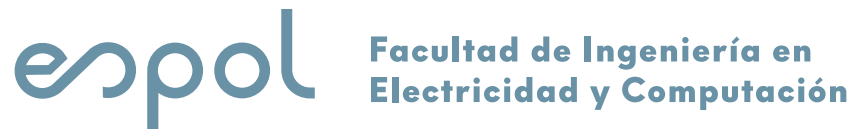




ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación



“DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA UNA
CÁMARA DE PRUEBAS EXPERIMENTALES DE CLIMATIZACIÓN,
CONTRASTANDO TÉCNICAS DE CONTROL CLÁSICO VERSUS
MODERNO”

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

MAGÍSTER EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL

Presentado por:

Víctor Andrés Arce Domínguez

Carlos Xavier Zorrilla Gudiño

Guayaquil – Ecuador

2022

AGRADECIMIENTO

Agradezco muy profundamente a mis padres Luis Zorrilla Vélez y Maria Gudiño Riofrío por todos sus consejos, por la confianza puesta en mí y por sus valores y principios que nos han inculcado. Gracias a todos los profesores parte de mi vida académica, especialmente al Phd. Douglas Plaza y al Phd Efren Herrera Muentes por la impartición de sus brillantes conocimientos y su paciencia en cada una de sus clases.

Carlos Xavier Zorrilla Gudiño.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por guiarme en mi camino y por permitirme concluir con mi objetivo. A todas las personas que me apoyaron e hicieron posible que este trabajo se realice con éxito. A mi tutor y revisor por el tiempo dedicado. A todos mis familiares y amigos por su apoyo incondicional. Finalmente pero no por eso menos importante a mi esposa e hijo por la paciencia y el amor que me han mostrado en este largo camino.

Víctor Andrés Arce Domínguez.

DEDICATORIA

El siguiente trabajo está dedicado a mis padres por todo el sacrificio, gracias a su amor y esfuerzo he logrado cumplir todas mis metas trazadas. A mis hermanos que siempre han estado como apoyo en las buenas y en las malas y a todos mis compañeros y amigos que juntos hemos recorrido este camino y compartidos conocimientos.

Carlos Xavier Zorrilla Gudiño.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado con todo mi amor y cariño a mi amada esposa Malketh por su incondicional apoyo, ya que sin ella no lo habría logrado. A mi amado hijo Fabían Emilio todo este trabajo y esfuerzo también es dedicado a ti a tu futuro.

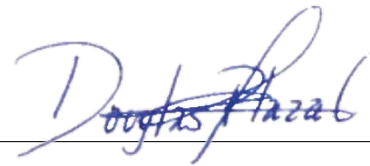
Víctor Andrés Arce Domínguez.

COMITÉ EVALUADOR



PhD. Efrén Herrera Muentes

DIRECTOR

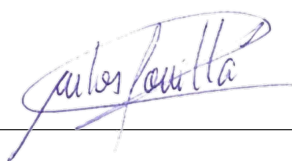


PhD. Douglas Plaza Guingla

EVALUADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Carlos Zorrilla y Víctor Arce damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”.



Carlos Xavier Zorrilla Gudiño



Víctor Andrés Arce Domínguez

RESUMEN

El presente trabajo consiste en el diseño y simulación del control de temperatura de una cámara de pruebas experimentales de climatización, empleando técnicas de control clásico (PID) y técnicas de control moderno (reubicación de polos por variables de estado)

En el primer capítulo se expone la problemática a resolver respecto al control de temperatura, los antecedentes, objetivos que se persiguen en el presente documento, la justificación del desarrollo y el alcance del trabajo.

En el segundo capítulo se presenta el marco teórico en el que se basa el actual trabajo, lo que incluye conceptos de identificación de sistemas, controladores PID y controladores por reubicación de polos.

El tercer capítulo presenta todo el proceso de identificación de la cámara de pruebas experimentales, desde la primera aproximación por medio de un método de dos puntos, hasta la identificación paramétrica desde los datos obtenidos en el experimento diseñado.

En el capítulo cuatro se presentan el proceso de diseño de los controladores a partir de los modelos obtenidos del capítulo anterior, así mismo se muestran las simulaciones y los índices de desempeño a lazo cerrado.

El quinto capítulo detalla los resultados obtenidos, la comparación entre los índices de desempeño de los controladores diseñados en el capítulo anterior, y su correspondiente análisis de cual tiene la mejor respuesta en la planta.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimiento	II
Agradecimiento	III
Dedicatoria	IV
Dedicatoria	V
Comité Evaluador	VI
Declaración Expresa	VII
Resumen	VIII
Índice General	X
Índice de figuras	XIII
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 Identificación del problema	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivo General	3
1.4 Metodología	4
1.5 Alcance	4
2 MARCO TEÓRICO	6

2.1	Identificación de sistemas	6
2.1.1	Identificación de caja gris	6
2.2	Controlador PID	9
2.3	Controlador por reubicación de polos	11
3	Identificación de la cámara de pruebas experimentales	12
3.1	Diseño de la señal de entrada	12
3.1.1	Diseño para planta en calentamiento	12
3.1.2	Diseño para planta en enfriamiento	16
3.2	Análisis de la respuesta de la planta ante la señal de entrada	19
3.2.1	Análisis de la respuesta de la planta en calentamiento	19
3.2.2	Análisis de la respuesta de la planta en enfriamiento	24
3.3	Obtención de la función de transferencia y de la representación en variables de estados	27
3.3.1	Planta de calentamiento	27
3.3.2	Planta de enfriamiento	29
4	Diseño de los controladores	31
4.1	Diseño del controlador PID	31
4.1.1	Controlador PID para la planta de calentamiento	32
4.1.2	Controlador PID para la planta de enfriamiento	32
4.2	Diseño del controlador mediante variables de estado	33
4.2.1	Controlador por reubicación de polos para la planta de calentamiento	34
4.2.2	Controlador por reubicación de polos para la planta de enfriamiento	34
4.3	Simulación de los controladores en las plantas identificadas	35
4.3.1	Simulación en la planta de Calentamiento	35

4.3.2 Simulación en la planta de Enfriamiento	37
5 Análisis de resultados obtenidos	39
5.1 Respuesta de la planta ante la acción del controlador PID	40
5.2 Respuesta de la planta ante la acción del controlador por reubicación de polos	42
5.3 Análisis comparativo del desempeño de los controladores	44
Conclusiones y Recomendaciones	47
Bibliografía	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Método de dos puntos de Smith	7
Figura 2.2	Diagrama de un sistema a lazo cerrado con control PID .	9
Figura 3.1	Esquema para la toma de datos en calentamiento . . .	13
Figura 3.2	Esquema para la toma de datos en calentamiento . . .	13
Figura 3.3	Señal de entrada PRBS	15
Figura 3.4	Esquema para la aplicación de la señal PRBS	15
Figura 3.5	Esquema para la toma de datos en enfriamiento	16
Figura 3.6	Esquema para la toma de datos en enfriamiento	17
Figura 3.7	Señal de entrada PRBS	18
Figura 3.8	Esquema para la aplicación de la señal PRBS	19
Figura 3.9	Datos de la planta de calentamiento	20
Figura 3.10	Datos cargados en el toolbox SystemIdentification . . .	20
Figura 3.11	Eliminación de medias	21
Figura 3.12	Datos de Estimación y Validación	22
Figura 3.13	Mejores modelos obtenidos	23
Figura 3.14	Autocorrelación y correlación cruzada	24
Figura 3.15	Datos de la planta de enfriamiento	24
Figura 3.16	Datos de Estimación y Validación	25
Figura 3.17	Mejores modelos obtenidos	26
Figura 3.18	Autocorrelación y correlación cruzada	27
Figura 3.19	Representación en variables de estado	28

Figura 3.20	Respuesta a la entrada escalón de G_C	29
Figura 3.21	Respuesta a la entrada escalón de G_F	30
Figura 4.1	Diseño controlador PID de la planta de calentamiento . . .	32
Figura 4.2	Diseño controlador PID de la planta de calentamiento . . .	33
Figura 4.3	Diagrama de Simulink con la planta de calor	35
Figura 4.4	Respuesta de la planta de calentamiento a lazo cerrado	36
Figura 4.5	Señal de acción de ambos controladores	36
Figura 4.6	Diagrama de Simulink con la planta de frío	37
Figura 4.7	Respuesta de la planta de enfriamiento a lazo cerrado .	38
Figura 4.8	Señal de acción de ambos controladores	38
Figura 5.1	Señal de referencia para el experimento	40
Figura 5.2	Diagrama de simulink experimento completo	41
Figura 5.3	Respuesta de la planta ante la señal de referencia . . .	41
Figura 5.4	Señales de control del PID de calentamiento y de enfriamiento	42
Figura 5.5	Diagrama de simulink experimento completo	43
Figura 5.6	Respuesta de la planta ante la señal de referencia . . .	43
Figura 5.7	Señales de control de los controladores por reubicación de polos en calentamiento y en enfriamiento	44
Figura 5.8	Comparación entre la respuesta de los dos controladores	45
Figura 5.9	Comparación entre las acciones de control	45
Figura 5.10	Comparación entre las señales de error	46

Capítulo 1

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Identificación del problema

En la actualidad, el diseño de prótesis ha dado grandes avances tecnológicos, como la posibilidad de enviar al cerebro la sensación del tacto o la fuerza usada en la extremidad artificial a través de señales mioeléctricas [1]. La temperatura es una de las sensaciones importantes a percibir, por lo que es fundamental analizar el efecto de los cambios de temperatura en el cuerpo humano [2].

En el estudio realizado en [3] se encontró la necesidad de caracterizar el efecto de los cambios de temperatura sobre las extremidades superiores y para ello se diseñó un experimento en el cual se somete al brazo del sujeto de pruebas a cambios de temperatura, controlando la calefacción de la cámara de pruebas

y dejando que el enfriamiento sea de forma natural dependiendo únicamente de su dinámica. Con esta configuración, tiempos de calefacción y enfriamiento fueron distintos y se observó un comportamiento diferente en la respuesta del cuerpo para variaciones de incremento y decremento en la temperatura.

Debido a las diferencias encontradas en el comportamiento, es necesario determinar si es una respuesta a los cambios de temperatura o a los tiempos de reacción de la fuente de calefacción y del enfriamiento natural. Por lo cual se agregó a la cámara una fuente de enfriamiento para realizar un nuevo experimento en un ambiente controlado, donde es imprescindible manipular los tiempos de reacción de las fuentes que proporcionan calor (Lámparas incandescentes) y las que extraen calor (Conjunto ventilador-celda peltier), de tal forma que los tiempos sean lo más similares entre sí.

1.2. Justificación

Para determinar las causas del comportamiento observado en el experimento anterior, es necesario el diseño de un sistema que permita controlar los cambios de temperatura, así como los tiempos de reacción en la cámara de pruebas ya sea por calefacción o enfriamiento, lo cual ayudará a tener un ambiente controlado durante el nuevo experimento, lo que permitirá recabar datos de utilidad para la investigación.

En el presente trabajo se diseñarán, y analizarán dos tipos de

controladores, que actuarán tanto para calefacción como para enfriamiento, escogiendo el que tenga el mejor desempeño, de tal manera que el estímulo al que será sometido el sujeto de pruebas tenga características similares, tanto en el aumento como en la disminución de la temperatura.

1.3. Objetivo General

Diseñar un sistema de control de temperatura, mediante técnicas de control clásico y moderno, para la manipulación de los tiempos de reacción en los sistemas de calefacción y enfriamiento.

Objetivos Específicos

- Identificar las características de la cámara de pruebas mediante técnicas de identificación por software.
- Aplicar técnicas de control clásico, para el diseño de un controlador PID.
- Aplicar técnicas de control moderno, para el diseño de un controlador por reubicación de polos.
- Escoger el controlador que se adapte a las necesidades mediante la comparativa de los índices de desempeño.

1.4. Metodología

Se iniciará determinando el comportamiento y la dinámica de la planta, para lo cual se diseñará una señal de entrada amigable con el proceso, la misma que se aplicará a la cámara de pruebas experimentales, a partir de ello se recolectarán datos de la respuesta de la cámara, dichos datos serán usados en el proceso de identificación, obteniendo la función de transferencia y la representación de variables de estados.

A partir de la función de transferencia obtenida previamente, y basándose en la teoría de control clásico se diseñará el controlador PID, de igual forma con la representación de variables de estados y basado en la teoría de control moderno se diseñará un controlador por reubicación de polos. Con los controladores diseñados se probará su funcionamiento mediante simulación, de esta manera se medirá el desempeño de cada uno, para su respectivo análisis.

Finalmente se evaluará cuál de los controladores tiene el mejor desempeño, cumpliendo los criterios de diseño, tanto para la calefacción como para el enfriamiento.

1.5. Alcance

El presente trabajo cubrirá los puntos indicados a continuación:

- Prueba de respuesta de la planta ante entrada escalón.

- Diseño de la señal binaria pseudoaleatoria para experimento de identificación.
- Identificación de las funciones de transferencia y representación de variables de estado.
- Diseño de controladores PID.
- Diseño de controladores por reubicación de polos.
- Simulación y comparación del comportamiento del sistema a lazo cerrado

Capítulo 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Identificación de sistemas

La identificación de sistemas consiste en un método de modelamiento que busca encontrar como se relacionan la entrada y la salida de un sistema dinámico, el proceso se basa en tomar mediciones de la señal de entrada y salida de una planta, posteriormente analizarlo y tratar de hallar una relación matemática que describa el proceso.

2.1.1. Identificación de caja gris

En este tipo de identificación no es indispensable conocer a detalle la mecánica del sistema, más bien se basa en tener una idea generalizada del funcionamiento con el objetivo de diseñar

un experimento que permita realizar el análisis matemático para dimensionar un modelo del proceso.

Método de la curva de reacción

El método de dos puntos de Smith o método de la curva de reacción consiste en tomar dos muestras de tiempo, cuando la curva alcance el 28.3% y el 63.2% del valor final, denominándolos T1 y T2 respectivamente.

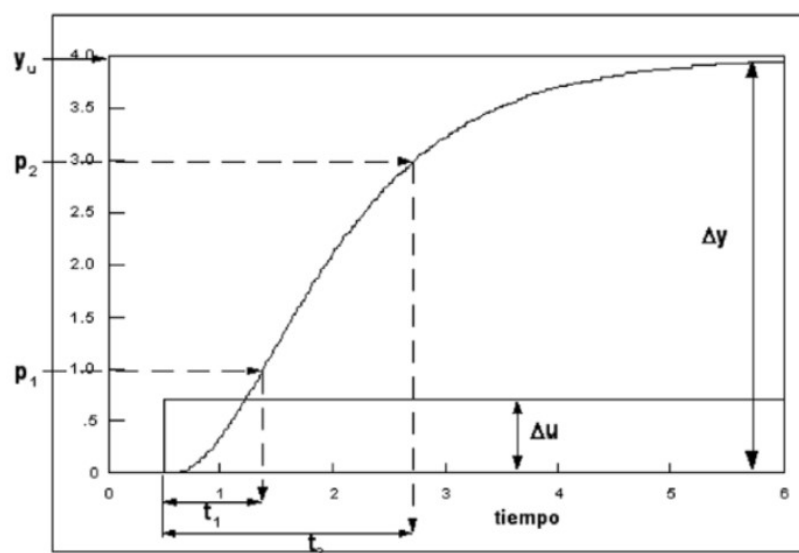


Figura 2.1: Método de dos puntos de Smith

Los pasos para obtener la curva de reacción son los siguientes:

1. Planta a Lazo abierto.
2. Estabilizar el sistema.
3. Aplicar una entrada escalón.
4. Toma de datos de la variable controladora luego del escalón.

Una vez realizado el experimento de toma de datos se espera obtener una función de transferencia de orden reducido como se muestra a continuación:

$$G_p = \frac{k_p e^{-t_m s}}{\tau s + 1}$$

Donde los parámetros de la función de transferencia obedecen a las siguientes ecuaciones:

$$k_p = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

$$t_m = 1,5T_1 - 0,5T_2$$

$$\tau = -1,5T_1 + 1,5T_2$$

Métodos Paramétricos

Estos métodos tienen el objetivo de encontrar los parámetros de una estructura elegida previamente que logre representar el comportamiento de un sistema incluso cuando este sea afectado por el ruido, estos métodos entran dentro de la clasificación de predicción de error y son los siguientes:

- ARX
- ARMAX
- Output Error (OE)
- Box-Jenkins (BJ)

Estos métodos pretenden modelar el sistema con la siguiente estructura, donde se incluye el ruido:

$$y(t) = G(z^{-1}, \theta) u(t) + H(z^{-1}, \theta) e(t)$$

2.2. Controlador PID

Método de control que se utiliza para el control de procesos cotidianos o industriales debido a su sencillez y buenas prestaciones. El controlado Proporcional-Integral-Derivativo (PID), consiste en la suma de las 3 ganancias con respecto al error entre la señal medida y la señal deseada, con el objetivo de lograr características dinámicas particulares y estables, el controlador PID obedece a la siguiente estructura:

$$c(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}$$

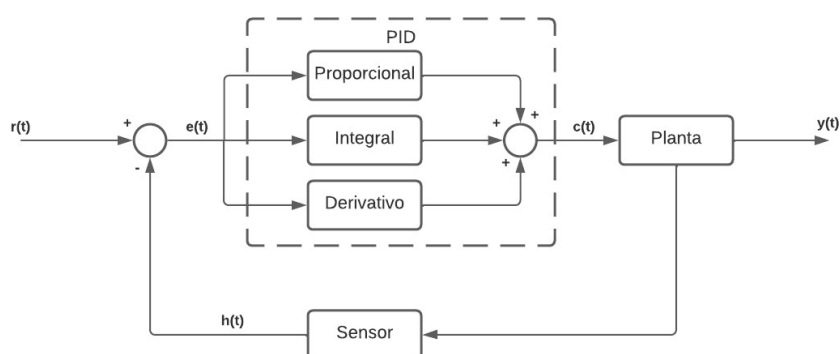


Figura 2.2: Diagrama de un sistema a lazo cerrado con control PID

Controlador proporcional

La ganancia proporcional permite realizar una acción de control basado en la diferencia entre la referencia y la variable medida, con el objetivo de llegar a un error cero. El error del proceso normalmente no se puede eliminar en un proceso dinámico, por lo que siempre se tendrá una señal de salida basada en la ganancia proporcional.

Controlador integral

La ganancia integral del controlador está basado en la suma del error del sistema en cuestión del tiempo. Cuando el sistema logra la estabilidad, la acción integral permite eliminar el error de estado estacionario. Esto permite estabilizar el sistema al ser añadido al controlador proporcional.

Controlador derivativo

La ganancia derivativa se basa en la tasa de cambio del error. De esta manera, si el error es grande, la salida tomará un gran valor debido a la diferencia entre la referencia y el error. El efecto que tiene la acción derivativa en el sistema es que aumentará la velocidad de reacción de la salida de este, haciendo que se reduzca el tiempo de estabilización. Sin embargo, sacrifica un poco el sobrenivel porcentual del sistema, haciéndolo más oscilante.

2.3. Controlador por reubicación de polos

La reubicación de polos se aplica para obtener un comportamiento en la planta basándose la localización de polos de esta y reubicándolos a una postura deseada, donde su comportamiento seguirá las especificaciones del diseño.

Para el diseño de un controlador por reubicación de polos, se necesita conocer a priori la dinámica de la planta, para conocer los polos originales y poder manipular su localización a lazo cerrado y de esta forma obtener una contestación específica.

La representación en tiempo discreto de las especificaciones del diseñador se observa en la ecuación (2.1).

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})u(t) \quad (2.1)$$

Donde $A(z^{-1})$ son los polos de lazo abierto, $y(t)$ es la salida del sistema, d el retardo en el tiempo, $B(z^{-1})$ los ceros de lazo abierto y $u(t)$ la acción de control.

Basándose en la teoría de control la asignación de polos sigue una estructura de seguidor de referencia y se puede expresar como se observa en la ecuación (2.2).

$$R(z^{-1})u(t) = T(z^{-1})w(t) - S(z^{-1})y(t) \quad (2.2)$$

Capítulo 3

3. Identificación de la cámara de pruebas experimentales

3.1. Diseño de la señal de entrada

Debido a que la cámara de pruebas experimentales tiene dos sistemas con dinámicas distintas, uno de calentamiento y otro de enfriamiento, es necesario realizar el diseño de dos experimentos:

- Diseño para planta en calentamiento
- Diseño para planta en enfriamiento

3.1.1. Diseño para planta en calentamiento

La primera parte del experimento consiste en obtener una función de transferencia aproximada por medio del método de la curva de reacción, para lo cual se envía una señal de entrada al driver del

calentador, en esta caso un voltaje de 5 voltios y se espera a que la señal llegue a una temperatura de asentamiento, estos datos de temperatura se registran para su posterior análisis, el esquema para realizar la toma de datos se muestra en la figura a continuación.

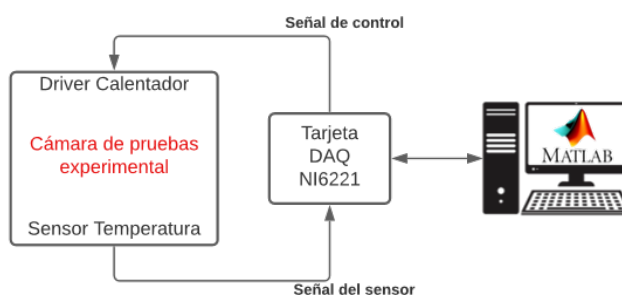


Figura 3.1: Esquema para la toma de datos en calentamiento

Una vez tomado los datos se obtuvo una gráfica de los mismos, con la cual se procede a realizar los cálculos de la curva de reacción, en este caso usando dos puntos para el estimación, estos son al 63.2% y al 28.3% del valor temperatura en el asentamiento, tal como se muestra en la 3.2.

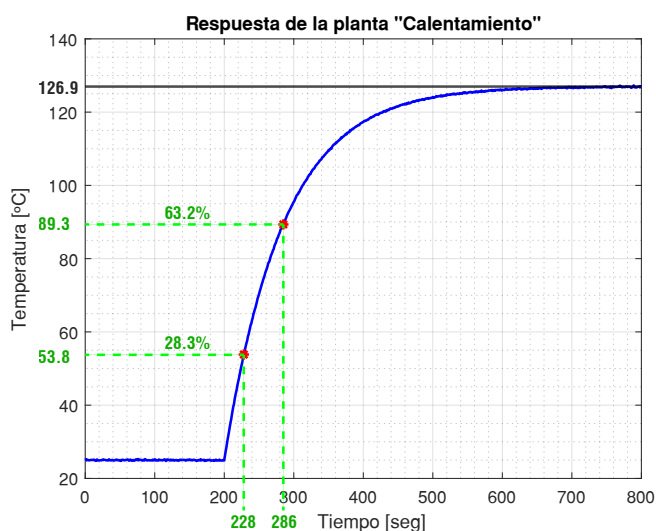


Figura 3.2: Esquema para la toma de datos en calentamiento

Con los puntos tomados a los porcentajes mencionados se estima el tiempo de ambos los cuales se muestran a continuación:

$$T_{63,2\%} = 89,3^{\circ}C \rightarrow t1 = 285,8seg$$

$$T_{28,3\%} = 53,8^{\circ}C \rightarrow t2 = 228,1seg$$

Con los tiempos obtenidos se procede a realizar los cálculos para obtener los parámetros de la función de transferencia como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$tao_C = (-1,5 \cdot t1) + (1,5 \cdot t2) \quad (3.1)$$

$$k_C = \frac{(T_{final} - T_{ambi})}{5} \quad (3.2)$$

Con los parámetros calculados se obtiene la función de transferencia aproximada de la planta en calentamiento la cual se muestra a continuación:

$$G_{C_{APROX}} = \frac{20,83}{85,33s + 1} \quad (3.3)$$

Con la función de transferencia aproximada, se diseña la señal binaria pseudoaleatoria (PRBS) que tengan el tiempo y la duración adecuado para realizar una identificación del sistema completo, la cual cumple las siguiente características:

- Amplitud = 0.2
- Tiempo de muestreo = 10.72 [seg]
- Orden = 8
- Numero de periodos = 1

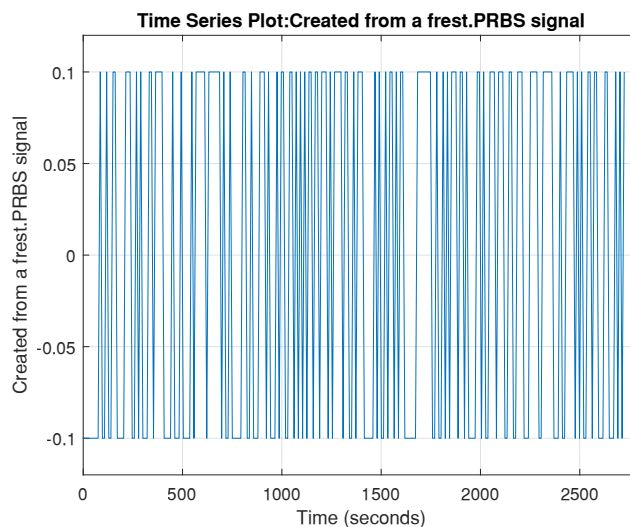


Figura 3.3: Señal de entrada PRBS

Con la señal de entrada obtenida se procede a diseñar el experimento para la identificación de la planta de calor, en la cual se usará el mismo esquema de conexión con la planta mostrado en la figura 3.1, pero añadiendo una señal escalón para alcanzar un punto de operación en estado estacionario, a partir de alcanzar el estado estacionario se aplica la señal PRBS alrededor de dicho punto, tal como se muestra en la figura a continuación:

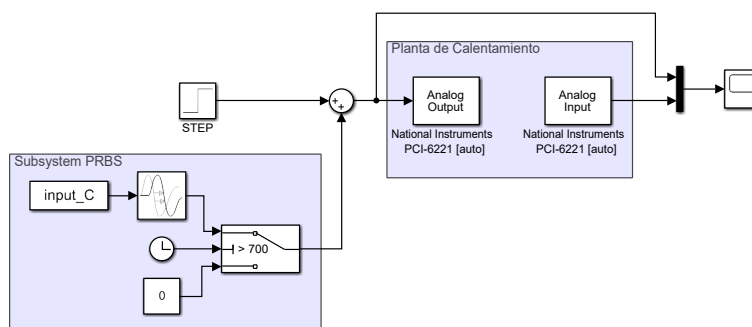


Figura 3.4: Esquema para la aplicación de la señal PRBS

3.1.2. Diseño para planta en enfriamiento

Al igual que en el caso anterior, la primera parte del experimento consiste en obtener una función de transferencia aproximada por medio del método de la curva de reacción, para lo cual se envía una señal de entrada al driver del enfriador, en esta caso un voltaje de 5 voltios y se espera a que la señal llegue a una temperatura de asentamiento, estos datos de temperatura se registran para su posterior análisis, el esquema para realizar la toma de datos se muestra en la figura a continuación.

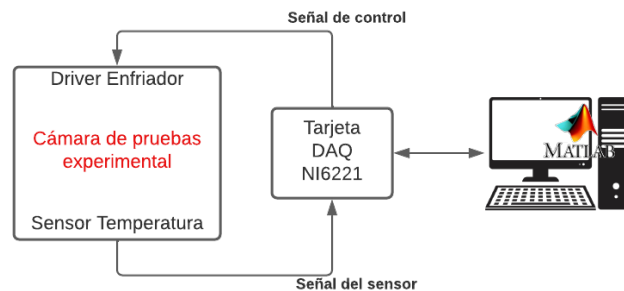


Figura 3.5: Esquema para la toma de datos en enfriamiento

Una vez tomado los datos se obtuvo una gráfica de los mismos, con la cual se procede a realizar los cálculos de la curva de reacción, en este caso usando dos puntos para el estimación, estos son al 63.2% y al 28.3% del valor temperatura en el asentamiento, tal como se muestra en la 3.2.

Con los puntos tomados a los porcentajes mencionados se estima el tiempo de ambos los cuales se muestran a continuación:

$$T_{63,2\%} = 14,8^{\circ}C \rightarrow t1 = 239,1seg$$

$$T_{28,3\%} = 20,1^{\circ}C \rightarrow t2 = 213,1seg$$

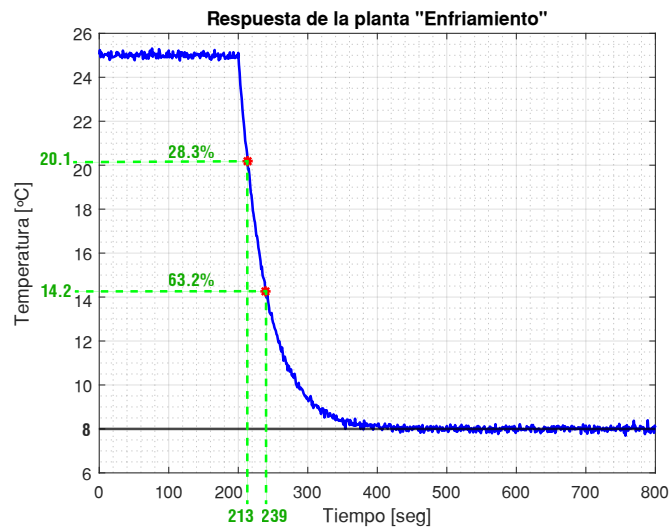


Figura 3.6: Esquema para la toma de datos en enfriamiento

Con los tiempos obtenidos se procede a realizar los cálculos para obtener los parámetros de la función de transferencia como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$tao_C = (-1,5 \cdot t1) + (1,5 \cdot t2) \quad (3.4)$$

$$k_C = \frac{(T_{final} - T_{ambi})}{5} \quad (3.5)$$

Con los parámetros calculados se obtiene la función de transferencia aproximada de la planta en enfriamiento la cual se muestra a continuación:

$$G_{FAPROX} = \frac{-3,4}{38,59s + 1} \quad (3.6)$$

Con la función de transferencia aproximada, se diseña la señal binaria pseudoaleatoria (PRBS) que tengan el tiempo y la duración adecuado para realizar una identificación del sistema completo, la cual cumple las siguiente características:

- Amplitud = 0.2
- Tiempo de muestreo = 4.84 [seg]
- Orden = 8
- Numero de periodos = 1

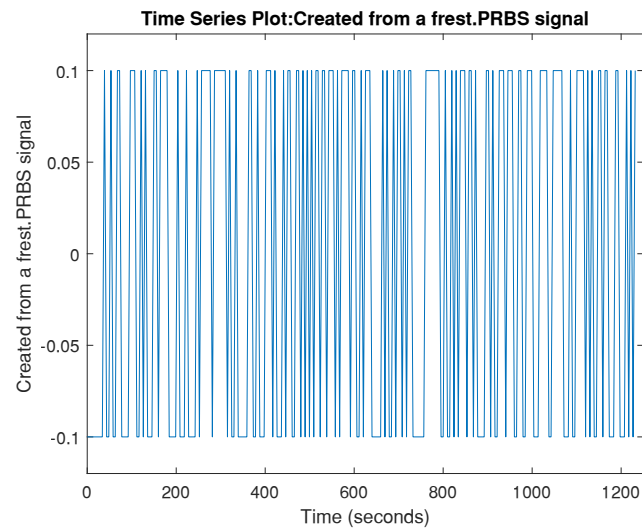


Figura 3.7: Señal de entrada PRBS

Con la señal de entrada obtenida se procede a diseñar el experimento para la identificación de la planta de frío, en la cual se usará el mismo esquema de conexión con la planta mostrado en la figura 3.5, pero añadiendo una señal escalón para alcanzar un punto de operación en estado estacionario, a partir de alcanzar el estado estacionario se aplica la señal PRBS alrededor de dicho punto, tal como se muestra en la figura a continuación:

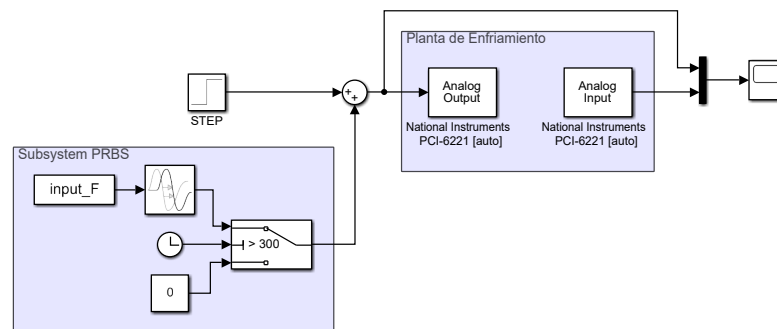


Figura 3.8: Esquema para la aplicación de la señal PRBS

3.2. Análisis de la respuesta de la planta ante la señal de entrada

Debido a que se diseñó dos experimentos separados, uno para el sistema de calentamiento y otro para el sistema de enfriamiento. El análisis se separa en dos partes:

- Análisis de la respuesta de la planta en calentamiento
- Análisis de la respuesta de la planta en enfriamiento

3.2.1. Análisis de la respuesta de la planta en calentamiento

Con el experimento aplicado se obtuvo la siguiente respuesta de la planta de calentamiento:

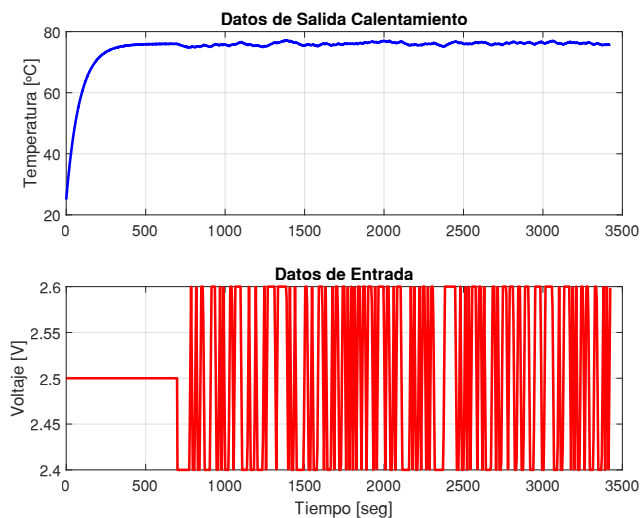


Figura 3.9: Datos de la planta de calentamiento

Con los datos obtenidos se realiza la identificación del sistema por medio del toolbox SystemIdentification de Matlab, para el tratamiento de los datos y su posterior análisis se realizaron los siguientes pasos:

- Eliminación de medias
- Selección de datos para estimación y validación
- Selección de las estructuras de estimación de modelos
- Selección del modelo

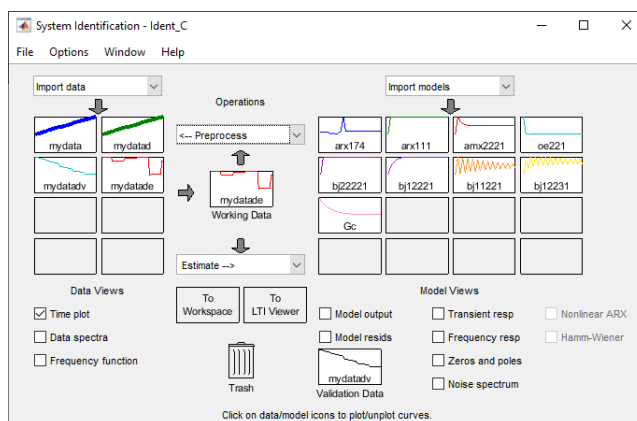


Figura 3.10: Datos cargados en el toolbox SystemIdentification

Eliminación de medias

Se busca eliminar los valores medios para quitar el punto de operación en el cual se realizó la toma de datos, y quedarse solo con las variaciones provocados por la señal PRBS y el arranque de la planta.

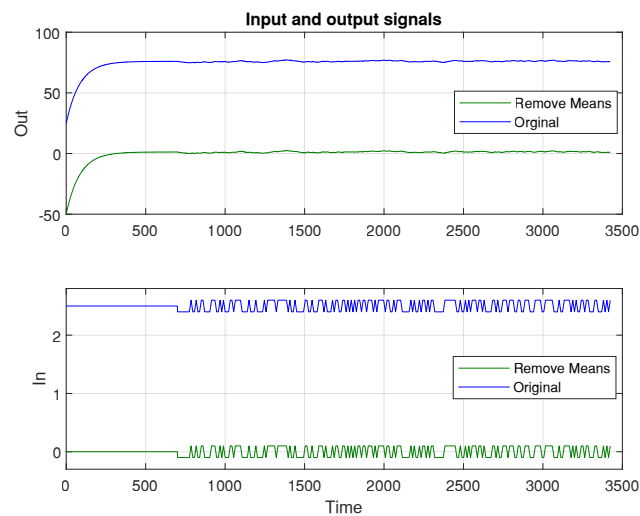


Figura 3.11: Eliminación de medias

Selección de datos para estimación y validación

Posterior a eliminar las medias se procede a seleccionar los rangos de datos que se usaran para la estimación y la validación durante la identificación del modelo, en esta selección se debe tener en cuenta solo los cambios provocados por la señal PRBS sin tener en cuenta los datos generados durante el arranque del sistema.

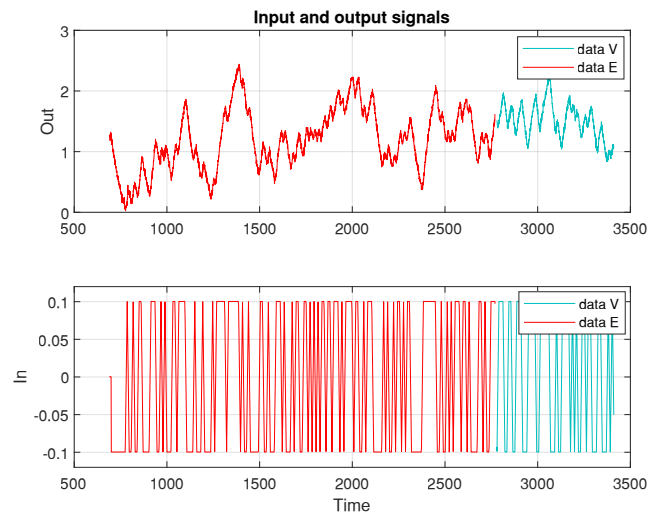


Figura 3.12: Datos de Estimación y Validación

Selección de las estructuras de estimación de modelos

Una vez terminado el preprocesamiento de datos se procede a realizar la estimación de modelos por medio de las siguientes estructuras:

- ARX
- ARMAX
- Output Error (OE)
- Box-Jenkins (JE)

Cada una de estas estructuras corresponde a una metodología de estimación paramétrica, que buscan obtener un modelo que represente el comportamiento de los datos obtenidos de la planta.

Selección del modelo

Para la selección del modelo que mejor represente al sistema se analiza el porcentaje de similitud, la autocorrelación y correlación

cruzada, con respecto a los datos de validación, tal como se observa en la figura 3.13, el modelo con el porcentaje más alto es el Box-Jenkins (12221).

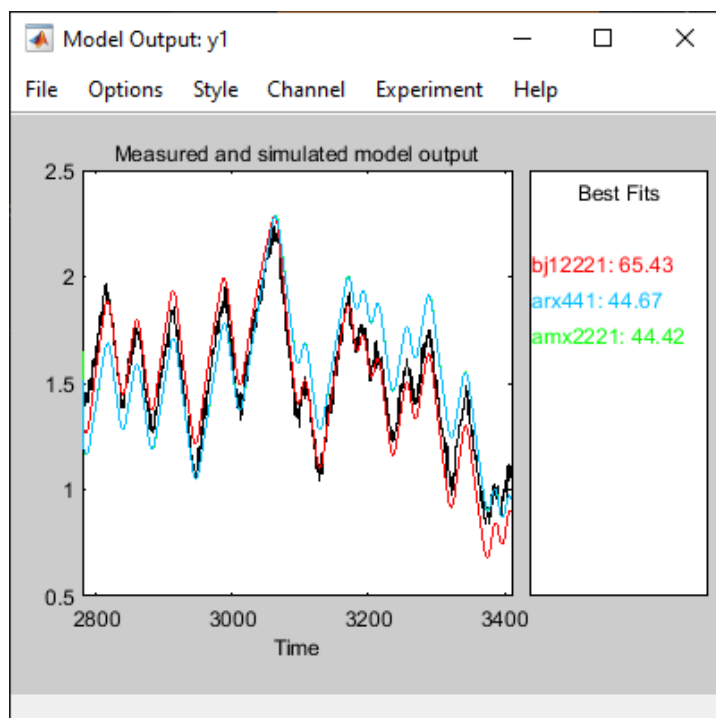


Figura 3.13: Mejores modelos obtenidos

Analizando la autocorrelación y la correlación cruzada se debe tener en cuenta los criterios de parsimonia, lo cual implica que debe establecerse según criterio del observador tomando en cuenta los intervalos de confianza, tal como se puede apreciar en la figura 3.14 solo el modelo BJ12221 cumple al mantener las correlaciones dentro del intervalo de confianza.

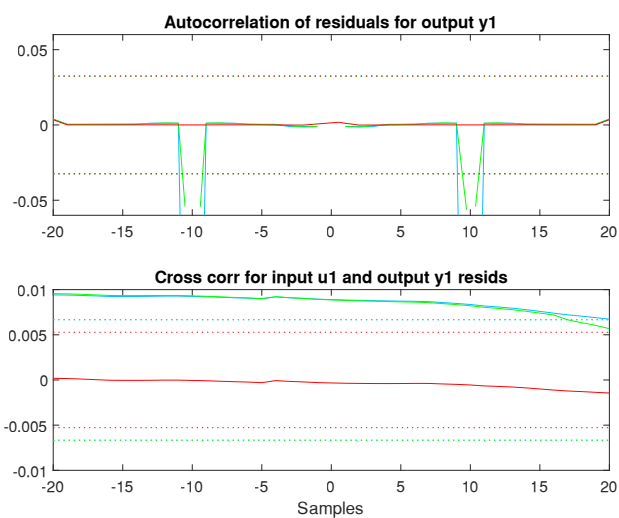


Figura 3.14: Autocorrelación y correlación cruzada

3.2.2. Análisis de la respuesta de la planta en enfriamiento

Con el experimento aplicado se obtuvo la siguiente respuesta de la planta de enfriamiento:

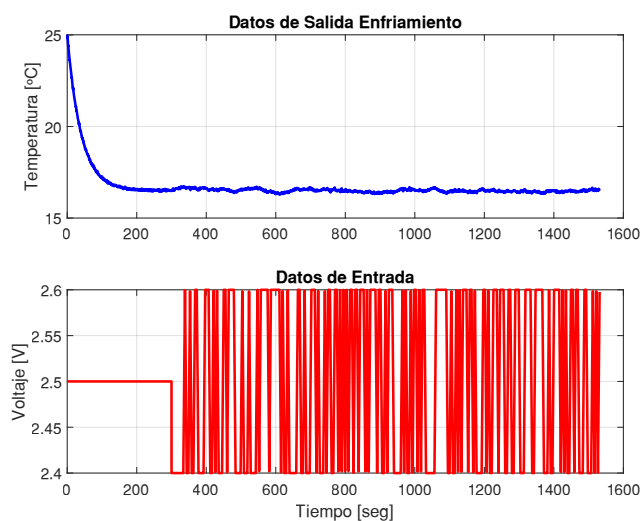


Figura 3.15: Datos de la planta de enfriamiento

Al igual que los datos de calentamiento con los datos de enfriamiento se procede a realizar el mismo análisis por medio del toolbox SystemIdentification de Matlab, para el tratamiento de los datos y su posterior análisis se realizaron los siguientes pasos:

Selección de datos para estimación y validación

Una vez realizado el proceso de eliminación de medias se procede a seleccionar los rangos de datos que se usaran para la estimación y la validación durante la identificación del modelo, en esta selección se debe tener en cuenta solo los cambios provocados por la señal PRBS sin tener en cuenta los datos generados durante el arranque del sistema.

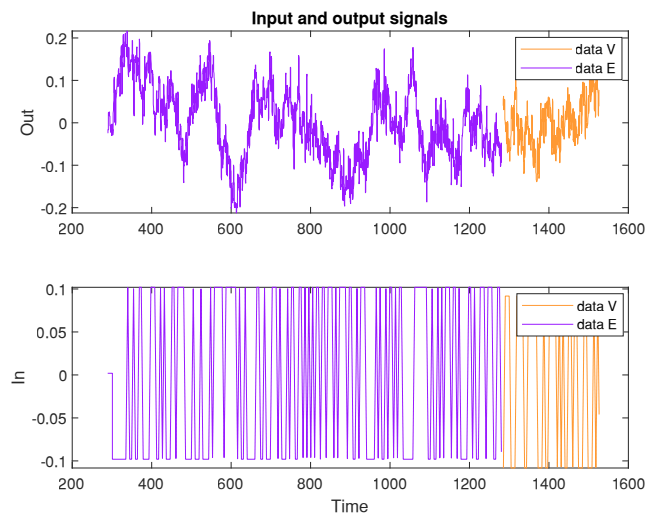


Figura 3.16: Datos de Estimación y Validación

Con los rangos seleccionados se realiza la estimación de modelos basado en las estructuras de polinomios, tal como en el caso anterior.

Selección del modelo

Para la selección del modelo que mejor represente al sistema se analiza el porcentaje de similitud, la autocorrelación y correlación cruzada, con respecto a los datos de validación, tal como se observa en la figura 3.17, el modelo con el porcentaje más alto es el Box-Jenkins (11111).

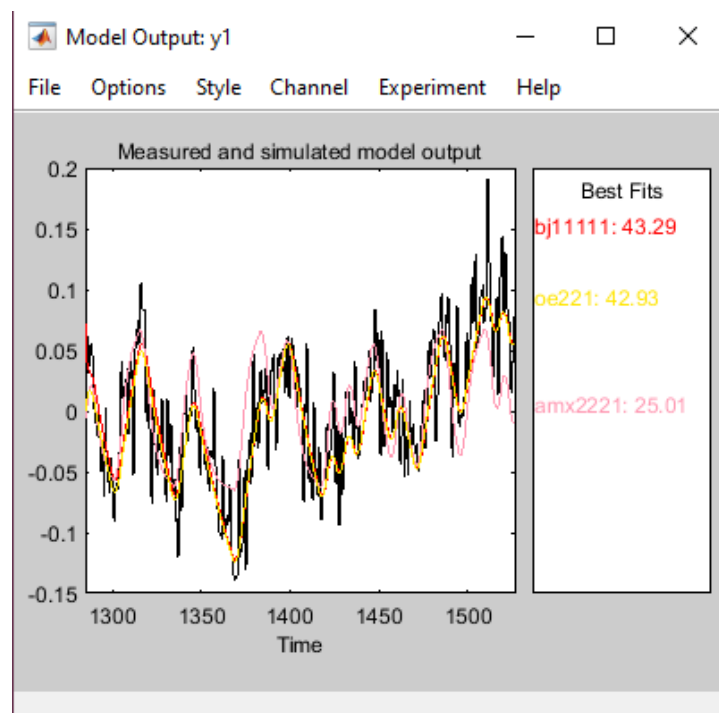


Figura 3.17: Mejores modelos obtenidos

Analizando la autocorrelación y la correlación cruzada se debe tener en cuenta los criterios de parsimonia, lo cual implica que debe establecerse según criterio del observador tomando en cuenta los intervalos de confianza, tal como se puede apreciar en la figura 3.14 solo el modelo BJ11111 cumple al mantener las correlaciones dentro del intervalo de confianza.

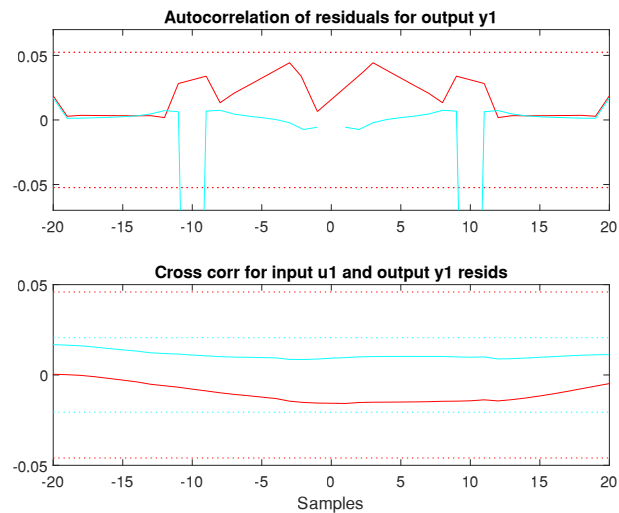


Figura 3.18: Autocorrelación y correlación cruzada

3.3. Obtención de la función de transferencia y de la representación en variables de estados

A partir de los modelos seleccionados anteriormente se obtuvo la función de transferencia y la representación de variables de estado.

3.3.1. Planta de calentamiento

Función de transferencia

La función de transferencia obtenida en tiempo continuo es la mostrada a continuación:

$$G_C = \frac{0,2435s + 0,1809}{s^2 + 0,7731s + 0,008853}$$

Variables de estado

La representación de variables de estado obedece a la siguiente estructura: Donde la matrices de estado son las siguientes:

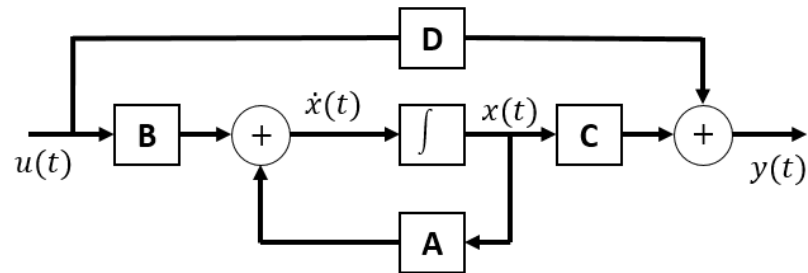


Figura 3.19: Representación en variables de estado

$$A = \begin{pmatrix} -0,773 & -0,07082 \\ 0,125 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 0,2435 & 1,447 \end{pmatrix}$$

$$D = 0$$

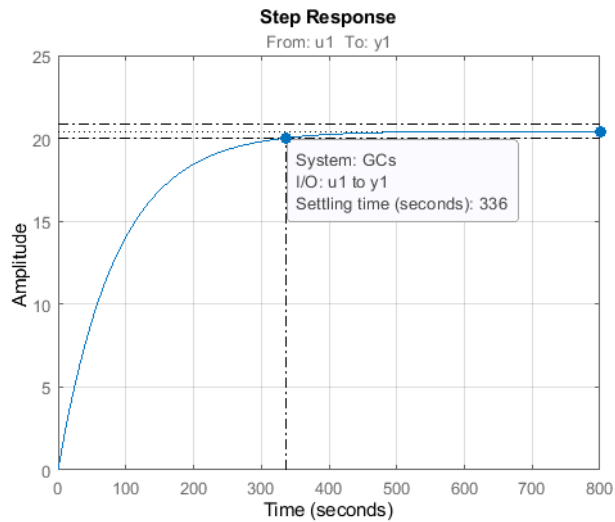


Figura 3.20: Respuesta a la entrada escalón de G_C

3.3.2. Planta de enfriamiento

Función de transferencia

La función de transferencia obtenida en tiempo continuo es la mostrada a continuación:

$$G_F = \frac{-0,2503s^2 - 26,74s - 86,57}{s^3 + 13,49s^2 + 1033 + 26,5}$$

Variables de estado

Las matrices de estado son las siguientes:

$$A = \begin{pmatrix} -13,49 & -32,27 & -0,8282 \\ 32 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} -0,1251 & -0,4178 & -1,353 \end{pmatrix}$$

$$D = 0$$

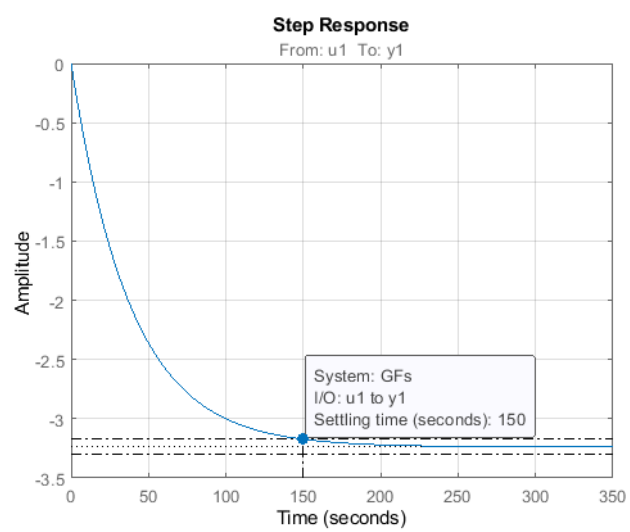


Figura 3.21: Respuesta a la entrada escalón de G_F

Capítulo 4

4. Diseño de los controladores

4.1. Diseño del controlador PID

Esta sección es necesario dividirlo en dos debido a que existen dos plantas a ser controladas una de calor y otra de frío tal como se mostró en el capítulo anterior.

Para todos los casos se considera que los controladores deben cumplir las siguientes características:

- Tiempo de estabilización menor a 20 segundos
- Error de estado estacionario igual a 0
- Sobrenivel porcentual menor al 5 %

4.1.1. Controlador PID para la planta de calentamiento

El diseño de los controladores PID se basó en el método de Ziegler-Nichols apoyado en el toolbox PID Tuner de Matlab.

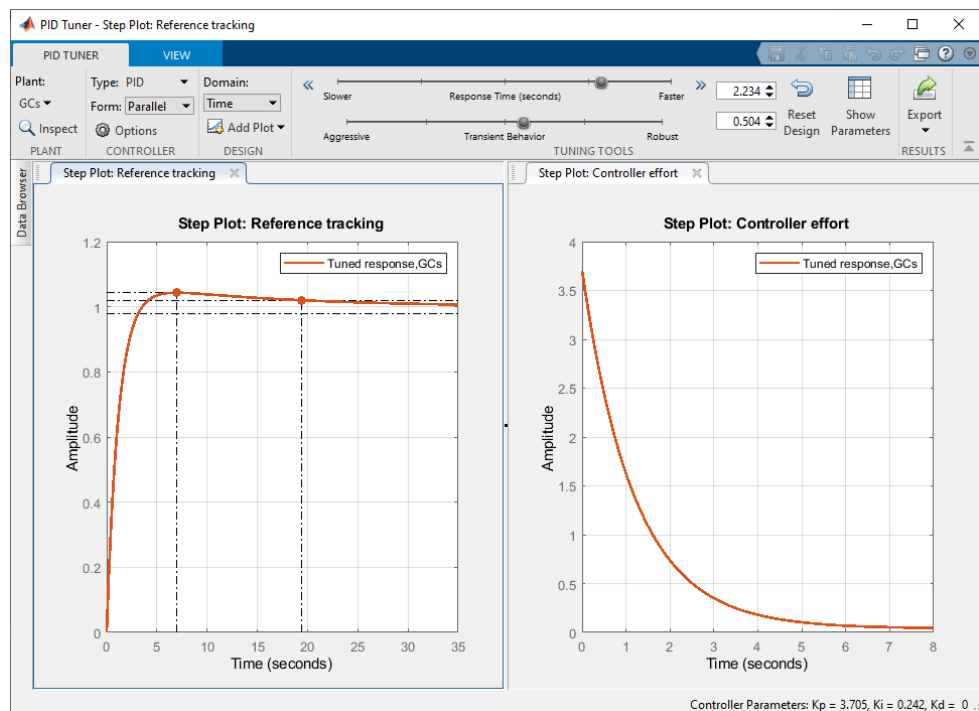


Figura 4.1: Diseño controlador PID de la planta de calentamiento

Una vez diseñado según los requerimientos se exporta y se obtiene el controlador PI mostrado a continuación:

$$C_{sC} = 3,39 \cdot e(t) + 0,159 \int e(t)dt$$

4.1.2. Controlador PID para la planta de enfriamiento

El diseño del controlador se basó en el método de Ziegler-Nichols apoyado en el toolbox PID Tuner de Matlab.

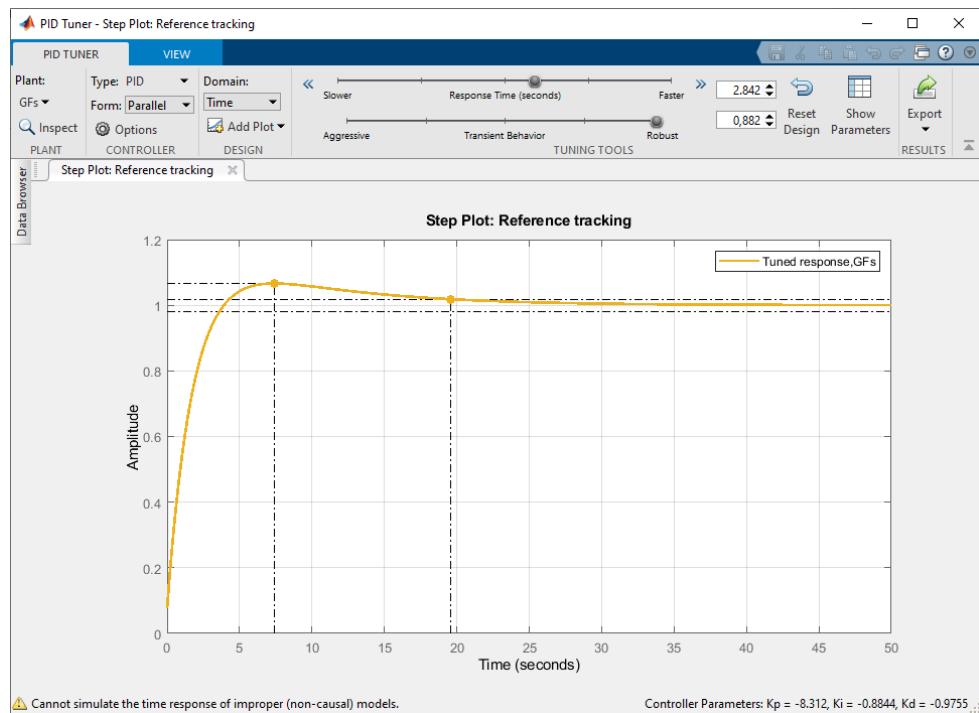


Figura 4.2: Diseño controlador PID de la planta de calentamiento

Una vez diseñado según los requerimientos se exporta y se obtiene el controlador PI mostrado a continuación:

$$C_{pid} = -9,13 \cdot e(t) - 0,835 \int e(t)dt - \frac{de(t)}{dt}$$

4.2. Diseño del controlador mediante variables de estado

Al igual que en el diseño anterior, los controles mediante variables de estado, deben diseñarse uno para calentamiento y otro para enfriamiento.

Para todos los casos se considera que los controladores deben cumplir las siguientes características:

- Tiempo de estabilización menor a 20 segundos
- Error de estado estacionario igual a 0
- Sobrenivel porcentual menor al 5 %

4.2.1. Controlador por reubicación de polos para la planta de calentamiento

Para el diseño del controlador mediante variables de estado, se usó la técnica de reubicación de polos, implementando las ecuaciones por medio de Matlab.

$$D(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{5,416z - 5,403}{z^2 - 1,77z + 0,6534}$$

$$K_o = -0,0604$$

4.2.2. Controlador por reubicación de polos para la planta de enfriamiento

Para el diseño del controlador mediante variables de estado, se usó la técnica de reubicación de polos, implementando las ecuaciones por medio de Matlab.

$$D(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{-48,86z - 48,73}{z^2 - 3,186z + 1,778}$$

$$K_o = 0,0053$$

4.3. Simulación de los controladores en las plantas identificadas

4.3.1. Simulación en la planta de Calentamiento

Para comprobar los controladores diseñados para la planta de calentamiento se implemento el siguiente diagrama en Simulink.

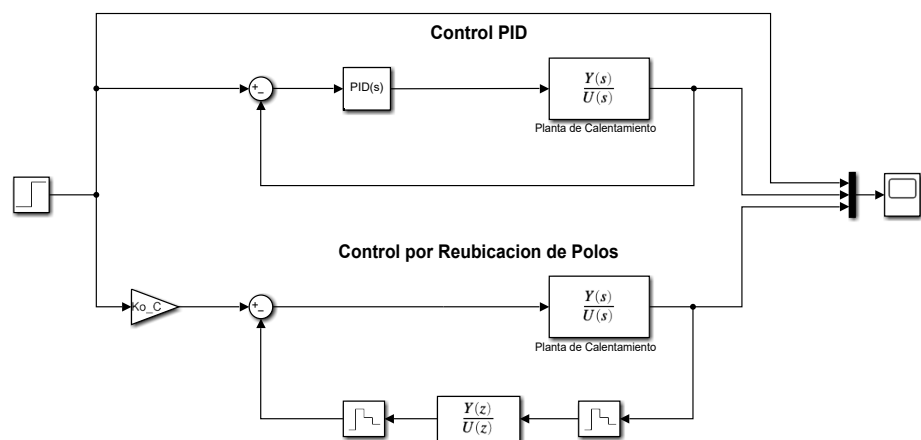


Figura 4.3: Diagrama de Simulink con la planta de calor

Para la simulación se envía una entrada escalón equivalente a 1°C de forma ascendente con el fin de comprobar que la temperatura de la planta puede seguir la referencia dada, esto se muestra en la figura 4.4.

De igual manera se puede comprobar que el tiempo de estabilización se cumple para ambos controladores, mientras que el sobrenivel porcentual solo se observa para el controlador PID, el mismo que se mantiene por debajo del 5%.

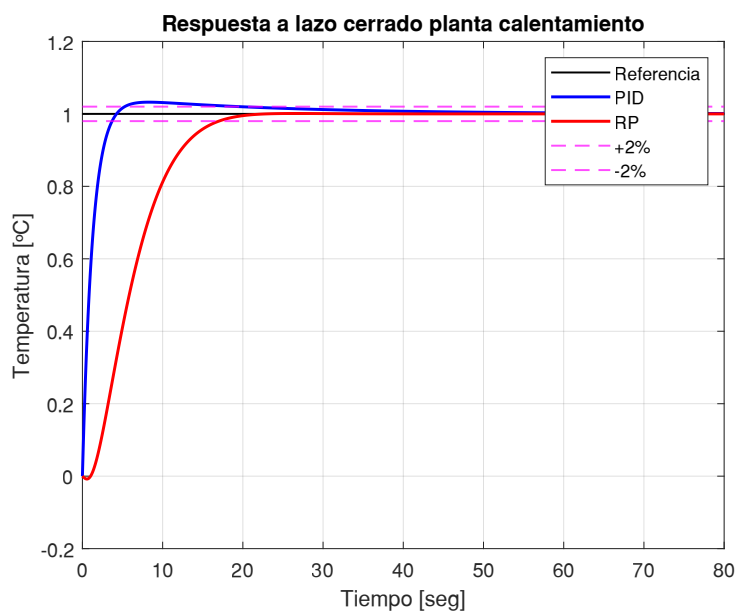


Figura 4.4: Respuesta de la planta de calentamiento a lazo cerrado

Por otro lado se puede observar en la figura 4.5, la señal de acción de cada controlador, denotando que el esfuerzo del controlador PID es mayor al realizado por el controlador por reubicación de polos.

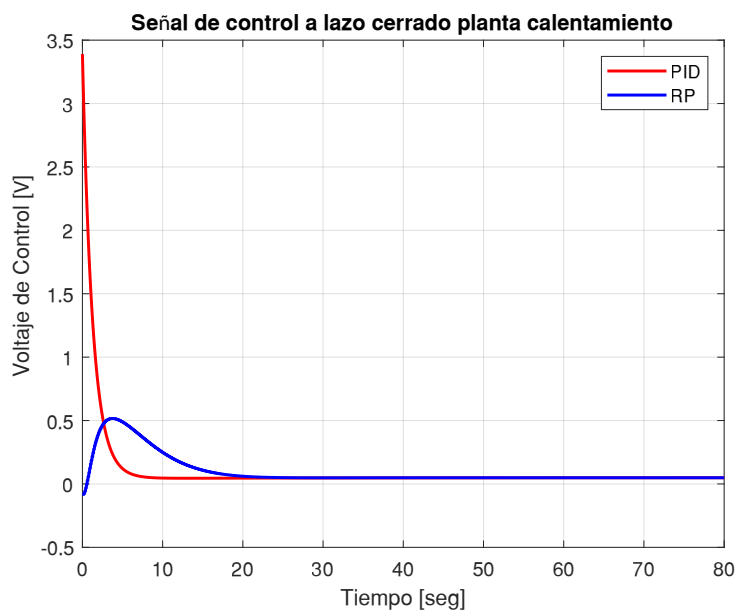


Figura 4.5: Señal de acción de ambos controladores

4.3.2. Simulación en la planta de Enfriamiento

Para comprobar los controladores diseñados para la planta de calentamiento se implemento el siguiente diagrama en Simulink.

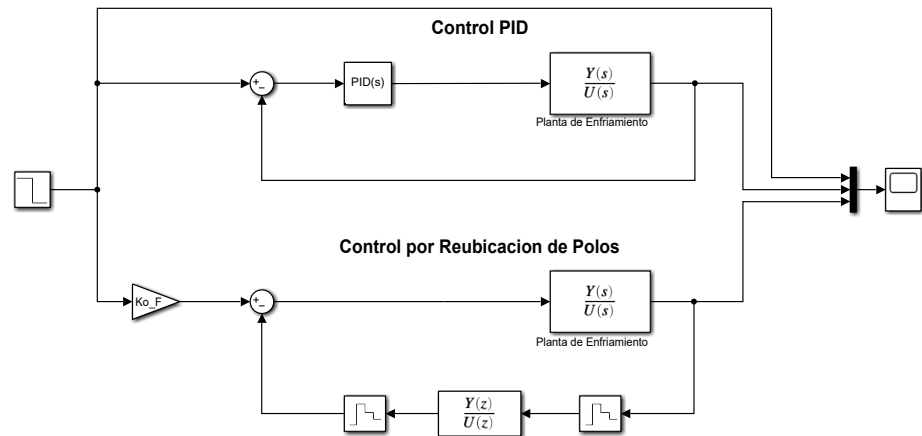


Figura 4.6: Diagrama de Simulink con la planta de frío

Para la simulación se envía una entrada escalón equivalente a $1^{\circ}C$ de forma descendente con el fin de comprobar que la temperatura de la planta puede seguir la referencia dada, esto se muestra en la figura 4.7.

De igual manera se puede comprobar que el tiempo de estabilización se cumple para ambos controladores, mientras que el sobrenivel porcentual solo se observa para el controlador PID, el mismo que se mantiene por debajo del 5%.

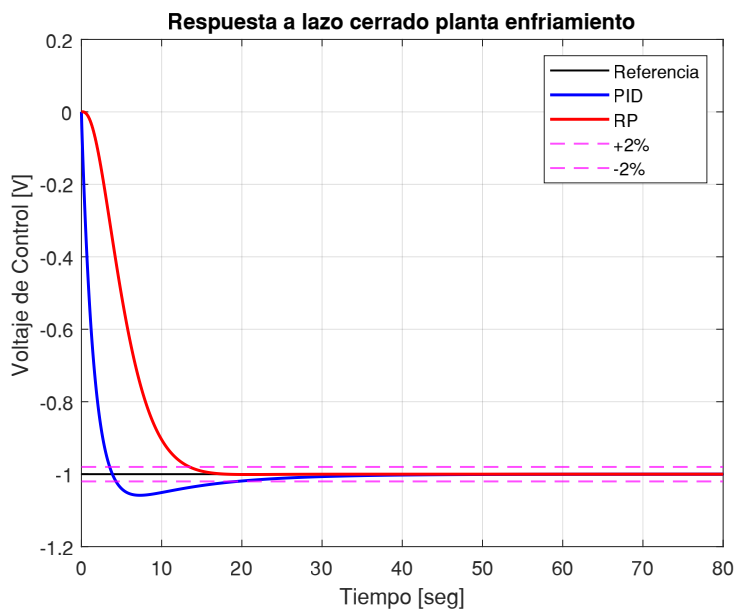


Figura 4.7: Respuesta de la planta de enfriamiento a lazo cerrado

Por otro lado se puede observar en la figura 4.8, la señal de acción de cada controlador, denotando que el esfuerzo del controlador PID es mayor al realizado por el controlador por reubicación de polos.

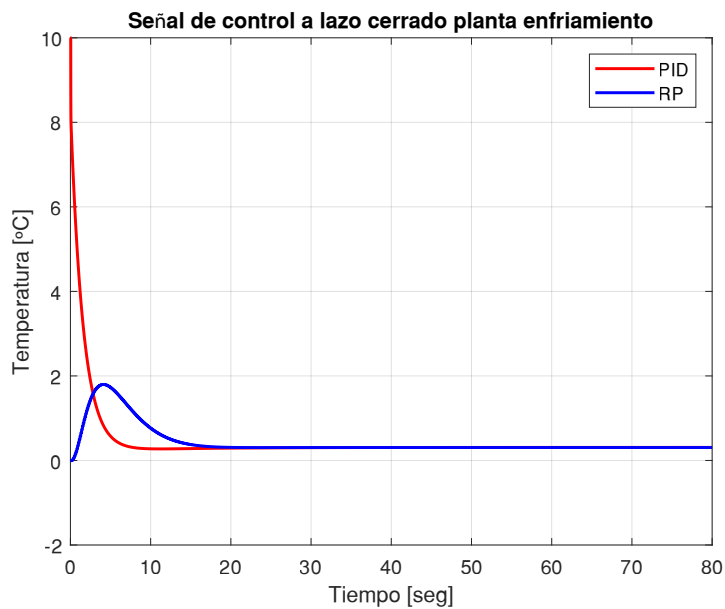


Figura 4.8: Señal de acción de ambos controladores

Capítulo 5

5. Análisis de resultados obtenidos

Para el análisis del comportamiento del sistema completo se debe tener en cuenta que ambos sistemas tanto el de calentamiento como el de enfriamiento deben trabajar de forma conjunta en el mismo espacio físico, solo teniendo como diferencia el actuador respectivo.

Para comprobar el sistema se usara una señal de entrada particularmente diseñada para el experimento de la cámara de control de temperatura, la cual se muestra a continuación:

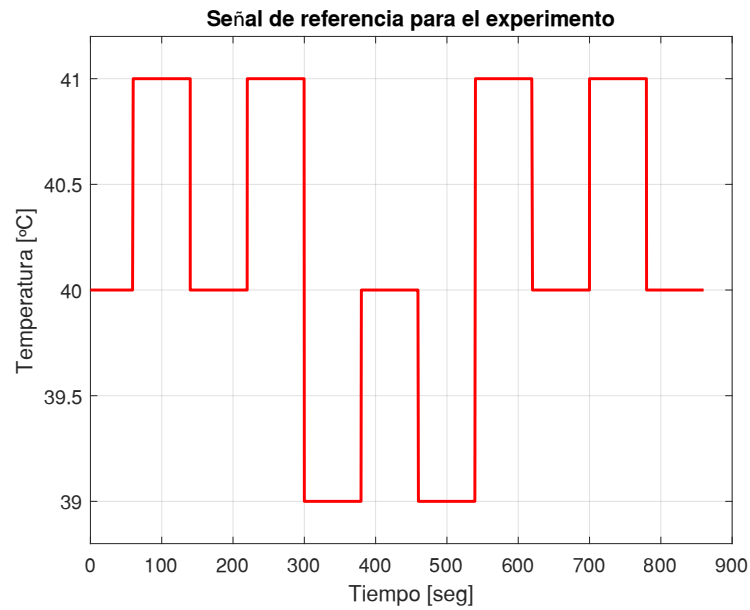


Figura 5.1: Señal de referencia para el experimento

5.1. Respuesta de la planta ante la acción del controlador PID

Teniendo en cuenta la señal de referencia, el sistema debe conmutar entre la planta de calentamiento y la de enfriamiento con sus respectivos controladores, dicha conmutación es en función del error, esto quiere decir que si el error es positivo activa la planta de calor y si el error es negativo activa la planta de frío, tal como se muestra en el diagrama a continuación:

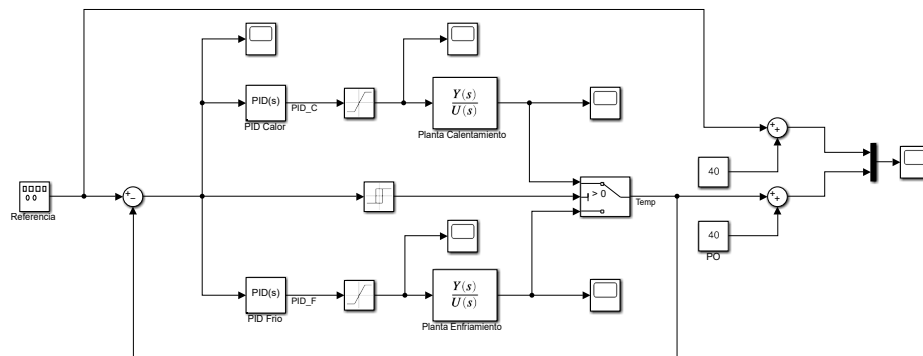


Figura 5.2: Diagrama de simulink experimento completo

Una vez realizado el experimento se puede observar que efectivamente la temperatura logra seguir a la señal de referencia, conmutando entre los controladores de calor y de frío, dando como resultado que los tiempo de calentamiento y enfriamiento sean prácticamente iguales, como se aprecia en la figura 5.3.

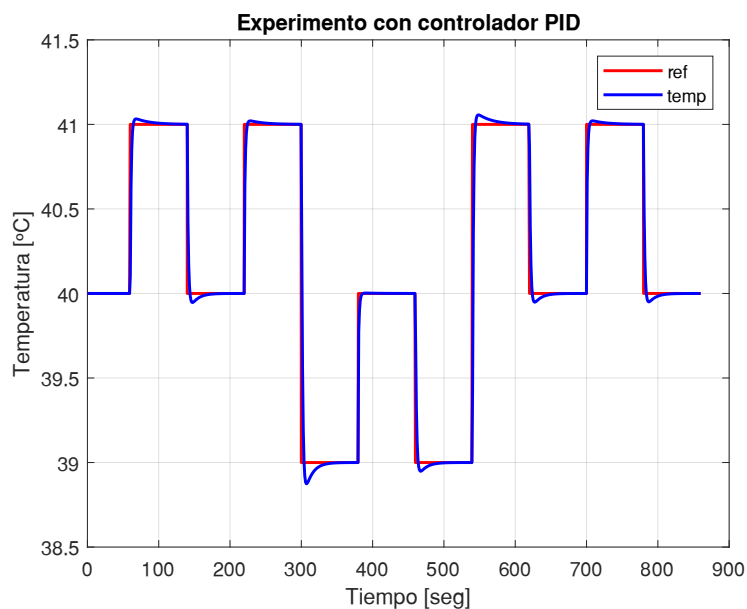


Figura 5.3: Respuesta de la planta ante la señal de referencia

Mientras que en las señales de control que entregan los PID se

puede apreciar que sufren saturación al llegar al límite que permite el driver de ambos sistemas, como se puede observar en la figura 5.4.

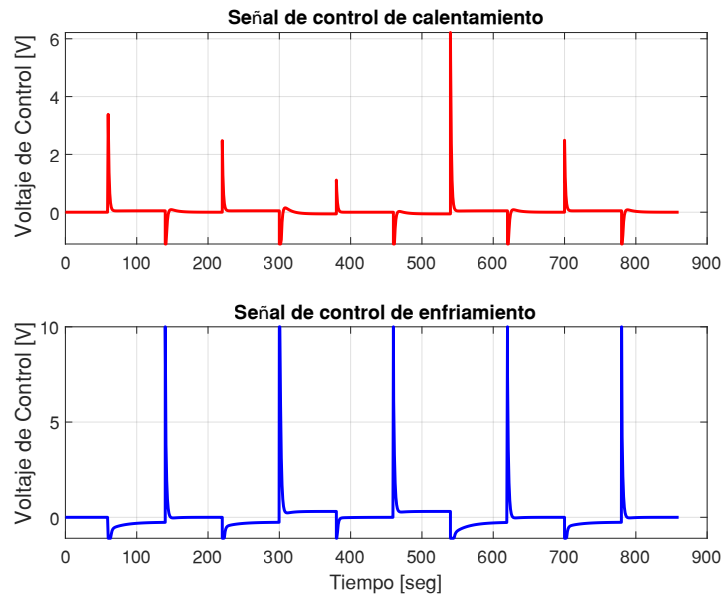


Figura 5.4: Señales de control del PID de calentamiento y de enfriamiento

5.2. Respuesta de la planta ante la acción del controlador por reubicación de polos

Al igual que en la prueba de los controladores PID, en esta prueba el sistema debe conmutar entre la planta de calentamiento y la de enfriamiento con sus respectivos controladores en función del error, tal como se muestra en el diagrama a continuación:

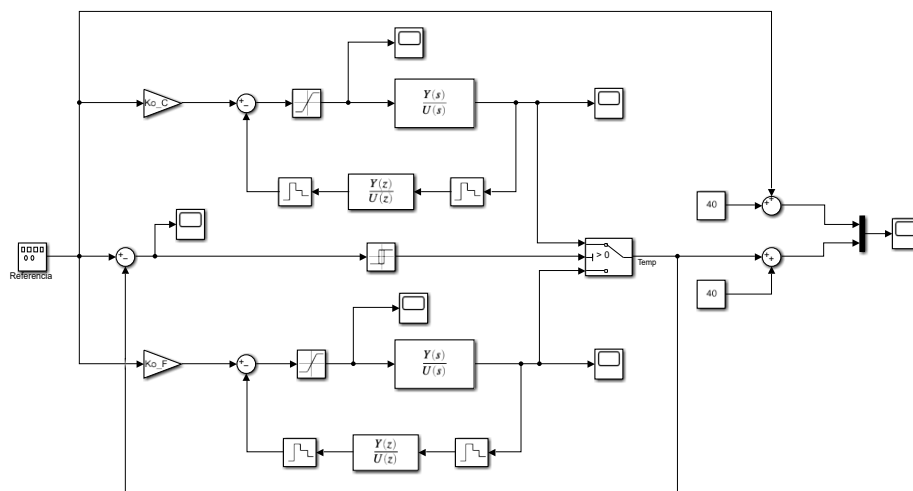


Figura 5.5: Diagrama de simulink experimento completo

Una vez realizado el experimento se puede observar que efectivamente la temperatura logra seguir a la señal de referencia, conmutando entre los controladores de calor y de frío, dando como resultado que los tiempo de calentamiento y enfriamiento sean prácticamente iguales, como se aprecia en la figura 5.6.

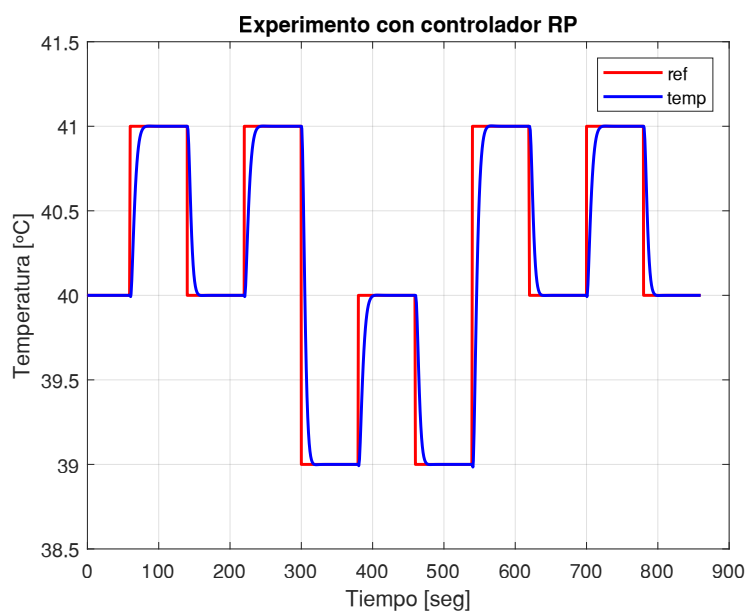


Figura 5.6: Respuesta de la planta ante la señal de referencia

Mientras que en las señales que entregan los controladores se puede apreciar que no sufren saturación, como se puede observar en la figura 5.4.

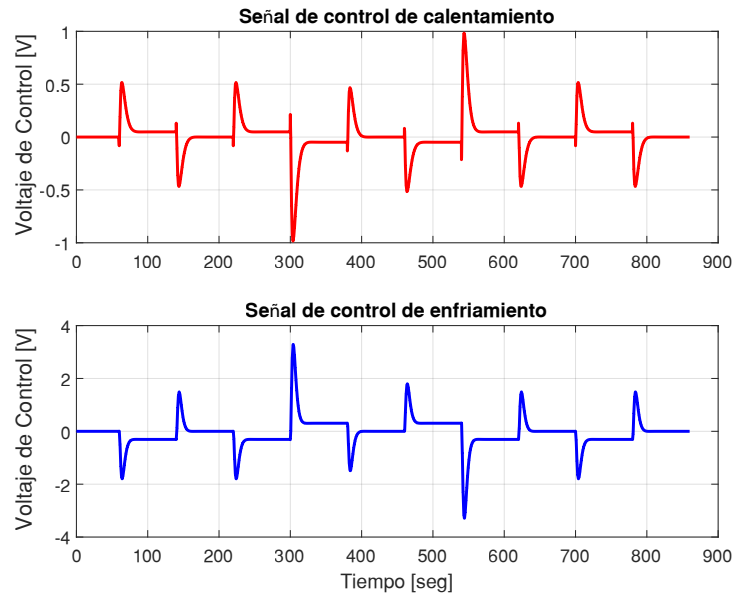


Figura 5.7: Señales de control de los controladores por reubicación de polos en calentamiento y en enfriamiento

5.3. Análisis comparativo del desempeño de los controladores

Como se puede observar en la figura 5.8, ambos controladores cumplen con los requerimientos de diseño, pero se puede apreciar que el efecto del controlador por reubicación de polos, es más suave en las transiciones en comparación con la respuesta del PID.

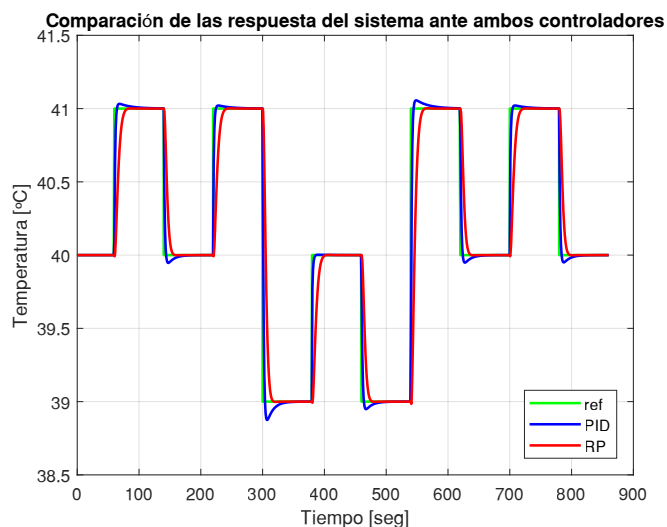


Figura 5.8: Comparación entre la respuesta de los dos controladores

Mientras que al comparar las señales de control en la figura 5.9 se puede apreciar que las señales generadas por los controladores PID generan mayor esfuerzo sobre la planta a diferencia de los controladores por reubicación de polos que el esfuerzo de control es menor y nunca llega a niveles fuera del rango permitido por los actuadores de calentamiento y enfriamiento.

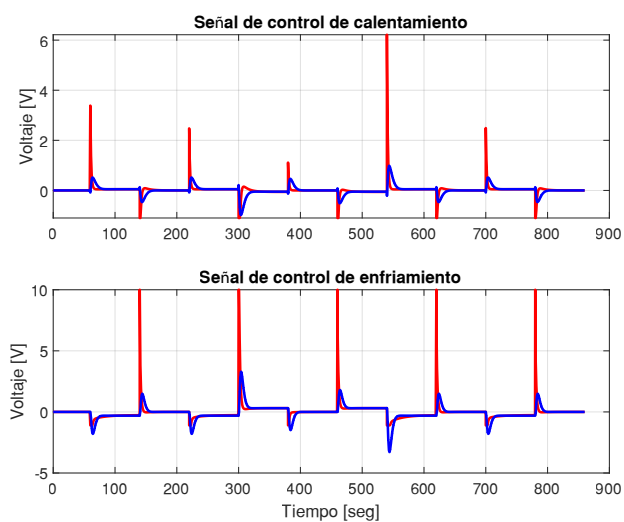


Figura 5.9: Comparación entre las acciones de control

Finalmente analizando la señal de error de ambos experimentos usando los controladores PID y por reubicación de polos, se puede denotar que la señal de error en el caso de los controladores PID, se nota un esfuerzo mayor para llegar a un valor nulo luego de un cambio, esto se puede denotar en la figura 5.10.

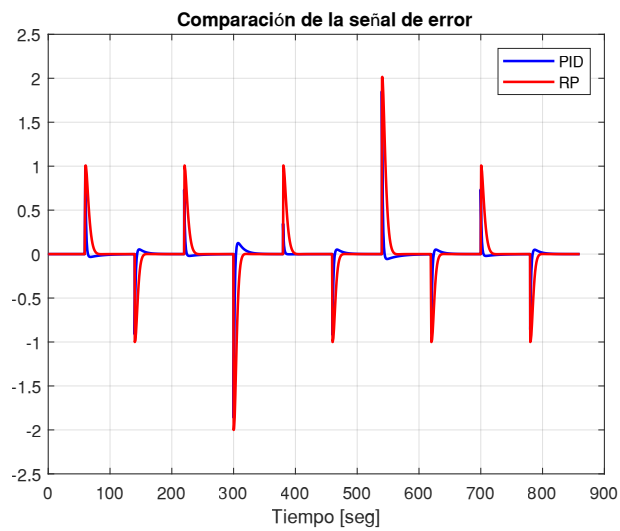


Figura 5.10: Comparación entre las señales de error

Conclusiones

CONCLUSIONES

- 1) En el actual trabajo se pudo identificar las características de las plantas de calentamiento y enfriamiento, con ello se pudo diseñar el experimento completo de identificación que permitió obtener las funciones de transferencia y las representaciones en espacio de estados de ambos sistemas.
- 2) Se logro diseñar un controlador PID para cada sistema de forma individual, teniendo en cuenta que el objetivo final era que los tiempos de reacción de la calefacción y del enfriamiento sean lo más similares entre si; con lo cual al realizar la prueba del control de ambos sistema funcionando en conjunto se obtuvo el resultado esperado, ya que la temperatura de la planta logro seguir la temperatura de referencia tanto en cambios ascendentes como descendentes.
- 3) De igual manera se logro diseñar dos controladores por reubicación de polos usan técnicas de control moderno basado en variables de estado, estos controladores también lograron el objetivo esperado de aproximar la respuesta temporal de los sistemas de calefacción y enfriamiento; y al trabajar de manera

conjunta ambos sistemas, se pudo observar que la respuesta de la temperatura tiene un mejor comportamiento en comparación de los otros controladores analizados.

- 4) Finalmente se puede concluir que el control en conjunto de los sistemas de calefacción y enfriamiento es posible, y los controladores logran mantener las respuestas temporales muy similares entre si, destacando que el controlador por reubicación de polos tiene el mejor comportamiento respecto al esfuerzo que provoca sobre la planta, ya que sus señales de control son mas amigables con los drivers de las sistemas empleados, al no tener cambios bruscos ni llegar a niveles fuera de su rango de operación.

RECOMENDACIONES

- 1) El análisis de los sistemas de control de temperatura en la cámara de pruebas experimentales es complejo ya que en la misma área funcionan dos actuadores diferentes, por lo cual se recomienda realizar el análisis individual de cada uno para luego buscar la forma en que trabajen en conjunto.
- 2) Al tener dinámicas diferentes los sistemas de calefacción y enfriamiento, es necesario tener en cuenta los rangos máximos de las señales de control que se pueden aplicar ya que eso influye en los parámetros de diseño de los controladores, a la hora de analizar los esfuerzo de control aplicados a la planta.
- 3) Es recomendable que al diseñar el experimento de identificación con la señal pseudoaleatoria se tenga en cuenta el punto de operación en el cual se realizará la prueba ya que esto influirá sobre la acción de control, por lo cual es preferible hacer la identificación al rededor del punto donde se hará trabajar la planta posteriormente.

Bibliografía

- [1] E. HERRERA, E. VELA, V. ARCE, N. SANCHEZ, K. MOLINA, AND D. PLAZA, *“Modelización y Caracterización del Efecto Temperatura en el Cuerpo Humano,”*(2017). Global Partnerships for Development and Engineering Education: Proceedings of the 15th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology
- [2] E. HERRERA, E. VELA, V. ARCE, N. SANCHEZ, K. MOLINA, AND D. PLAZA, *“Myoelectric response of the upper limbs to temperature variation”*, (2018). Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists
- [3] *“Identificación de Sistemas Dinámicos”*, (2013). Universidad Nacional de la Plata, Cátedra de control.
- [4] VALLEJO, R., *“Identificación paramétrica de sistemas dinámicos”*, (2011). Revista Científica Ingeniería y Desarrollo, no 2, p. 10-22.
- [5] BETANCOR, C., CEREZO, J.M., VEGA, A., *“Diseño de un sistema de control de temperatura”*, (1970).
- [6] RESTREPO PÉREZ, L., DURANGO LONDOÑO, N., GÓMEZ SUÁREZ, N., GONZÁLEZ RAMÍREZ, F. AND RIVERA BONILLA, N., *“Prototipo de incubadora neonatal”*, (2007).

- [7] OGATA, K., *“Ingeniería de control moderna”*, (2003). Madrid, España, Pearson Educación,