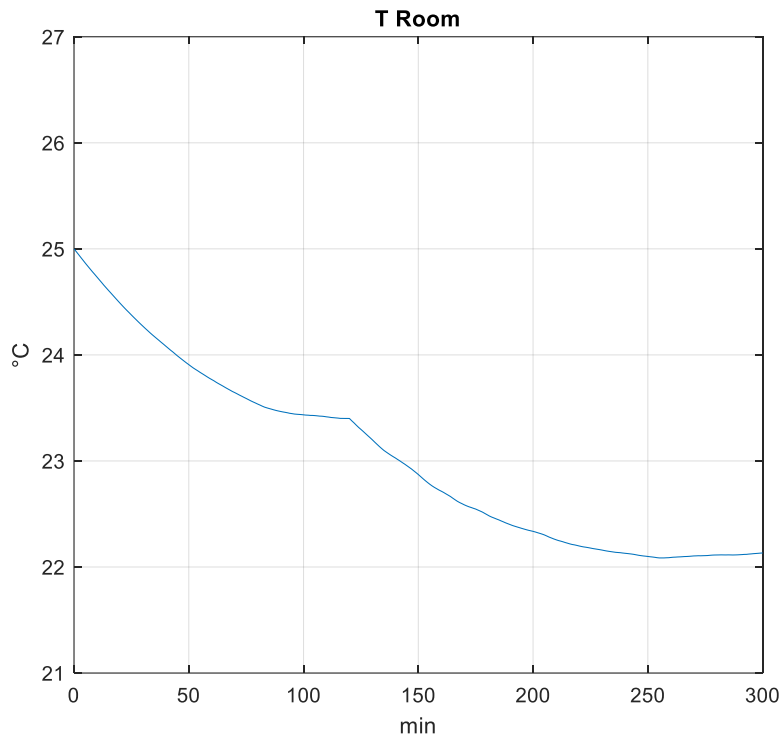
Figura 21

Control PID según la temperatura ambiente



Se hace un acercamiento para obtener los valores que se necesitan para la función de transferencia (figura 22):

Figura 22
Control PID



Donde se asume una temperatura inicial de 23.5 °C y una temperatura final de 22 °C.
El cálculo de la función de transferencia consiste en:

$$\Delta u = 80 - 60 = 20 \text{ Hz}$$

$$\Delta y = 22 - 23,5 = -1.5 \text{ °C}$$

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{-1.5}{20} = -0.075$$

$$63.2\% (22\text{°C}) = 1,9 \text{ °C}$$

$$63.2\% (-1.5\text{°C}) = 0.948 \text{ °C}$$

$$23.5\text{°C} - 0.948 = 22.55\text{°C}$$

$$\text{Para: } 22.55\text{°C} \rightarrow t = 174.5 \text{ min}$$

$$t = 17,5 - 120 = 54.5 \text{ min} = 3270\Delta$$

Donde finalmente nuestra función de transferencia es:

$$FT = \frac{-0.075}{3270s + 1}; \frac{k}{ts + \Delta}$$

$$FT = \frac{-0.075}{3270s + 1}$$

Para la sintonización del controlador se ha seleccionado el método de asignación de polos, ya que, permiten realizar ajustar la ubicación de los polos en closed loop para llegar a una respuesta deseada. En este caso se ha diseñado un PI.

PI = Asignacion de polos

$$PI = k \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right)$$

$$FT \text{ a lazo cerrado} = G_{CL} = \frac{G_P G_C}{1 + G_P G_C}$$

$$G_{CL} = \frac{\left(\frac{-0.075}{3270s + 1} \right) \left(k + \frac{1}{s} \frac{k}{T_i} \right)}{1 + \left(\frac{-0.075}{3270s + 1} \right) \left(k + \frac{1}{s} \frac{k}{T_i} \right)}$$

$$G_{CL} = \frac{\left(\frac{-0.075}{3270s + 1} \right) \left(\frac{skT_i + k}{sT_i} \right)}{1 + \left(\frac{-0.075}{3270s + 1} \right) \left(\frac{skT_i + k}{sT_i} \right)}$$

$$G_{CL} = \frac{\left(\frac{-0.075}{3270s + 1} \right) \left(\frac{skT_i + k}{sT_i} \right)}{\frac{(3270s + 1)(sT_i) + (-0.075)(skT_i + k)}{(3270s + a)(sT_i)}}$$

$$G_{CL} = \frac{(-0.075)(skT_i + k)}{(3270s + a)(sT_i) + (-0.075)(skT_i + k)}$$

Ecuación caract: $s^2(3270T_i) + sT_i - s(0.075kT_i) - 0.075k$

$$s^2(3270T_i) + s(1 - 0.075k)T_i - 0.075k$$

El valor de K es la constante proporcional del controlador, el valor de T_i es parte integral de controlador. De la función anterior podemos llamar a los coeficientes como:

$$a = 3270 * T_i;$$

$$b = (1 - 0.075 * k) * T_i;$$

$$c = -0.075 * k;$$

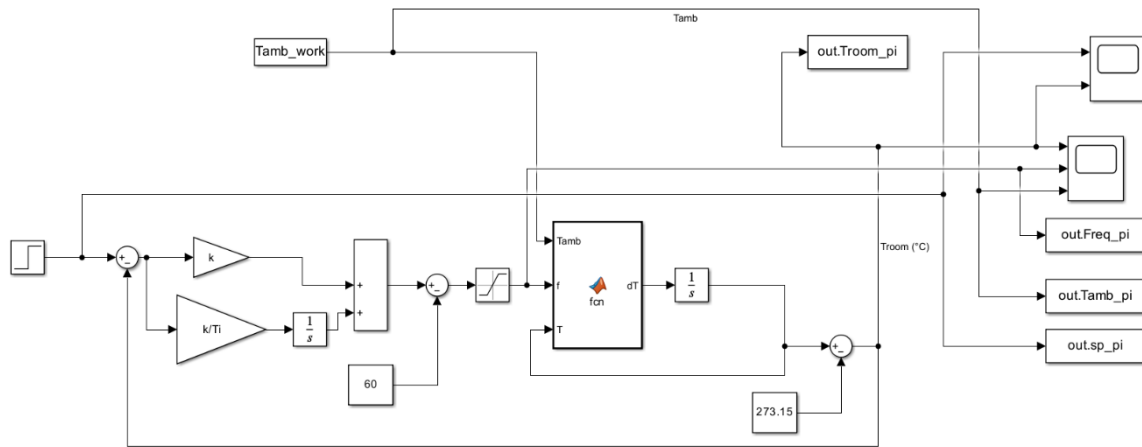
Donde el cálculo de los polos viene dado por la solución general de una ecuación de segundo orden:

$$p_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

En SIMULINK, la implementación se presenta en la figura 23:

Figura 23

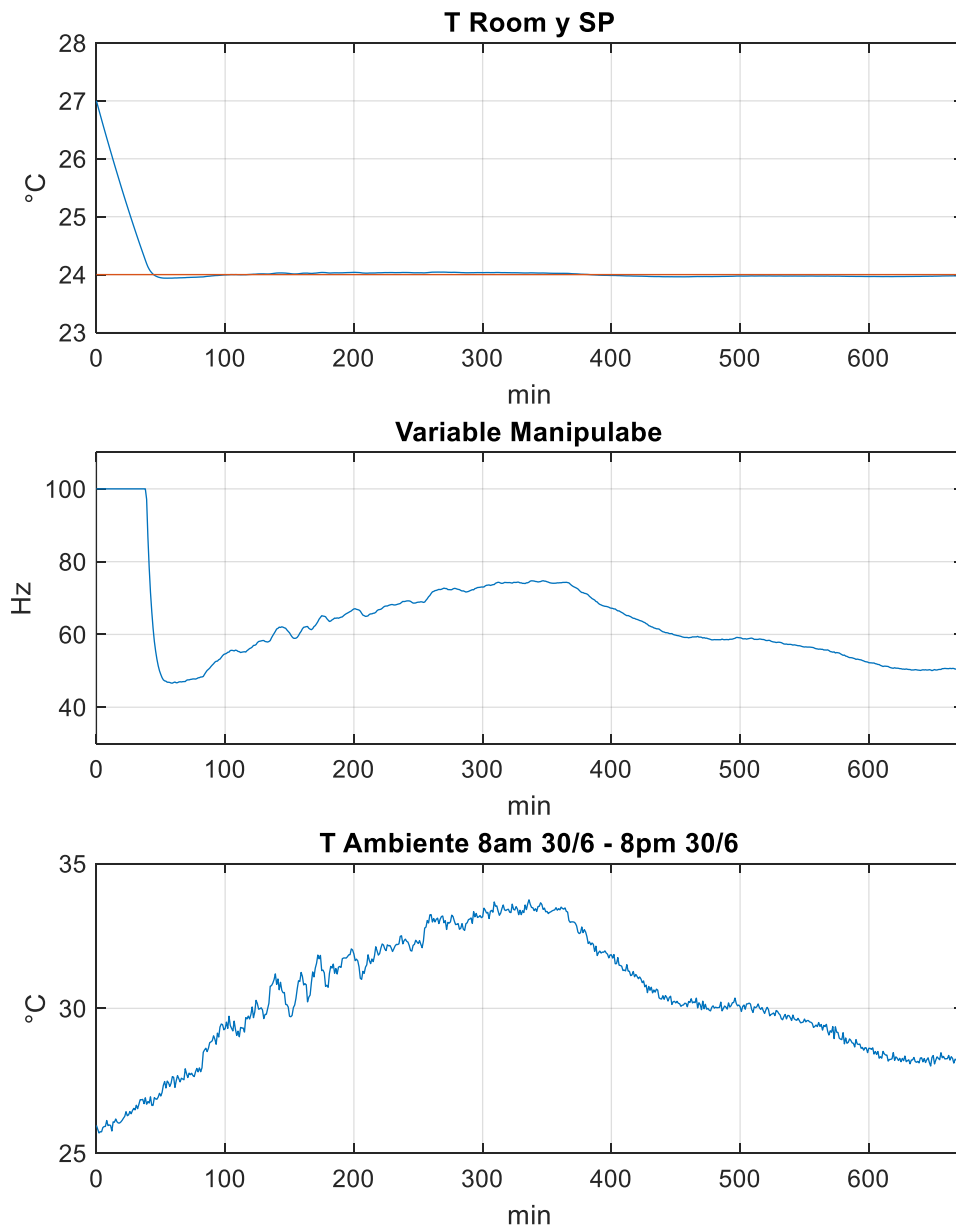
SIMULINK



Los parámetros del PI seleccionados son $k = -200$ y $T_i = 100$ s. Para un setpoint constante de 24 °C, el controlador presenta el siguiente comportamiento:

Figura 24

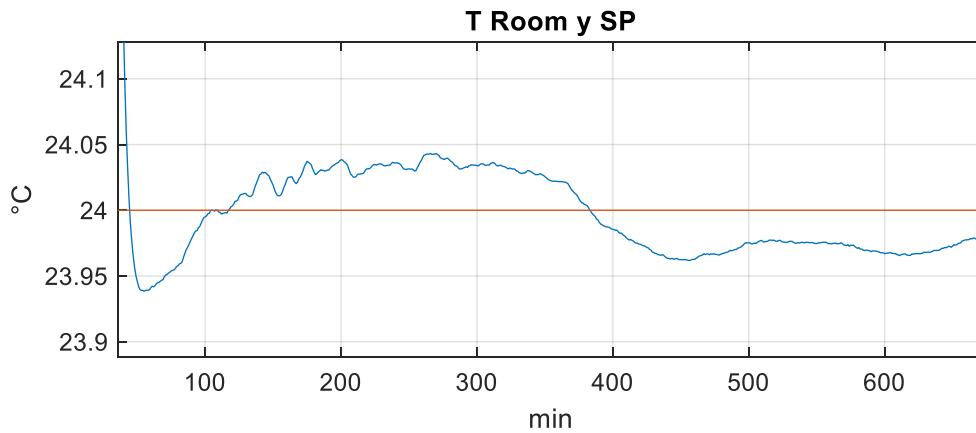
Comportamiento del control PID según los parámetros establecidos



Se ha colocado un saturador para limitar el valor máximo de 100 Hz y así, tener las mismas condiciones del controlador ON-OFF. Se puede observar un mejor acercamiento del set point. Por otro lado, al realizar un acercamiento, se tiene:

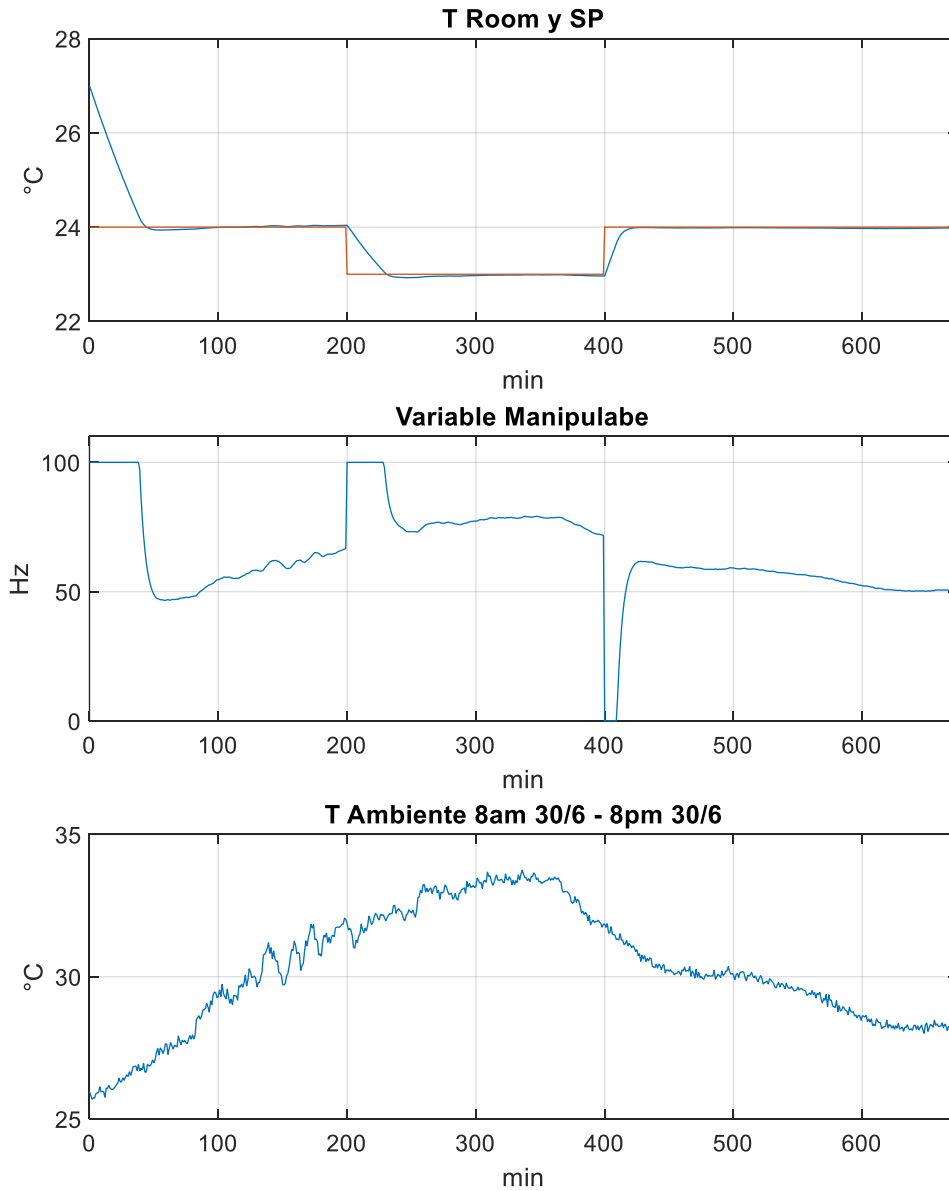
Figura 25

Comportamiento del control PID con el saturador



Comparando con el controlador ON-OFF, cuyo valor máximo es 24.5 y mínimo 23.5, el control PI ofrece valores más cercanos y se mantiene en un rango de 24.05 °C y 23.95 °C. Si al controlador se le configura para este rango, tendrá que realizar mayor cantidad de maniobras de encendido y apagado en menos tiempo y eso puede afectar al compresor.

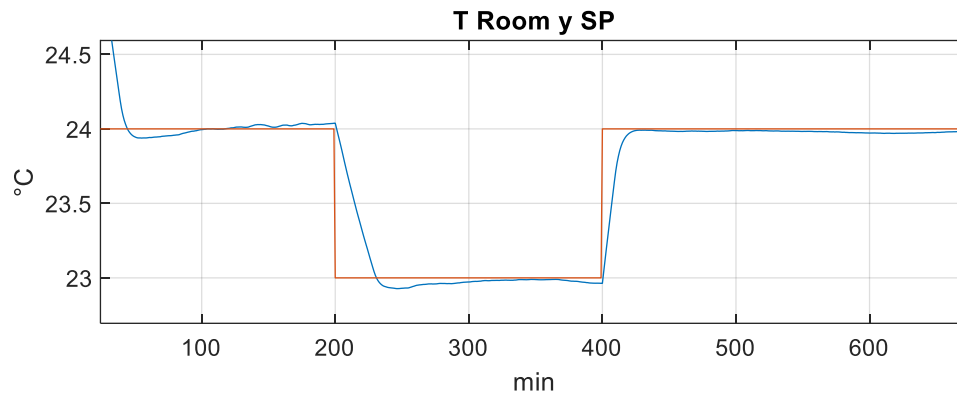
Para un cambio de referencia se tiene el siguiente comportamiento:

Figura 26*Comportamiento del control PID según nuevos parámetros*

Se puede observar un seguimiento de referencia más suave ante el aumento o disminución de la temperatura. Para la variable manipulabe se tiene los mismos límites de saturación del controlador ON-OFF. Ante el aumento de la temperatura ambiente, se puede deducir que el seguimiento del set point no se ve afectado de forma significativa, tal como se aprecia en la siguiente imagen:

Figura 27

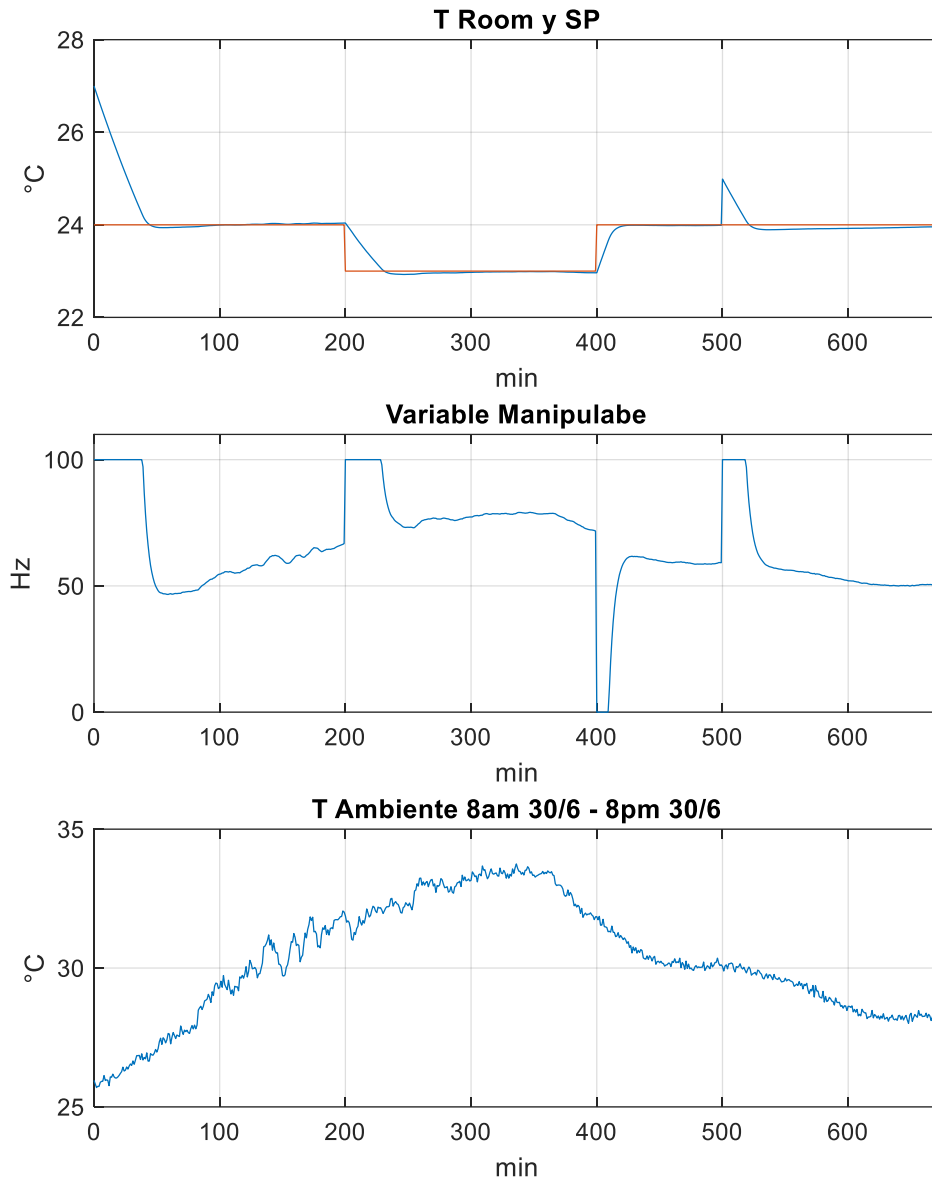
Comportamiento del control PID con aumentos de la temperatura ambiente



Igual que el controlador anterior, se ha agregado un disturbio en el minuto 500, que es un aumento de 1 °C, que puede representar a ingreso de personas y/o apertura de alguna de las puertas de ingreso:

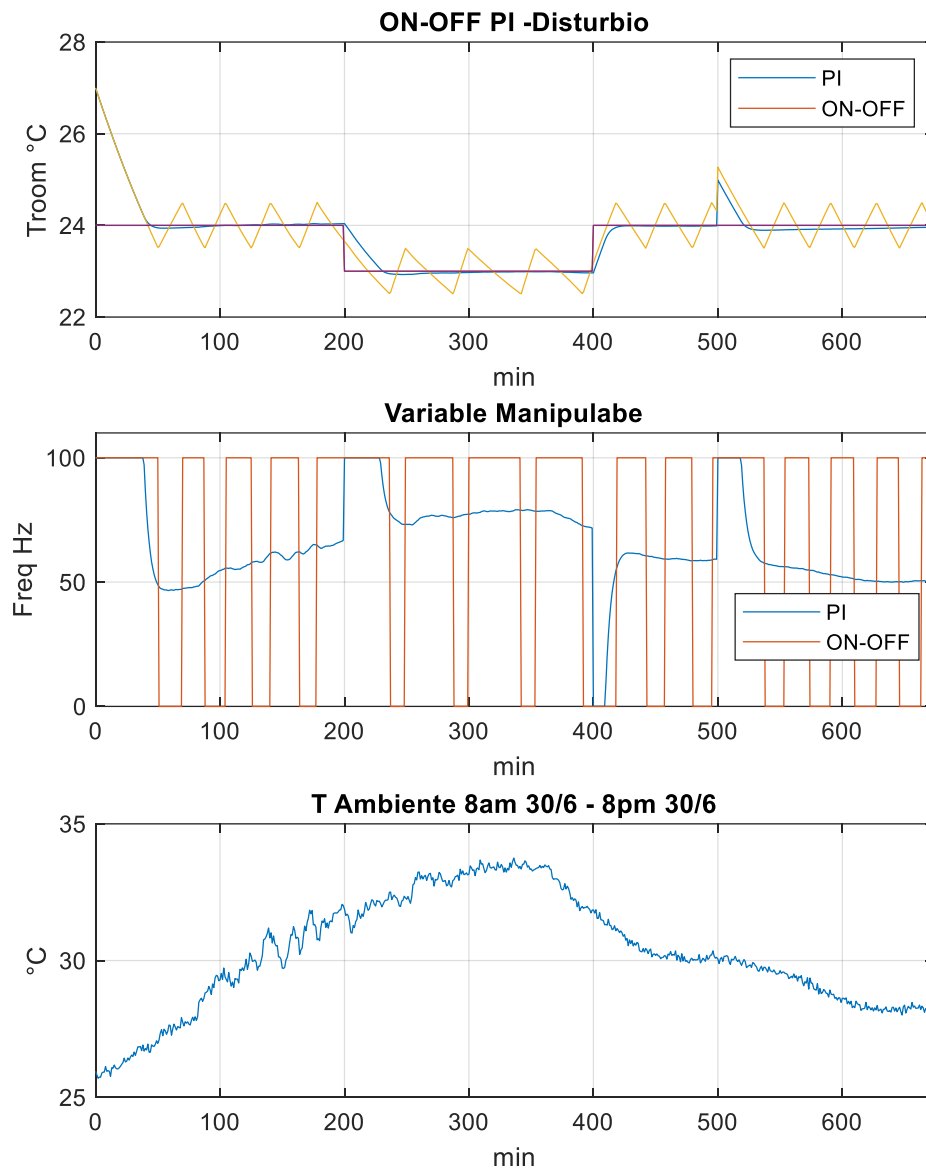
Figura 28

Disturbio en el minuto 500 en el comportamiento del control PID



Se deduce que, ante la presencia del disturbio, el controlador PI reacciona con su máximo valor permitido para disminuir la temperatura y llegar en el menor tiempo al set point. En un aproximado de 20 minutos contrarresta el disturbio presentado.

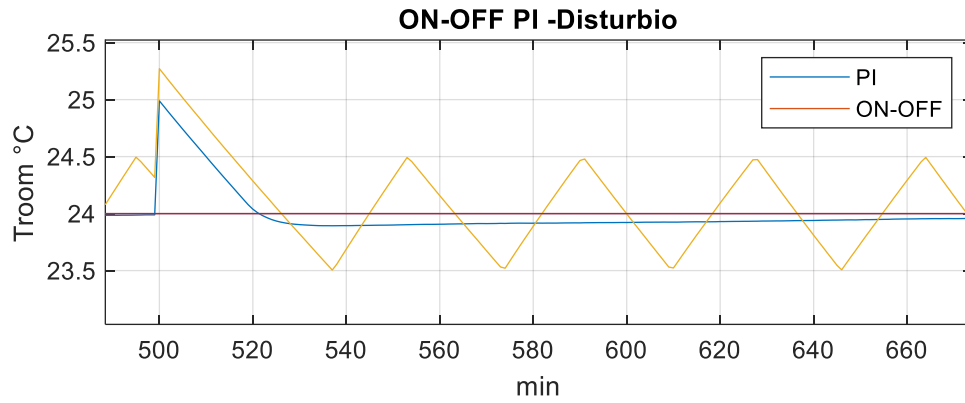
A continuación, se presenta una comparación de los dos controladores diseñados:

Figura 29*Comparación de los dos controladores*

En la figura 30 se puede apreciar más cerca la respuesta al efecto del disturbio, donde se puede ver que la respuesta del PI es más cerca al set point y en menos tiempo:

Figura 30

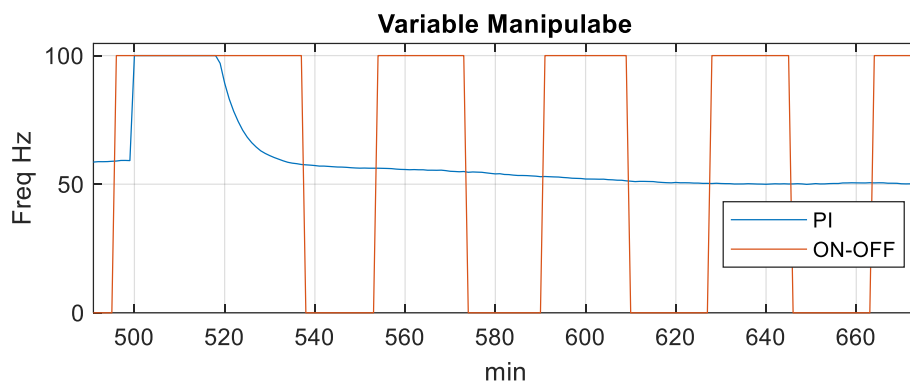
Disturbio en el controlador ON-OFF y PI



Con respecto a la variable manipulable, se puede observar que el controlador ON-OFF tiene más tiempo de 100 Hz y el PI no, el PI desciende antes que el ON-OFF y además de manera más suave para estacionarse en 50 Hz.:

Figura 31

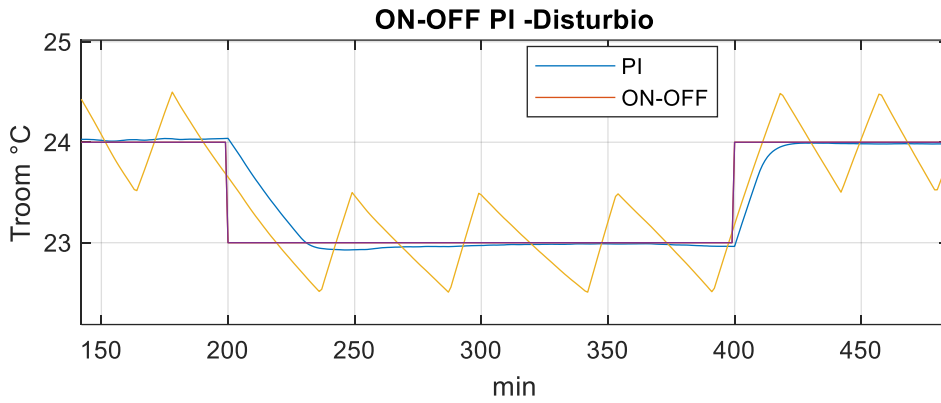
Variable manipulable ON-OFF y PI



Con respecto a los cambios de referencia, en la siguiente figura 32 se detalla que es más suave en el controlador PI que en el controlador ON-OFF:

Figura 32

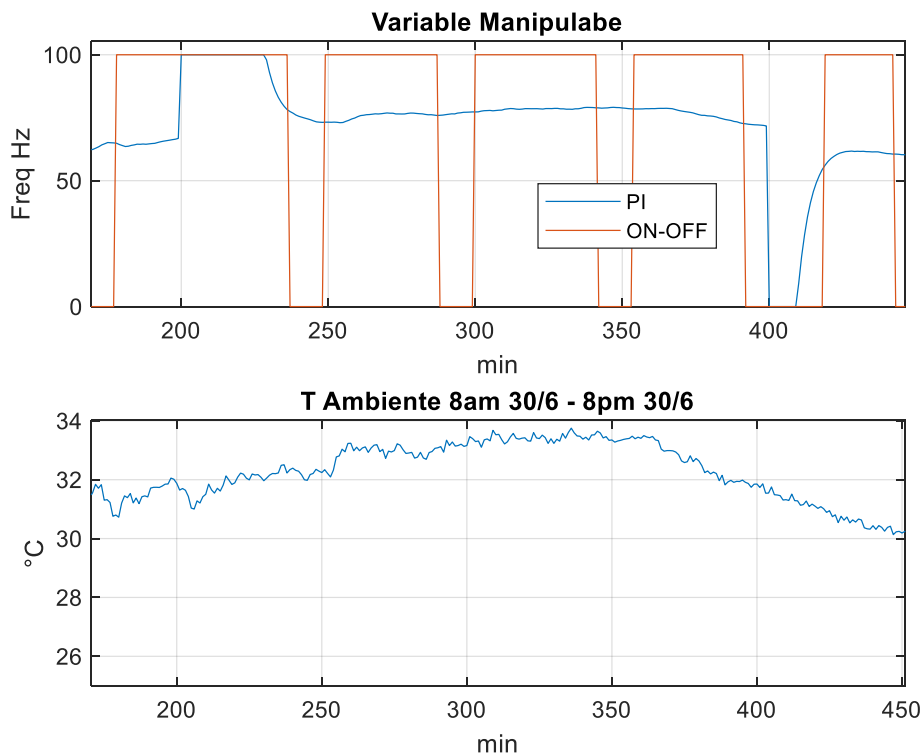
Controlador ON-OFF y PI para la variable disturbio



Para la variable manipulable, se tiene:

Figura 33

Controlador ON-OFF y PI para la variable manipulable



Donde se puede observar que la variable manipulable del PI desciende antes que el ON- OFF cuando el set point disminuye, y aumenta en instante menor al ON-OFF cuando el set point crece. Por otro lado, no se ve afectado por la disminución de la temperatura ambiente.

Conclusiones

La presente tesis se centró en el modelado y control de sistemas de refrigeración doméstica, específicamente en sistemas de aire acondicionado del Laboratorio de Sistemas Automáticos de Control (SAC) de la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la UDEP. Se ha demostrado que una adecuada aplicación de estrategias de control en estos sistemas es fundamental para mejorar la eficiencia energética y garantizar la comodidad de las personas en el ambiente interior.

Se desarrolló la modelación matemática del sistema de aire acondicionado estudiado. Se aplicaron ecuaciones basadas en el balance de energía, lo que permitió obtener un modelo que representa con precisión las variaciones de temperatura en un lugar específico. La validación del modelo se realizó comparando los datos reales con los obtenidos mediante simulación, data obtenida durante 12 horas de funcionamiento.

Se diseñaron estrategias de control para el sistema de aire acondicionado, implementando dos tipos de controladores: el ON-OFF y el PID. El control ON-OFF, comúnmente utilizado en equipos de aire acondicionado en el Perú, mostró limitaciones en la precisión del control de temperatura, presentando oscilaciones alrededor del punto de ajuste. En contraste, el control PID proporcionó un seguimiento más suave del set point y una mejor respuesta ante perturbaciones. Los controladores PID demostraron un control más preciso y estable, lo que se traduce en un menor consumo energético y mayor confort térmico para los usuarios, en comparación con el cambio inesperado de señal del control ON-OFF.

Se implementaron estrategias de control en un simulador del sistema de aire acondicionado. El control ON-OFF mantuvo la temperatura dentro del rango deseado, pero mostró oscilaciones en la variable manipulable. En cambio, el control PID proporcionó una respuesta más precisa y estable, manteniendo la temperatura cercana al punto de referencia y contrarrestando perturbaciones eficientemente.

La sintonización adecuada del controlador PID es esencial para cada sistema de aire acondicionado específico. Esto garantiza una respuesta óptima frente a cambios de referencia y perturbaciones, evitando oscilaciones innecesarias. El método de asignación de polos es una opción apropiada para lograr esta sintonización, especialmente en procesos sin retardo. Mediante esta técnica, se establecen los parámetros del controlador PID de manera precisa y eficiente, optimizando así el rendimiento y la estabilidad del sistema de aire acondicionado.

Estos resultados destacan la ventaja de utilizar controladores PID en sistemas de aire acondicionado, ya que su capacidad de respuesta más suave y precisa mejora significativamente el rendimiento del sistema y contribuye a la eficiencia energética y el confort en entornos acondicionados. Este enfoque representa un avance importante en el campo del control de sistemas HVAC&R, permitiendo un funcionamiento más eficiente y un mayor confort para los usuarios.



Referencias

- Argüello-Serrano, B., & Vélez-Reyes, M. (1999). Nonlinear control of a heating, ventilating, and air conditioning system with thermal load estimation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 7(1), 56–63. <https://doi.org/10.1109/87.736752>
- Campos, F. (2019). Intercambio de calor: almacenamiento de hielo. *MUNDO HVACR*. <https://www.mundohvacr.com/2019/04/intercambio-de-calor-almacenamiento-de-hielo/>
- Dexter, A. L. (1988). Control system simulation - computer control. *Energy and Buildings*, 10(3), 203–211. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90006-0](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90006-0)
- Díaz Torres, Y., Álvarez Guerra-Plasencia, M. A., & Haeseldonckx, D. (2020). The air conditioner system. Brief review of its main characteristics. Part I. *Revista Universidad y Sociedad*, 12(1), 53–63.
- Díaz, Y., Álvarez, M., & Haeseldonckx, D. (2020). The air conditioning systems. Brief review of their main characteristic. Part I. *Universidad. Universidad y Sociedad*, 12(1), 12(1), 53–63. <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v12n1/2218-3620-rus-12-01-53.pdf>
- Elliott, M., Walton, Z., Bolding, B., & Rasmussen, B. P. (2009). Superheat Control: A Hybrid Approach. *HVAC&R Research*, 15(6), 1021–1043.
- Fasiuddin, M., & Budaiwi, I. (2011). HVAC system strategies for energy conservation in commercial buildings in Saudi Arabia. *Energy and Buildings*, 43(12), 3457–3466. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2011.09.004>
- Fission Engineering. (2018). Enfriamiento por Evaporación. *FISSION ENGINEERING*. <http://www.fission-engineering.net/sistemas-de-aire-acondicionado-evaporativos.html>
- Gelvéz-Arocha, O. A., Quiroga Méndez, J. E., Barajas-Merchán, D. E., & Gómez-Sarmiento, M. L. (2012). Estudio Experimental de las Estrategias de Control On-Off y Control Continuo en un Sistema de Refrigeración. *Revista UIS Ingeniería*, 11(1), 73–82.
- Geng, G., & Geary, G. M. (1993). On performance and tuning of PID controllers in HVAC systems. *Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications*, 2, 819–824. <https://doi.org/10.1109/cca.1993.348229>
- H2OTEK. (2015). Línea de Deshumidificadores Desecantes. *H2OTEK*. <https://h2otek.com/tienda/linea-de-deshumidificadores-desecantes-h2otek/>
- Li, G., Hu, Y., Liu, J., Fang, X., & Kang, J. (2020). Review on Fault Detection and Diagnosis Feature Engineering in Building Heating, Ventilation, Air Conditioning and Refrigeration Systems. *IEEE Access*, 9, 2153–2187. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3040980>

- Lim, D., Rasmussen, B. P., & Swaroop, D. (2009). Selecting PID Control Gains for Nonlinear HVAC&R Systems. *HVAC&R Research*, 15(6), 991–1019.
- Maximiliano, C. (2022). Diseño e implementación de sistema de aire acondicionado del tipo agua helada en oficinas según normas internacionales [Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/19087>
- McQuiston, F. C., Parker, J. D., & Spitler, J. D. (2004). *Heating, Ventilating, and Air Conditioning: Analysis and Design*. Wiley.
- Miller, R., & Miller, M. (2011). *Air Conditioning and Refrigeration (Segunda)*. McGraw-Hill Education.
- MUNDO HVAC&r. (2015). Aire Acondicionado en Grandes Espacios: Confort y Funcionalidad a Gran Escala. MUNDO HVAC&r. <https://www.mundohvacr.com/2010/05/aire-acondicionado-en-grandes-espacios-confort-y-funcionalidad-a-gran-escala/>
- Naidu, S. D., & Rieger, C. G. (2011). Advanced control strategies for heating, ventilation, air-conditioning, and refrigeration systems - An overview: Part I: Hard control. *HVAC&R Research*, 17(1), 2–21. <https://doi.org/10.1080/10789669.2011.540942>
- Pariona, R. (2020). Implementacion de un area post venta en la empresa de aire acondicionado TINGCOLD E.I.R.L [Universidad Inca Garcilazo de la Vega]. http://168.121.45.179/bitstream/handle/20.500.11818/5203/TRSUFIENCIA_PARIONA_VARGAS_RICARDO_TITO.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rahman, M. M., Rasul, M. G., & Khan, M. M. K. (2010). Energy conservation measures in an institutional building in sub-tropical climate in Australia. *Applied Energy*, 87(10), 2994–3004. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2010.04.005>
- Tashtoush, B., Molhim, M., & Al-Rousan, M. (2005). Dynamic model of an HVAC system for control analysis. *Energy*, 30(10), 1729–1745. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.10.004>
- Unezaki, F., Anzai, Y., Ikeda, T., & Matsuoka, F. (2005). Energy Saving Refrigeration System for Supermarket. 2005 4th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 482–483. <https://doi.org/10.1109/ECODIM.2005.1619271>
- Vargas, D., & García, H. (2020). Diseño y simulación de torre de enfriamiento por evaporación [Universidad Antonio Nariño]. <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/2482>
- Villajulca, J. (2020). El contro realimentado ON/OFF. *InstrumentacionyControl.NET*. <https://www.youtube.com/watch?v=hPiaHVfoLMc>
- Yeh, T. J., Chen, Y. H., & Lin, J. L. (2009). Control of air-conditioning systems in heating mode to enhance transient performance and steady-state efficiency. *Energy and Buildings*, 41(12), 1391–1400. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2009.08.007>