

Sistemas de Control 1



TP Integrador

Control de temperatura de una cámara de frío

Sistemas de control 1 - 2025

Integrantes

Franco Gabriel Lopez, 43271762

Mauro Ezequiel Cabero, 43761887

Profesor adjunto

Ing. Adrián Claudio Agüero

Ing. Juan Pedroni

Índice

1. Introducción	1
1.1. Definición del sistema	1
2. Desarrollo	3
2.1. Modelo de la planta	3
2.1.1. Cálculo de la resistencia térmica	3
2.1.2. Cálculo de la capacidad térmica	4
2.1.3. Modelo dinámico resultante	4
2.2. Modelado matemático del sensor de temperatura	5
2.2.1. Sensor seleccionado: RTD PT100	5
2.2.2. Condicionamiento de señal	5
2.2.3. Función de transferencia del sensor	6
2.3. Modelado matemático del actuador	6
2.3.1. Características del relé de estado sólido	6
2.4. Función de transferencia	6
2.4.1. Función de transferencia del sistema a lazo abierto	6
2.4.2. Función de transferencia del sistema a lazo cerrado	7
2.5. Análisis de estabilidad	8
2.6. Análisis temporal	9
2.6.1. Sobrepasamiento máximo	9
2.6.2. Tiempo de establecimiento	9
2.6.3. Polos dominantes	10
2.7. Análisis de modelo	11
2.8. Error en estado estacionario	12
2.9. Diseño del compensador	13
2.10. Simulación en simulink	16
3. Conclusión	18
4. Bibliografía	18

1. Introducción

El control de temperatura en cámaras frigoríficas es fundamental para la conservación de productos perecederos, medicamentos y otros materiales sensibles. En este contexto, exploramos la implementación de un sistema de control automático en una cámara de frío, con el objetivo de mantener condiciones térmicas constantes y adecuadas según el tipo de producto almacenado. La regulación precisa de la temperatura no solo garantiza la calidad y seguridad de los productos, sino que también mejora la eficiencia energética del sistema.

1.1. Definición del sistema

Una cámara frigorífica es un recinto térmicamente aislado diseñado para mantener temperaturas controladas por debajo de la temperatura ambiente, utilizando sistemas de refrigeración. Estas cámaras se emplean en industrias alimenticias, farmacéuticas, entre otras, donde la cadena de frío debe conservarse de forma continua. En nuestro caso, se utiliza una cámara equipada con un sistema de refrigeración basado en compresor y evaporador incluidos en la planta, accionados mediante un controlador lógico programable (PLC).

El sistema de refrigeración funciona mediante la circulación de un gas refrigerante que, al cambiar de fase, absorbe el calor del ambiente interior de la cámara, reduciendo así la temperatura. El control de este proceso se realiza a través de un lazo cerrado, donde un sensor de temperatura detecta las variaciones internas y genera una señal eléctrica proporcional a dicha temperatura.

Esta señal es interpretada por el PLC, que la compara con el valor de referencia (setpoint). A partir del error entre ambas señales, el controlador decide la activación o desactivación del actuador, regulando de este modo el funcionamiento del sistema frigorífico. Así, el sistema logra mantenerse dentro de un rango térmico óptimo, garantizando condiciones estables, seguras y eficientes en la cámara frigorífica.

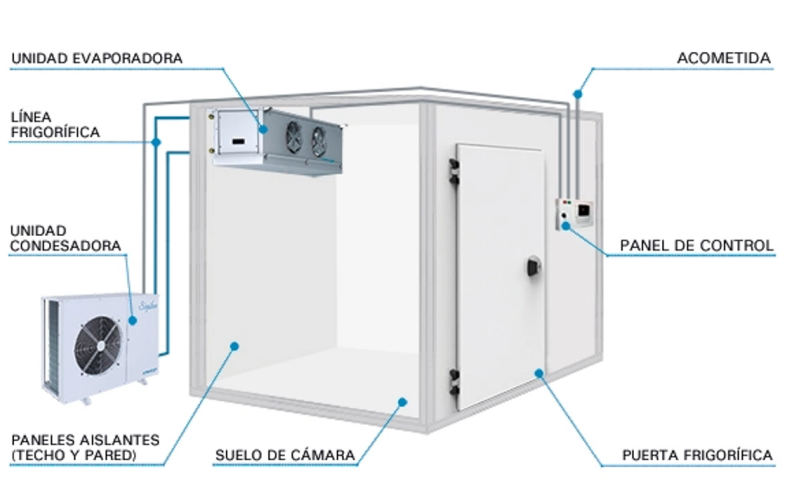


Figura 1: Representación Cámara Frigorífica

El presente trabajo se orienta al análisis del comportamiento dinámico de una cámara frigorífica de uso industrial, con el objetivo de desarrollar un modelo matemático representativo del sistema térmico y su lazo de control. No se busca realizar

una implementación física, sino comprender y modelar la relación entre las variables que gobiernan el proceso de refrigeración automática, tomando como referencia la configuración real del sistema.

La cámara está equipada con una planta frigorífica compuesta por un compresor y un radiador evaporador, los cuales actúan como mecanismo de extracción de calor. El accionamiento de estos componentes se realiza mediante un relé de estado sólido (SSR) con snubber incorporado, controlado a su vez por un PLC, que procesa la señal proveniente de un sensor de temperatura tipo PT100. Este sensor entrega una señal analógica proporcional a la temperatura interna, la cual es convertida y comparada con un valor de referencia (setpoint) definido por el usuario.

Desde el punto de vista del modelado, el sistema puede representarse como un sistema térmico con realimentación negativa, donde la entrada de control es la señal generada por el PLC (activación o desactivación del SSR), y la salida del sistema es la temperatura interna de la cámara, expresada en grados Celsius.

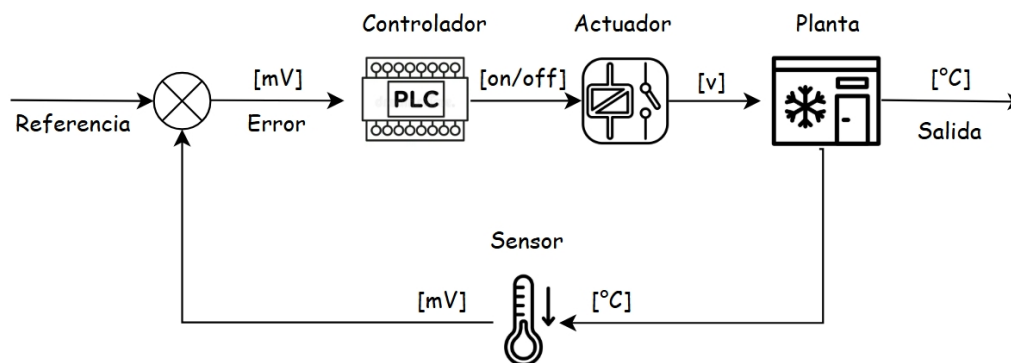


Figura 2: Diagrama de planta del sistema

A primera vista, se podría modelar el sistema como lineal e invariante en el tiempo, si se trabaja en un rango acotado de operación y se ignoran las perturbaciones externas. Esta simplificación permite el uso de modelos clásicos de primer orden, facilitando el análisis de estabilidad y diseño de controladores como P, PI o PID.

Sin embargo, al observar el comportamiento real de los componentes, surgen fuertes elementos no lineales:

- El compresor opera en régimen ON/OFF: no hay una relación lineal directa entre el tiempo de activación y el descenso exacto de temperatura.
- El efecto de refrigeración depende del gradiente térmico entre el interior y el exterior.
- El retardo térmico (inercia) genera un efecto de “cola” en la respuesta del sistema.
- Cambios en la masa térmica interna (productos dentro de la cámara) afectan la constante de tiempo.

Por estas razones, si se desea un modelo matemático de mayor fidelidad, podría considerarse un modelo híbrido o por partes, combinando zonas de comportamiento lineal con umbrales no lineales, o bien un sistema de eventos discretos.

2. Desarrollo

2.1. Modelo de la planta

El modelado de la planta de una cámara de frío se puede realizar aplicando un balance energético al sistema. Se considera que el aire en el interior se comporta como una masa térmica con cierta **capacidad térmica** C , mientras que el flujo de calor hacia el exterior está gobernado por una **resistencia térmica** R , que depende del aislamiento de las paredes.

La dinámica térmica se asemeja al comportamiento de un circuito eléctrico RC con una fuente de corriente controlada (flujo térmico), una resistencia (aislante) y un capacitor (masa térmica del aire).

La ecuación que modela el sistema es:

$$C \frac{dT(t)}{dt} = -\frac{T(t) - T_a}{R} + Q_{in}(t)$$

donde:

- $T(t)$: temperatura interna [$^{\circ}\text{C}$]
- T_a : temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$] (perturbación)
- $Q_{in}(t)$: flujo térmico de refrigeración [W] (control)
- R : resistencia térmica entre interior y exterior [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
- C : capacidad térmica del sistema [$\text{J}/^{\circ}\text{C}$]

2.1.1. Cálculo de la resistencia térmica

La resistencia térmica del aislamiento se calcula como:

$$R = \frac{e}{kA}$$

donde:

- $e = 0.1 \text{ m}$: espesor del aislante
- $k = 0.025 \text{ W/m}\cdot\text{K}$: conductividad térmica de la espuma de poliuretano
- $A \approx 49 \text{ m}^2$: superficie total de la cámara (estimada como $2(lh + lw + hw)$)

Entonces:

$$R = \frac{0.1}{0.025 \cdot 49} \approx 0.0816 \text{ K/W}$$

2.1.2. Cálculo de la capacidad térmica

Considerando el aire como la principal masa térmica:

$$C = m \cdot c_p = \rho_{aire} \cdot V \cdot c_p$$

con:

- $\rho_{aire} = 1.2 \text{ kg/m}^3$: densidad del aire
- $V = 20 \text{ m}^3$: volumen de la cámara
- $c_p = 1005 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$: calor específico del aire

$$C = 1.2 \cdot 20 \cdot 1005 \approx 24\,120 \text{ J/K}$$

2.1.3. Modelo dinámico resultante

Sustituyendo los valores en la ecuación de estado:

$$\frac{dT(t)}{dt} = -\frac{1}{RC}T(t) + \frac{1}{RC}T_a + \frac{1}{C}Q_{in}(t)$$

$$\frac{1}{RC} = \frac{1}{0.0816 \cdot 24\,120} \approx 5.11 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

Modelo en el dominio de Laplace (con T_a constante):

$$G(s) = \frac{T(s)}{Q_{in}(s)} = \frac{1/C}{s + 1/RC} = \frac{4.15 \times 10^{-5}}{s + 5.11 \times 10^{-4}}$$

Constante de tiempo:

$$\tau = RC = 0.0816 \cdot 24\,120 \approx 1970 \text{ s} \approx 33 \text{ min}$$

Analogía con circuito eléctrico

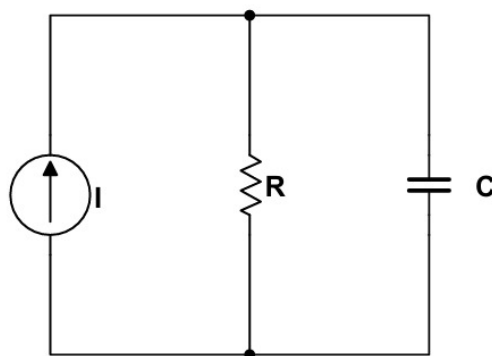


Figura 3: Circuito electrico equivalente

Este modelo térmico es análogo a un circuito eléctrico RC y servirá como base para diseñar el controlador de temperatura de la cámara de frío.

2.2. Modelado matemático del sensor de temperatura

Para el sensado de temperatura en la cámara de frío se requiere un sensor confiable y preciso en rangos típicamente comprendidos entre -30°C y 10°C . Entre las distintas opciones disponibles, se ha seleccionado el uso de un sensor tipo RTD, específicamente un **PT100**, por su buena linealidad, estabilidad y precisión en rangos de temperatura bajos.

2.2.1. Sensor seleccionado: RTD PT100

El sensor PT100 posee una resistencia de $100\ \Omega$ a 0°C , y una pendiente típica de:

$$\alpha = 0.385 \frac{\Omega}{^{\circ}\text{C}}$$

Por lo tanto, la resistencia del sensor varía de forma aproximada según:

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T)$$

donde:

- $R_0 = 100\ \Omega$: resistencia a 0°C
- T : temperatura en grados Celsius
- $\alpha = 0.00385$: coeficiente de temperatura

2.2.2. Condicionamiento de señal

La variación de resistencia del sensor debe convertirse a una señal de voltaje para poder ser procesada por el microcontrolador. Para esto, se implementa un puente de Wheatstone con una etapa amplificadora diferencial.

La diferencia de tensión generada por el sensor suele estar en el orden de los milivoltios, por lo que se utiliza un **amplificador de instrumentación** con ganancia ajustada a $G = 100$.

Configuración básica:

- Tensión de excitación del puente: $V_{\text{exc}} = 5\ \text{V}$
- Variación típica de tensión en el puente: $V_{\text{diff}} \approx 5\ \text{mV}$ (para un cambio de $\pm 30^{\circ}\text{C}$)
- Ganancia del amplificador: $G = 100$
- Salida final: $V_{\text{out}} \approx 0.5\ \text{V}$ (rango adecuado para entrada ADC)

2.2.3. Función de transferencia del sensor

La ganancia efectiva del sistema sensor–amplificador es:

$$G_{\text{sensor}} = \frac{dV_{\text{out}}}{dT} = \left(\frac{dV_{\text{bridge}}}{dR} \cdot \frac{dR}{dT} \right) \cdot G$$

Aproximando linealmente, se puede considerar que la salida final tiene una sensibilidad del orden de:

$$G_{\text{total}} \approx 1 \left[\frac{\text{mV}}{^{\circ}\text{C}} \right]$$

Por lo tanto, la función de transferencia del sensor (incluyendo la amplificación) puede expresarse como:

$$G(s) = 1 \cdot \left[\frac{\text{mV}}{^{\circ}\text{C}} \right] \Rightarrow V(s) = 1 \cdot T(s)$$

Se busca que la realimentación sea unitaria.

Resumen

El uso del sensor PT100, junto con un acondicionamiento adecuado de señal, permite una medición precisa de la temperatura en la cámara de frío. La sensibilidad resultante de 10 mV/°C facilita la lectura mediante un ADC de 10 o 12 bits sin requerir electrónica adicional de alta precisión.

2.3. Modelado matemático del actuador

El actuador seleccionado para el sistema de refrigeración de la cámara de frío es un **relé de estado sólido**, el cual controla el encendido y apagado del sistema de refrigeración.

2.3.1. Características del relé de estado sólido

El relé de estado sólido es un dispositivo electrónico que opera como un interruptor controlado electrónicamente. Debido a su naturaleza de conmutación digital, no introduce ni polos ni ceros al sistema, ni tampoco aporta ganancia dinámica. Su comportamiento puede modelarse simplemente como una ganancia unitaria:

$$G_{\text{actuador}} = 1$$

Esto significa que la señal de control que proviene del controlador pasa directamente al sistema de refrigeración sin alterar la dinámica del mismo.

2.4. Función de transferencia

2.4.1. Función de transferencia del sistema a lazo abierto

Para analizar el comportamiento del sistema sin realimentación, se considera únicamente la serie de bloques que conforman el camino directo desde la entrada de control hasta la salida de temperatura. En este caso, el sistema de refrigeración de la cámara de frío está compuesto por:

- **Controlador:** en esta etapa se asume una ganancia unitaria, es decir, $G_{\text{controlador}}(s) = 1$, con el fin de obtener una primera aproximación del comportamiento de la planta.
- **Actuador:** se implementa mediante un relé de estado sólido con snubber incorporado, el cual actúa como un interruptor electrónico y no afecta a la respuesta del sistema. Por lo tanto, su función de transferencia es simplemente:

$$G_{\text{actuador}}(s) = 1$$

- **Planta (modelo térmico de la cámara de frío):** como se obtuvo anteriormente mediante balance de energía, se modela como un sistema de primer orden:

$$G_{\text{planta}}(s) = \frac{0.0000415}{s + 0.000511}$$

Dado que los bloques están en serie, la función de transferencia del sistema a lazo abierto es:

$$FdTLA(s) = G_{\text{controlador}}(s) \cdot G_{\text{actuador}}(s) \cdot G_{\text{planta}}(s) = 1 \cdot 1 \cdot \frac{0.0000415}{s + 0.000511}$$

$$FdTLA(s) = \frac{0.0000415}{s + 0.000511}$$

Esta función describe la relación entre la entrada de control (señal enviada al actuador) y la salida del sistema (temperatura interna), sin considerar aún la realimentación del sensor.

2.4.2. Función de transferencia del sistema a lazo cerrado

En un sistema de control con retroalimentación, se compara la salida medida con una referencia, y el controlador ajusta la señal de entrada con base en la diferencia. Aquí, la temperatura medida se realimenta utilizando un sensor de temperatura RTD PT100 con acondicionamiento de señal.

- **Sensor + amplificador:** El RTD PT100 no ofrece directamente una señal de voltaje, sino que su resistencia cambia con la temperatura, a razón de unos $0.385 \Omega/^{\circ}\text{C}$. Esta variación se convierte en voltaje a través de un puente de Wheatstone y una etapa de amplificación. Asumiendo una configuración estándar y una ganancia del amplificador de 100, se logra una ganancia global aproximada de:

$$G_{\text{sensor}} \approx 1 \left[\frac{\text{mV}}{^{\circ}\text{C}} \right]$$

Con esta realimentación negativa, la función de transferencia en lazo cerrado del sistema es:

$$FdTLC(s) = \frac{FdTLA(s)}{1 + G_{\text{sensor}} \cdot FdTLA(s)}$$

Sustituyendo:

$$FdTLC(s) = \frac{\frac{0.0000415}{s+0.000511}}{1 + 1 \cdot \frac{0.0000415}{s+0.000511}} = \frac{0.0000415}{s + 0.000511 + 0.0000415}$$

$$FdTLC(s) = \frac{0.0000415}{s + 0.0005493}$$

Esta función representa la dinámica completa del sistema con realimentación: desde la referencia hasta la salida de temperatura, considerando el efecto del sensor y del lazo cerrado.

2.5. Análisis de estabilidad

El análisis de estabilidad nos dice que para toda entrada acotada al sistema, la salida también será acotada. Para este análisis se utilizarán dos enfoques clásicos: el criterio de Routh-Hurwitz y el método del Lugar de Raíces.

Criterio de Routh-Hurwitz: Este criterio permite analizar la estabilidad observando los coeficientes del polinomio característico del sistema en lazo cerrado. Si todas las raíces del denominador de la función de transferencia están en el semiplano izquierdo del plano complejo, el sistema será estable.

Podemos observar que el denominador del sistema en lazo cerrado es $s + 0.0005493$, lo que implica que la única raíz es real y negativa, por lo que el sistema es estable según el criterio de Routh-Hurwitz.

Lugar de raíces: Permite observar cómo varían las raíces del sistema en lazo cerrado a medida que se modifica la ganancia K . A partir del modelo en lazo abierto, se puede analizar gráficamente cómo se desplazan los polos del sistema con diferentes valores de K .

Este análisis permite ajustar la ganancia para mejorar el comportamiento dinámico del sistema sin perder estabilidad. En nuestro caso, con $K = 100$, el polo del sistema se ubica en $s = -0.0005493$, dentro del semiplano izquierdo, confirmando nuevamente la estabilidad del sistema.

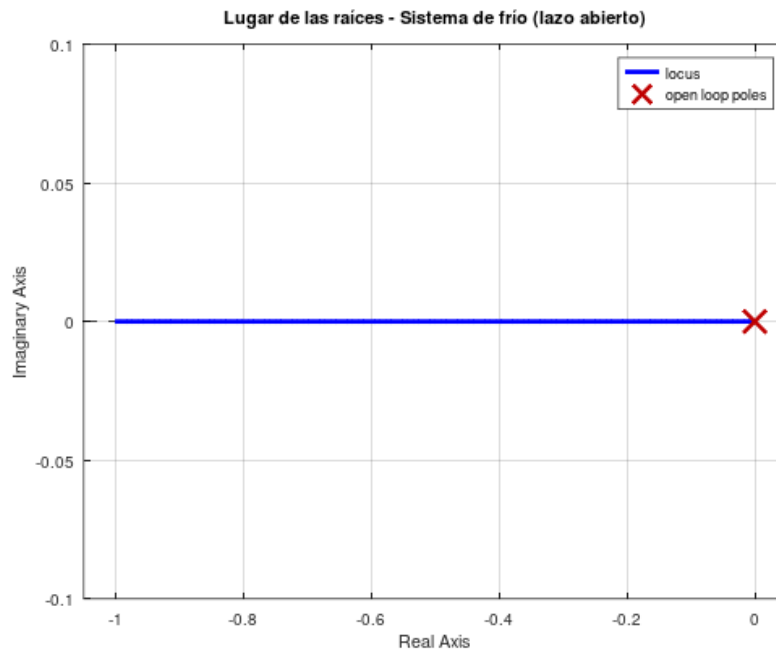


Figura 4: Lugar de raíces

2.6. Análisis temporal

El análisis temporal en un sistema de control permite comprender cómo evoluciona la salida del sistema con respecto al tiempo, especialmente ante cambios en la entrada. En nuestro caso, este análisis es útil para estudiar cómo responde la temperatura de la cámara de frío cuando se aplica una señal escalón.

La función de transferencia en lazo cerrado que modela el comportamiento del sistema es de primer orden y se expresa como:

$$G(s) = \frac{K \cdot 0.0000415}{s + 0.0005493}$$

En esta expresión, el término en el denominador determina la constante de tiempo del sistema, y el numerador representa la ganancia total del lazo cerrado, resultante del producto entre la planta, el sensor y la ganancia K .

2.6.1. Sobrepassamiento máximo

En este sistema no se observa sobrepassamiento ya que su dinámica corresponde a un sistema de primer orden con un solo polo real negativo. Esta clase de sistemas responde de manera gradual y sin oscilaciones ante cambios repentinos, sin exceder el valor final. Además, la ganancia empleada y la ausencia de términos complejos en la función de transferencia aseguran una respuesta monótona decreciente. Así, la temperatura interna se aproxima al valor de referencia de forma estable y sin sobrepassarlo.

2.6.2. Tiempo de establecimiento

El tiempo de establecimiento es una medida del tiempo que tarda la salida del sistema en alcanzar y mantenerse dentro de un margen cercano al valor final deseado,

típicamente alrededor del 98 % del mismo, tras una perturbación o un cambio en la entrada.

Para calcular el tiempo de establecimiento de forma teórica, utilizamos el modelo del sistema a lazo cerrado obtenido previamente:

$$FdTLC(s) = \frac{0.0000415}{s + 0.0005493}$$

Este es un sistema de primer orden, cuya forma general es:

$$G(s) = \frac{K}{s + a}$$

Para sistemas de primer orden, el tiempo de establecimiento (t_s) necesario para que la respuesta alcance y permanezca dentro del 2 % del valor final se calcula mediante la siguiente expresión:

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

En nuestro caso:

$$a = 0.0005493 \Rightarrow t_s = \frac{4}{0.0005493} \approx 7281.99 \text{ s}$$

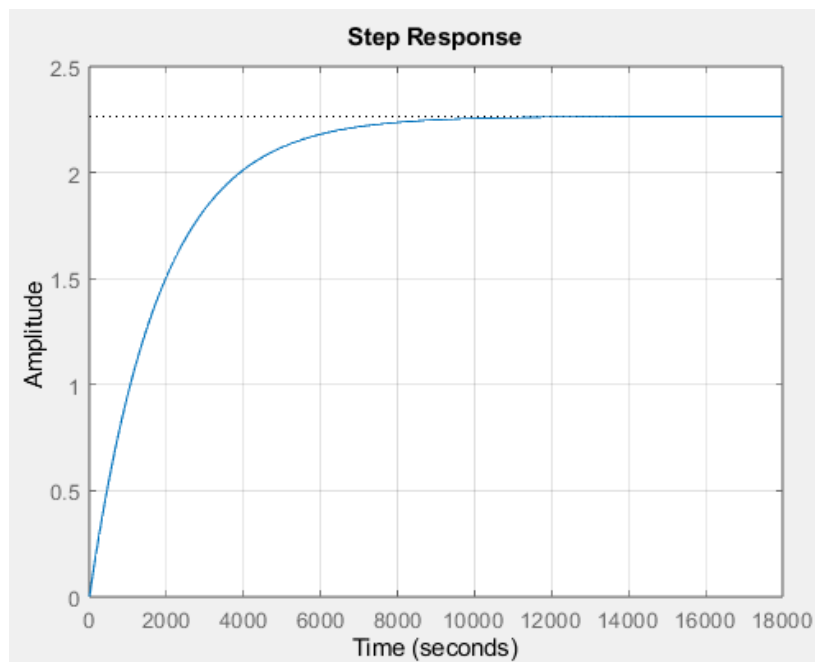


Figura 5: Tiempo de establecimiento de la planta

Vemos que la respuesta simulada coincide con lo calculado de forma teórica.

2.6.3. Polos dominantes

Los polos dominantes de un sistema son aquellos más cercanos al eje imaginario en el plano complejo, ya que son los que más afectan el comportamiento transitorio. En

particular, influyen significativamente en la velocidad de respuesta y en la forma de la salida del sistema.

En nuestro caso, la función de transferencia en lazo cerrado tiene un único polo real ubicado en:

$$s = -0.0005493$$

Como el sistema tiene un solo polo, se comporta como un sistema de primer orden. Esto significa que, cuando se le pide un cambio de temperatura repentino (como un escalón), la respuesta será suave y progresiva: comienza cambiando rápido y luego se va acercando al valor final de a poco, sin pasarse del objetivo ni oscilar.

2.7. Análisis de modelo

Para analizar el comportamiento dinámico del sistema, se simuló su respuesta ante una entrada escalón utilizando MATLAB. El mismo fue negativo, con una temperatura inicial de 25 °C y descendió 30 °C hasta llegar a los -5 °C, que es lo deseado. La figura muestra la respuesta obtenida:

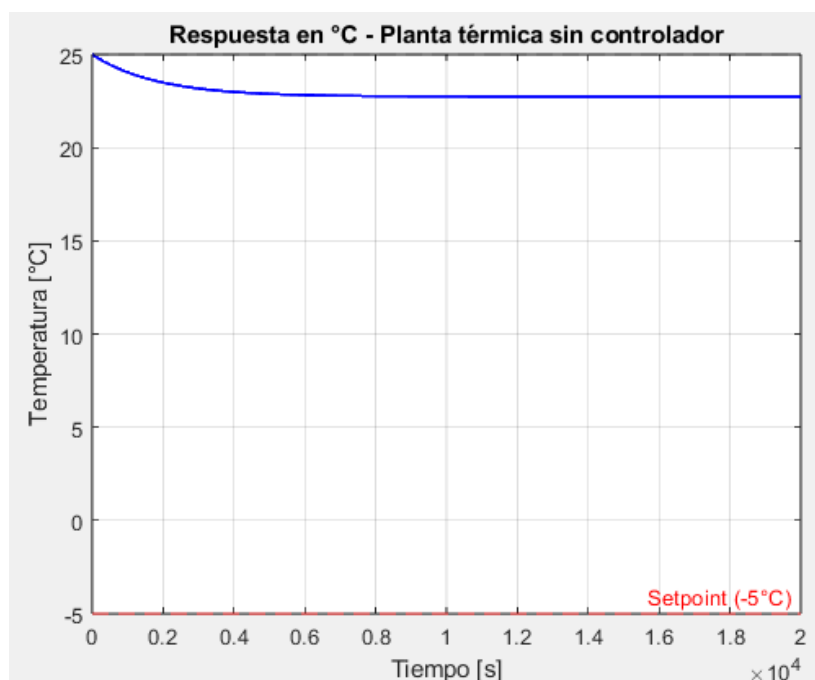


Figura 6: Respuesta del sistema ante un escalón negativo

Vemos que el tiempo de establecimiento se corresponde con lo calculado antes, pero tenemos un gran error en estado estable.

2.8. Error en estado estacionario

Error en estado estacionario para sistemas de realimentación unitaria				
Tipo de Sistema	$R(s) = 1$	$R(s) = \frac{1}{s}$	$R(s) = \frac{1}{s^2}$	$R(s) = \frac{1}{s^3}$
0	0	$\frac{1}{1 + K_0}$	∞	∞
1	0	0	$\frac{1}{K_1}$	∞
2	0	0	0	$\frac{1}{K_2}$

Cuadro 1: Error en estado estacionario para sistemas de realimentación unitaria

El error en estado estacionario (e_{ss}) representa la diferencia entre la señal de referencia y la salida del sistema una vez que este ha alcanzado el régimen permanente. Para sistemas lineales e invariantes en el tiempo, se puede calcular mediante el teorema del valor final:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} [r(t) - y(t)] = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{1}{1 + G(s)} \cdot R(s) \right)$$

En este caso, la entrada al sistema es un escalón de amplitud $A = -30$, es decir:

$$R(s) = \frac{-30}{s}$$

La función de transferencia del sistema a lazo cerrado es:

$$G(s) = \frac{0.0000415}{s + 0.0005493}$$

La ganancia estática se obtiene evaluando la función de transferencia en $s = 0$:

$$G(0) = \frac{0.0000415}{0.0005493} \approx 0.0755$$

Entonces, el error en estado estacionario es:

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + G(0)} \cdot (-30) = \frac{1}{1 + 0.0755} \cdot (-30) \approx -27.89 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$e_{ss} \approx -27.89 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Este resultado indica que, ante un escalón de $-30 \text{ } ^\circ\text{C}$, la salida del sistema apenas disminuye alrededor de $2.11 \text{ } ^\circ\text{C}$, quedando muy lejos de la consigna deseada ($-5 \text{ } ^\circ\text{C}$). Este comportamiento es típico de un sistema **tipo 0**, es decir, sin integradores, el cual no puede seguir entradas escalón sin error.

Podemos comprobar este resultado teórico con lo simulado anteriormente, viendo que el cálculo teórico predice con exactitud el resultado de la simulación.

Para eliminar este error, es necesario agregar un controlador PI que incorpore una acción integradora, garantizando error nulo en estado estacionario frente a entradas tipo escalón.

2.9. Diseño del compensador

A fin de mejorar el desempeño del sistema térmico, se diseñó un controlador proporcional-integral para reducir el error en estado estacionario y acelerar la respuesta del sistema frente a cambios en la temperatura.

El sistema a lazo abierto se caracteriza por un comportamiento de primer orden con una constante de tiempo grande, lo que implica una respuesta lenta y un error permanente ante entradas escalón.

Es importante saber que este tipo de controlador tarda un poco en reaccionar al principio, no actúa de inmediato. Sin embargo, eso no es un problema en nuestro caso, porque lo que realmente nos interesa es que, una vez que el sistema se estabiliza, la temperatura final sea lo más precisa posible. Esto es clave para que la cámara de frío funcione correctamente.

Para diseñar el PI se empleó el método de cancelación de polos, el controlador PI resultante tiene la siguiente forma general:

$$PI(s) = K_p \cdot \frac{s + 1/T_i}{s}$$

Donde:

- T_i : tiempo de integración
- k_p : constante proporcional

Aplicando esto a nuestro sistema resulta:

$$FdTLA_{Compensada} = PI(s) \cdot FdTLA = K_p \frac{s + \frac{1}{T_i}}{s} \cdot \frac{0.0000415}{s + 0.0005493} \quad (1)$$

Escogemos el tiempo de integración para anular el único polo en la ecuación característica original.

$$T_i = \left| \frac{1}{\text{pole}(FdTLA)} \right| = 1820.5 \quad (2)$$

Para determinar el valor de la constante proporcional K_p , es necesario calcular la frecuencia natural no amortiguada W_n mediante el análisis del lugar de raíces. Siendo un sistema de primer orden, el tiempo de establecimiento se expresa por:

$$Ts = 4\tau \quad \tau = \frac{1}{\xi W_n} \quad (3)$$

Viendo el lugar de raíces:

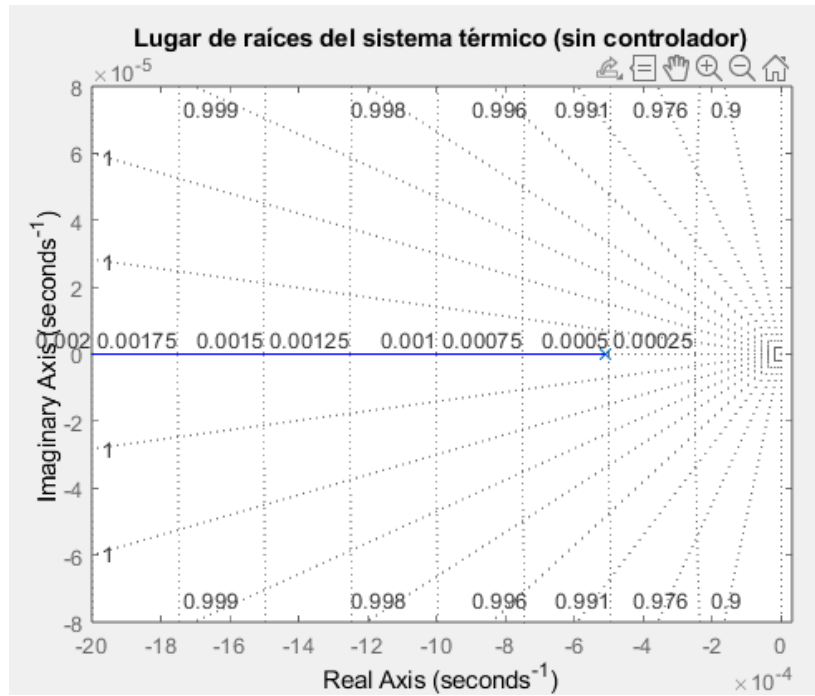


Figura 7: Lugar de raíces

podemos deducir que $\xi = 1$, entonces:

$$Ts = 4\tau = \frac{4}{W_n} \quad (4)$$

Ahora elegimos un tiempo de establecimiento acorde a una cámara de frío de 1 hora aproximadamente. Entonces:

$$Ts = \frac{4}{\omega_n} = 3600 \implies \omega_n = \frac{4}{3600} = 0.00111 \text{ rad/s} \quad (5)$$

Dado este valor de W_n , buscamos en el lugar de raíces la semicircunferencia que corresponde a esa frecuencia. Así, obtenemos la coordenada en el plano complejo que permite lograr la ganancia deseada cumpliendo con la condición de módulo.

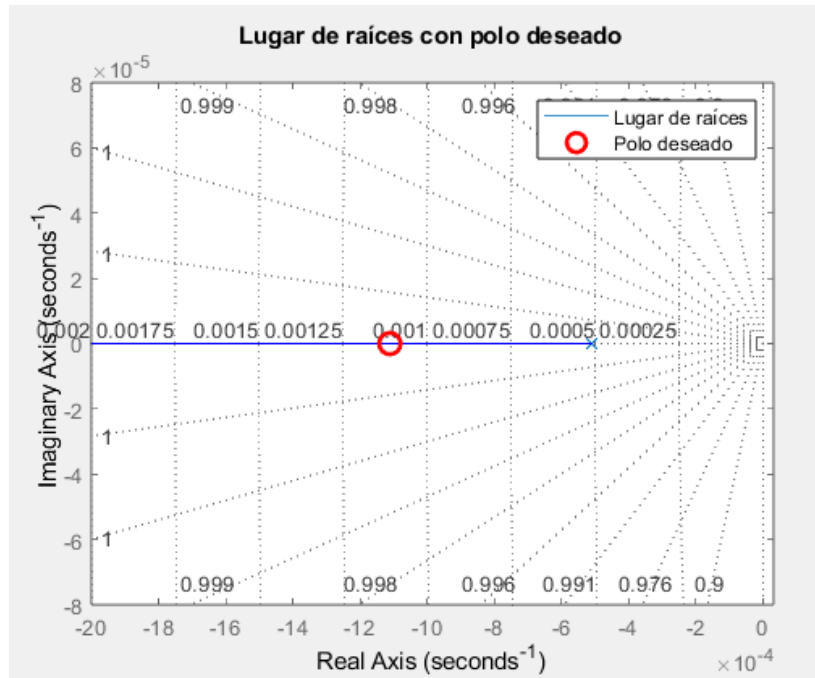


Figura 8: Lugar de raíces

Usando ese punto como referencia, establecemos la condición del módulo y hallamos el valor de la constante proporcional

$$K_p = \left| \frac{1}{G(s)} \right| = 1.18776 \quad (6)$$

El compensador nos queda:

$$PI(s) = 1.18776 \cdot \frac{s + \frac{1}{1820.5}}{s} \quad (7)$$

$$FdTLC_{PI} = PI(s) \cdot FdTLA = 1.18776 \cdot \frac{s + \frac{1}{1820.5}}{s} \cdot \frac{0.0000415}{s + 0.000511} = \frac{0.00111}{s}$$

El sistema en lazo cerrado, al aplicar realimentación unitaria, toma la siguiente forma:

$$FdTLC_{PI} = \frac{FdTLC_{PI}}{1 + FdTLC_{PI}} = \frac{0.00111}{s + 0.00111}$$

Con esta nueva función de transferencia se puede analizar nuevamente el comportamiento en estado estacionario del sistema frente a una entrada escalón.

Para cuantificar esto, se utiliza la constante de error de posición K_p , definida como:

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} FdTLC_{PI}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{0.00111}{s} = \infty$$

Luego, el error en régimen ante una entrada escalón unitaria se calcula como:

$$e_p = \frac{1}{1 + K_p} = \frac{1}{1 + \infty} = 0 \Rightarrow e_p \cdot 100 = 0\%$$

Esto confirma que el uso del controlador PI elimina completamente el error en estado estacionario frente a una referencia constante, asegurando que la cámara de frío alcance exactamente la temperatura deseada con precisión, condición crítica para mantener la calidad del producto almacenado.

El resultado obtenido fue el siguiente:

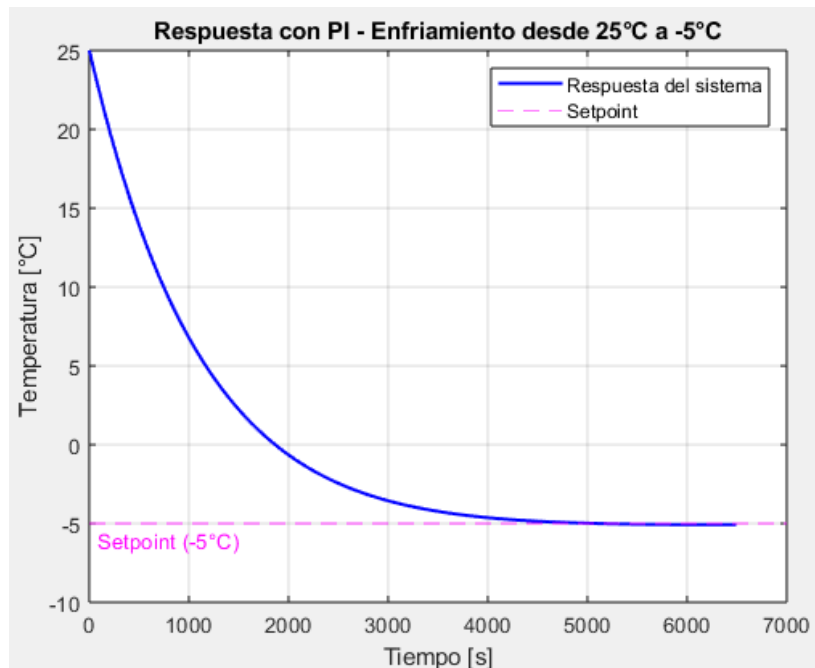


Figura 9: Respuesta del sistema compensado

Vemos que el sistema se comporta de forma correcta, sin error en estado estacionario.

2.10. Simulación en simulink

Se realizó una simulación de este sistema utilizando el entorno de Simulink. El sistema simulado fue el siguiente:

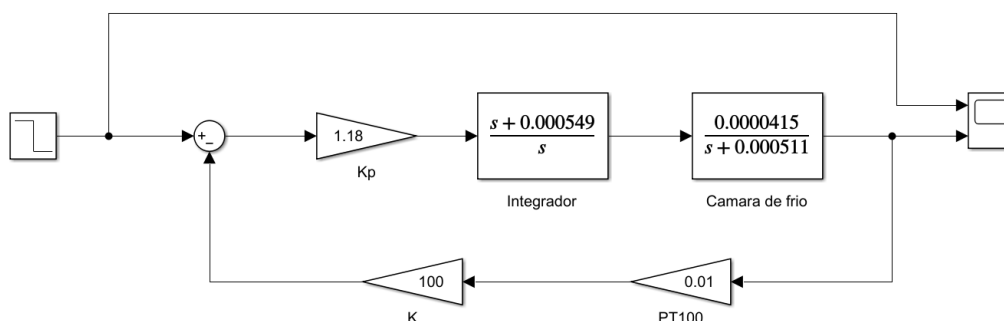


Figura 10: Diagrama en bloques de simulink

El modelo desarrollado en Simulink busca representar el comportamiento de una cámara frigorífica bajo el control de un controlador PI. La realimentación del sistema está modelada mediante un bloque de ganancia de valor **0,01**, que representa la señal proveniente del sensor de temperatura **PT100**. Esta señal, una vez obtenida, es amplificada por un factor de **100**, lo que emula el comportamiento del *amplificador operacional* (OP) mencionado previamente en el informe que nos da una ganancia unitaria.

El controlador PI está compuesto por dos bloques: un **bloque de ganancia** (K_p) que representa la acción proporcional, y un **bloque integrador** (Integrador) que representa la acción integral. Ambos conforman el lazo de control que actúa sobre la planta, modelada como la **cámara frigorífica**.

Durante la simulación, se ajustaron los valores de los parámetros del controlador con el objetivo de lograr una respuesta dinámica óptima del sistema. Estos ajustes permitieron obtener una buena regulación de la temperatura, minimizando el error en régimen permanente y logrando una respuesta estable y rápida ante cambios en la referencia.

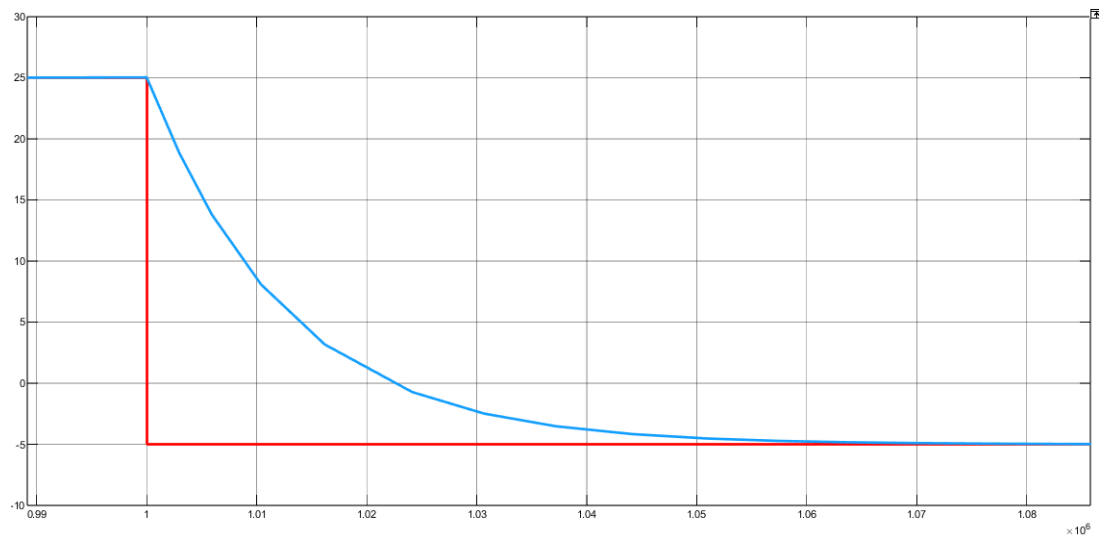


Figura 11: Resultado de la simulación

Vemos que los resultados de la simulación son similares a lo obtenido mediante MATLAB.

3. Conclusión

En este trabajo se analizó cómo funciona el sistema de control de temperatura de una cámara de frío, con el objetivo de mantener una temperatura estable y adecuada para conservar productos sensibles. A partir del comportamiento del sistema, se construyó un modelo que permitió entender cómo responde ante distintos cambios de temperatura.

Se comprobó que, si bien el sistema responde de forma estable y sin oscilaciones, tarda bastante en llegar al valor deseado y presenta un error en estado estable importante si no se usa un controlador adecuado. Para solucionar esto, se diseñó un controlador PI que mejora mucho la precisión del sistema, logrando que la temperatura final se mantenga en el valor correcto sin errores.

Gracias al uso del controlador, se logra un funcionamiento más confiable, ideal para mantener productos en condiciones seguras dentro de la cámara. Si bien todavía hay margen para seguir mejorando el tiempo de respuesta, el sistema cumple con su objetivo principal: mantener la temperatura controlada de forma efectiva.

4. Bibliografía

1. Katsuhiko Ogata '*Ingeniería de control moderna*'. Editorial Pearson.
2. Benjamin C. Kuo '*Sistemas de control Automático*'. Editorial Prentice Hall.
3. <https://www.intarcon.com/tipos-de-camaras-frigorificas>
4. <https://ctms.engin.umich.edu/>
5. <https://github.com/Pw-Nax/SistemasdeControl1>