



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación



“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE DOS CONTROLADORES, UN PID CLÁSICO Y
OTRO POR REUBICACIÓN DE POLOS PARA UNA INCUBADORA
NEONATAL DE CALOR RADIANTE”

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

MAGÍSTER EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL

Presentado por:

Diego David Bosquez Granja

Guayaquil – Ecuador

2022

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi Familia, Amigos y en especial a Mi esposa la mujer que Amo, que me llena de felicidad y me dio nuestros hijos hermosos que nos motivan a darles un mejor futuro lleno de amor.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi esposa y a mis hijos que me han apoyado y motivado siempre para superar retos y seguir adelante. Pero en especial a mi compañera de vida que fomenta en mi ser mejor cada día.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

PhD. Carmen Vaca

DECANO (S) FIEC

Mg. Ronald Solis

DIRECTOR

Mg. Adriana Aguirre

VOCAL PRINCIPAL

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación me corresponde exclusivamente; y doy mi 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.

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Diego David Bosquez Granja', written over a horizontal line.

Diego David Bosquez Granja

RESUMEN

El presente trabajo consiste en el diseño y simulación de dos controladores, un controlador proporcional-integral-derivativo (PID) clásico y otro por reubicación de polos mediante variables de estado.

En el primer capítulo se plantea la problemática de control de temperatura en las incubadoras de calor radiante, se propone la solución a dicha problemática y los objetivos del presente documento.

En el segundo capítulo se expone el marco teórico referente a las incubadoras y a los tipos de actuadores. Además se detallan los conceptos de diseño de los controladores propuestos.

El tercer capítulo describe el proceso de identificación de la planta a partir de los datos obtenidos de una incubadora real, detallando el diseño del experimento, la obtención de los parámetros de la planta y su función de transferencia.

En el capítulo cuatro se detalla el proceso de diseño de los controladores a partir de la función de transferencia obtenida en el capítulo anterior. Así mismo se muestran los índices de desempeño obtenidos con controladores diseñados y sus respectivas simulaciones a lazo cerrado.

El quinto capítulo corresponde a los resultados obtenidos al analizar el comportamiento de los controladores diseñados, así como sus respuestas en la planta ante perturbaciones externas, con el fin de seleccionar el que tenga la mejor respuesta.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimiento	II
Dedicatoria	III
Tribunal de Graduación	IV
Declaración Expresa	V
Resumen	VI
Índice General	VIII
Tribunal de Graduación	XI
Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XIV
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 Identificación del problema	1
1.2 Justificación	2
1.3 Solución propuesta	2
1.4 Objetivo general	3
1.4.1 Objetivos específicos	3
1.5 Metodología	4

1.6 Alcance	4
2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 Incubadoras de neonatos	5
2.1.1 Mecanismos de pérdida de calor	6
2.1.2 Rangos de temperatura	6
2.1.3 Hipotermia	7
2.1.4 Hipertermia	8
2.1.5 Equipamiento	9
2.2 Actuador de calor radiante	12
2.3 Controlador PID clásico	13
2.3.1 Acción proporcional	15
2.3.2 Acción integral	15
2.3.3 Acción derivativa	16
2.4 Controlador por reubicación de polos	17
3 IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA	21
3.1 Diseño del experimento	21
3.2 Análisis de la respuesta de la planta	22
3.3 Obtención de la función de transferencia	24
4 DISEÑO DE LOS CONTROLADORES	33
4.1 Diseño del controlador PID clásico	33
4.2 Diseño del controlador por reubicación de polos	35
4.3 Simulación de los controladores en la planta identificada	35
4.3.1 Controlador PID	35
4.3.2 Controlador por reubicación de polos	38

4.4 Simulación de los controladores con perturbaciones externas al lazo de control	40
4.4.1 Controlador PID	40
4.4.2 Controlador por reubicación de polos	42
5 RESULTADOS OBTENIDOS	45
5.1 Análisis comparativo de los controladores diseñados	45
5.2 Respuesta de la planta ante cambios de referencia	46
5.3 Respuesta de la planta ante perturbaciones externas	47
Conclusiones y Recomendaciones	50
Bibliografía	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Incubadora de calor radiante	12
Figura 2.2	Actuador de calor radiante	13
Figura 2.3	Diagrama de un sistema a lazo cerrado con PID	14
Figura 2.4	Representación de variables de estado con observador .	18
Figura 2.5	Lazo de Control por Observador de Estados	20
Figura 3.1	Diagrama de interconexión del experimento	22
Figura 3.2	Señal de entrada para la prueba 1	23
Figura 3.3	Señal de salida para la prueba 1	23
Figura 3.4	Señales de entrada y salida para la prueba 2	24
Figura 3.5	Importación de datos al toolbox de identificación	25
Figura 3.6	Señales de entrada y salida cargadas en el toolbox de identificación	25
Figura 3.7	Remoción de medias en las señales de entrada y salida	26
Figura 3.8	Selección de datos de estimación y validación	27
Figura 3.9	Datos de validación (azul), datos de estimación (celeste)	27
Figura 3.10	Selección de la estructura para la estimación	28
Figura 3.11	Modelos obtenidos	28
Figura 3.12	Comparación de los modelos obtenidos con los datos de validación	29
Figura 3.13	Autocorrelación y correlación cruzada	30

Figura 3.14	Autocorrelación y correlación cruzada del modelo que cumple los criterios de parsimonia	30
Figura 3.15	Respuesta a la entrada escalón de los diferentes modelos identificados	31
Figura 3.16	Respuesta a la entrada escalón de las funciones de transferencia a utilizar y de la planta	32
Figura 4.1	Diseño del controlador PID mediante el lugar geométrico de las raíces	34
Figura 4.2	Área de interés del lugar geométrico de las raíces . . .	34
Figura 4.3	Diagrama de bloques para simular el controlador PID . .	36
Figura 4.4	Señales de entrada y salida con el controlador PID . . .	36
Figura 4.5	Señal de acción generada por el controlador PID	37
Figura 4.6	Diagrama de bloques para simular el controlador por reubicación de polos	38
Figura 4.7	Señales de entrada y salida con el controlador por reubicación de polos	38
Figura 4.8	Señal de acción generada por el controlador por reubicación de polos	39
Figura 4.9	Diagrama de bloques para simular el controlador PID con perturbación externa	40
Figura 4.10	Señales de entrada y salida con el controlador PID ante perturbaciones externas	41
Figura 4.11	Señal de acción generada por el controlador PID sometido a perturbaciones externas	42
Figura 4.12	Diagrama de bloques para simular el controlador por reubicación de polos con perturbaciones externas . . .	42

Figura 4.13	Señales de entrada y salida con el controlador por reubicación de polos ante perturbaciones externas . . .	43
Figura 4.14	Señal de acción generada por el controlador por reubicación de polos sometido a perturbaciones externas	44
Figura 5.1	Comparativa de ambos controladores ante cambios en la referencia	46
Figura 5.2	Comparativa de las señales de control ante cambios en la referencia	47
Figura 5.3	Comparativa de ambos controladores ante perturbaciones externas	48
Figura 5.4	Comparativa de las señales de control ante perturbaciones externas	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Mecanismos de pérdida de calor	6
-----------	--	---

Capítulo 1

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Identificación del problema

Debido a la pandemia del COVID19, en el sector de mantenimiento y reparación de equipos médicos, se ha notado un incremento de equipos de cuidado neonatal que requieren ser revisados. En el caso particular de las incubadoras de calor radiante, estas ingresan con mayor frecuencia a mantenimiento debido a errores de calibración en la temperatura seleccionada por el personal de salud a cargo de su operación.

Analizando la incidencia de los casos y teniendo en cuenta que la mayoría de los equipos no presentaban fallas o daños aparentes, se determinó que los errores en la temperatura se daban por las condiciones de renovación de aire adicionadas recientemente

para evitar contagios por COVID19. Debido a que el controlador base de las incubadoras es del tipo ON/OFF, el mismo no puede reaccionar adecuadamente a estas nuevas perturbaciones externas, que ocasionan cambios de temperatura mayor a 3 grados centígrados en el ambiente.

1.2. Justificación

Para demostrar que los equipos de cuidado neonatal pueden tener un control de temperatura capaz de responder adecuadamente a las nuevas condiciones de trabajo en las unidades médicas, es necesario el diseño de controladores de tipo continuo, los cuales se sometan a pruebas con perturbaciones mayores a los 3 grados centígrados.

De igual manera la simulación del sistema a lazo cerrado es fundamental, debido a que es una manera no invasiva de demostrar el funcionamiento de los controladores, sin necesidad de modificar los equipos que están siendo usados la mayoría del tiempo.

1.3. Solución propuesta

El proyecto busca diseñar dos controladores y comparar el desempeño entre ellos, de tal manera que se pueda demostrar que el control de temperatura de las incubadoras neonatales puede responder satisfactoriamente a las perturbaciones externas.

Esto se demostrará por medio de simulación de un modelo obtenido de la identificación de la incubadora a partir de datos tomados en su entorno de trabajo.

1.4. Objetivo general

Diseñar dos controladores, uno por técnicas de control clásico y otro por medio técnicas de espacio de estado, para el control de una incubadora neonatal de calor radiante.

1.4.1. Objetivos específicos

- Identificar el comportamiento de la incubadora mediante la toma de datos durante el funcionamiento de esta.
- Obtener la función de transferencia que representa a la planta, mediante el análisis de los datos obtenidos durante el funcionamiento.
- Aplicar técnicas de control en tiempo continuo, mediante software de simulación, para el diseño de un controlador PID clásico.
- Aplicar técnicas de control en tiempo discreto, mediante software de simulación, para el diseño de un controlador por reubicación de polos.
- Analizar el desempeño de los controladores diseñados mediante la simulación del sistema en lazo cerrado.

1.5. Metodología

Se tomará datos de la incubadora en el área médica, desde el arranque hasta un punto de operación determinado, con el objetivo de determinar la dinámica de la planta. Posteriormente se obtendrá la función de transferencia que representa a la planta, mediante técnicas de identificación de sistemas a partir de los datos obtenidos previamente.

A partir de la función de transferencia obtenida se diseñará el controlador PID y el controlador por reubicación de polos, teniendo en cuenta la respuesta del sistema ante perturbaciones. Finalmente se evaluarán y compararán los controladores diseñados mediante simulación con su respectivo análisis de desempeño.

1.6. Alcance

El presente documento cubrirá los siguientes aspectos:

- Adquisición de datos de la incubadora real.
- Identificación de la función de transferencia de la planta.
- Diseño de un controlador PID.
- Diseño de un controlador por reubicación de polos.
- Simulación del sistema a lazo cerrado con cada uno de los controladores diseñados.
- Análisis comparativo del desempeño de los controladores.

Capítulo 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Incubadoras de neonatos

Los recién nacidos, especialmente los prematuros y enfermos, son muy sensibles a las variaciones térmicas, debido a que poseen una capacidad de termorregulación ineficiente y pierden calor de 5-6 veces más fácil que un adulto [1]. Al nacer, el neonato es expulsado de un ambiente superior a la temperatura ambiental; en el caso de los prematuros la temperatura corporal varía entre 0,5 ° a 1 °C superior a la temperatura de la madre lo que provoca un enfriamiento rápido respecto a la temperatura ambiente, cuya velocidad enfriamiento es proporcional al gradiente de temperatura entre el recién nacido y su entorno [2].

2.1.1. Mecanismos de pérdida de calor

Son cuatro mecanismos, en los cuales el calor es transferido desde y hacia la superficie corporal.

Modo	Mecanismo	Causa
Convección	Se produce cuando la temperatura del medio ambiente es menor a la temperatura del neonato	Circulación de aire frío hacia un área expuesta del recién nacido o la inmersión en agua con temperatura inadecuada
Evaporación	Pérdida de calor corporal asociado a exposición de la piel y/o tracto respiratorio a una concentración de humedad menor a la necesaria	Se produce debido a la falta de queratinización de la epidermis y la vasodilatación de los vasos subcutáneos
Radiación	Se debe a la transferencia de calor por medio de las ondas infrarrojas desde la piel caliente del niño al ambiente que está más frío	Recién nacido rodeado de objetos o superficies más frías
Conducción	Se debe a la transferencia de calor por contacto de superficies más frías con la piel del neonato	Contacto con objetos no precalentados (balanzas, colchones, placas radiológicas y estetoscopios)

Tabla 2.1: Mecanismos de pérdida de calor

2.1.2. Rangos de temperatura

Actualmente no existe una temperatura central única considerada apropiada para todos los neonatos, por lo cual se busca un ambiente termal óptimo, es decir un rango de condiciones térmicas donde el

recién nacido puede mantener una temperatura corporal normal con un mínimo gasto energético, como resultado se establecen rangos de temperatura según el peso y edad cronológica [3]. El rango de temperatura para neonatos publicado por la OMS (1997) detalla lo siguiente:

- Temperatura corporal central: Se considera la temperatura axilar y rectal entre 36,5 – 37,5 °C.
- Temperatura de la piel: Se considera la temperatura abdominal entre 36,0 - 36,5 °C.

Debido a la desproporción de la superficie corporal en relación con el peso, una postura corporal expuesta, escasa grasa subcutánea y piel delgada con mayor permeabilidad, los neonatos especialmente los prematuros son más susceptible a la disminución de la temperatura corporal [4]. Cuando existe una pérdida de calor que excede la capacidad del recién nacido de producir calor, se tiende a caer en el estado hipotérmico.

2.1.3. Hipotermia

Según la OMS (1997) clasificó la hipotermia en tres niveles:

- Leve: temperatura corporal entre 36 y 36,4 °C
- Moderada: temperatura corporal entre 32 y 35,9 °C
- Grave: temperatura corporal menor a 32°C

Existe amplia evidencia de los efectos negativos que produce la hipotermia en los recién nacidos, promoviendo un grado de

vulnerabilidad a infecciones que podrían aumentar el riesgo de mortalidad.

Síntomas

Los recién nacidos diagnosticados con hipotermia presentan un enfriamiento generalizado, es decir, su tez puede ser color rosado y parecer muy saludable pero su piel estar fría además produce una hipoactividad que implica una expresión decaída y rechazo a la comida [1].

Causas y efectos

La causa principal de la hipotermia es la falta de conocimiento y cuidado del personal médico durante las primeras horas de vida del recién nacido esta supera por mucho el hecho de no contar con el equipamiento adecuado en el momento del parto. La hipotermia ocasiona en los neonatos una disminución en su capacidad de succión del pecho materno, dando como origen la hipoalimentación que afecta la capacidad de producir calor y empeora la hipotermia [1].

2.1.4. Hipertermia

Es de conocimiento general que la hipotermia es mala para la salud del recién nacido, pero la hipertermia es aún peor especialmente en neonatos prematuros, por lo que es fundamental evitar esta condición que puede ser ocasionada por el cuidado del personal médico [2].

Síntomas

Al principio los signos de la hipertermia no se pueden apreciar a simple vista, pero a medida que la situación empeora el recién nacido empieza a experimentar taquicardia, alimentación deficiente, una piel caliente y enrojecida entre otros síntomas [1].

Efectos

Con regularidad la hipertermia aumenta la tasa metabólica y la pérdida de agua por evaporación, lo que podría terminar en una deshidratación peligrosa. En casos graves el recién nacido experimenta convulsiones que deben ser tratadas inmediatamente, caso contrario desemboca en estado de coma.

2.1.5. Equipamiento

El proceso de cuidado es importante a la hora de establecer estrategias para reducir la baja de calor relacionada a las intervenciones y mecanismos de pérdida en los recién nacidos, por esa razón es relevante la provisión de un entorno termoneutro en la atención inmediata y a largo plazo de los recién nacidos, a través de mecanismos adecuados, como son las incubadoras y termocunas, que permiten el fácil acceso al bebé, pero también minimizan las alteraciones en el entorno [5].

Incubadoras

Las incubadoras básicamente se encargan de proporcionar un ambiente cálido con aire caliente que circula por un ventilador; tiene

dos modos de operación:

- Modo servo control aire: el calentador controla termostáticamente la temperatura del aire en la incubadora, para alcanzar y mantener la temperatura establecida.
- Modo servo control piel: a través de una sonda adherida al recién nacido se establece la temperatura de la piel, para que posteriormente el calentador varíe la temperatura del aire hasta alcanzar el objetivo. En ocasiones la sonda puede desprenderse o mojarse dando como resultado amplias fluctuaciones en la temperatura del aire lo que puede empeorar el estado del bebe.

Existen incubadoras de única pared que normalmente requieren una temperatura mayor del aire debido al enfriamiento de la pared exterior, lo que produce una mayor pérdida por radiación. Con el fin de solucionar esta problemática se crearon las incubadoras de doble pared que son muy útiles para recién nacidos con un peso menor a 1500 gramos [2].

Las incubadoras mantienen niveles de humedad entre estables y elevados, ya que este tipo de variaciones pueden ser necesarias en determinadas situaciones clínicas. En la actualidad se desconoce el tiempo ideal para hacer la transición de la incubadora a la cuna, pero en la mayoría de los casos los bebés que pesan entre 1700 y 1800 gramos pueden sobrellevar este cambio adaptándose a la temperatura y continuando con su crecimiento normalmente [3].

Las incubadoras de calor radiante son de fácil acceso, ya que

básicamente el recién nacido debe estar en una plataforma con una fuente de calor radiante arriba de él. Se coloca un sensor de temperatura en el pecho o abdomen del recién nacido con la finalidad controlar la salida del calentador para obtener la temperatura fija de la piel que normalmente es 36,5 °C.

Debido a su diseño, no se puede controlar la humedad ambiental por lo que puede existir un aumento en las pérdidas de líquido. Lo que produce un entorno térmico muy desigual en comparación con otras incubadoras. Se recomienda el uso de un dosel de plástico para crear un microambiente humidificado; en caso de que se retire el plástico la humedad descenderá rápidamente y el neonato perderá grandes cantidades de líquido [3].

Se desglosa un poco más los componentes de un calentador radiante se puede observar que está dividido en ocho partes:

- Iluminación LED
- Caja de radiación
- Controlador
- Cuna
- Estante
- Sensor de temperatura de la piel
- Soporte de infusión
- Bandeja de instrumentos

En algunas ocasiones, la incubadora de calor radiante incluye un dispositivo para el tratamiento de la ictericia, que es una condición médica donde la piel y las mucosas se tornan amarillas debido al aumento de bilirrubina.



Figura 2.1: Incubadora de calor radiante

2.2. Actuador de calor radiante

La mayoría de estos equipos están constituidos básicamente de un dispositivo de radiación infrarroja que proporciona calor continuo al recién nacido, un sensor de temperatura de la piel que puede ser digital o analógico. Además poseen un detector de temperatura infrarrojo lejano para monitorear la superficie corporal y la superficie de la cama durante el proceso de lactancia [6].

Características básicas de los calentadores radiantes

Entre las principales características de los dispositivos de calefacción radiante tenemos:

- Iluminación LED ajustable y reversible.

- Superficie inclinable y ajustable.
- Cabezal de radiación capaz de girar $\pm 90^\circ$ C en dirección horizontal.
- Se puede corregir el error de temperatura e índice de alarma en el panel de control.
- Tiene tres modos de control: precalentamiento, automático y manual.



Figura 2.2: Actuador de calor radiante

2.3. Controlador PID clásico

Un controlador PID es un instrumento de control en lazo cerrado, usado para que un sistema logre un estado de salida deseado. El

controlador PID consta de tres elementos que proporcionan acción proporcional, integral y derivativa. Estas tres acciones son la razón del nombre del controlador PID, tal como se muestra en la ecuación y en el diagrama de bloques a continuación.

$$c(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$

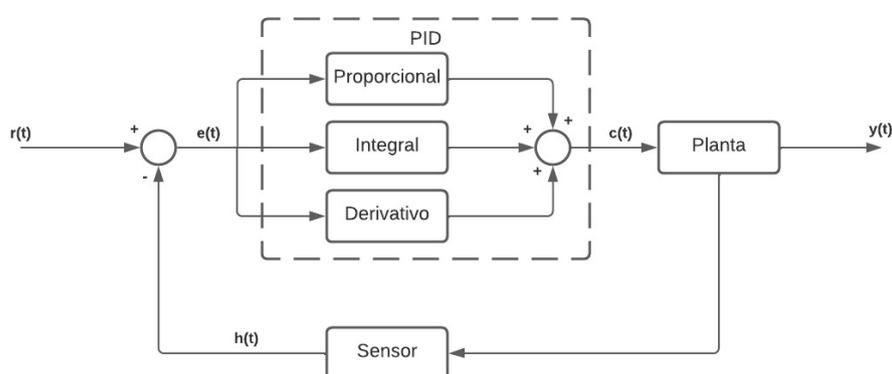


Figura 2.3: Diagrama de un sistema a lazo cerrado con PID

La señal $r(t)$ se denomina referencia y representa el estado de salida deseado del sistema $y(t)$. En un sistema de control de temperatura, la referencia $r(t)$ será la temperatura deseada y la salida $y(t)$ será la temperatura real del sistema controlado.

Como se muestra en la figura 2.2, la entrada al controlador PID es la señal de error $e(t)$. Esta señal le dice al controlador el estado que se debe alcanzar, o la diferencia entre el valor de referencia $r(t)$ y la señal medida del sistema $h(t)$.

Si la señal de error es grande, el estado del sistema está lejos

del estado de referencia deseado. Por el contrario, si el error es pequeño, significa que el sistema está alcanzando el estado esperado.

2.3.1. Acción proporcional

Como sugiere el nombre, esta acción de control es proporcional a la señal de error $e(t)$. Internamente, la acción proporcional multiplica la señal de error por la constante K_p .

Dicha acción intenta minimizar la magnitud del error del sistema. Cuando el error es grande, la acción de control también lo es y tiende a minimizar el error.

Aumentar el efecto relativo de K_p tiene los siguientes efectos:

1. Mejorar la capacidad de respuesta del sistema.
2. Reducir el error del sistema en estado permanente.
3. Aumenta la inestabilidad del sistema.

2.3.2. Acción integral

Como sugiere el nombre, esta acción de control calcula la integral de la señal de error $e(t)$. La integración se puede considerar como la suma o acumulación de señales de error. Con el tiempo, los pequeños errores se suman para hacer que la integral sea cada vez más grande. Esto reduce la falla del sistema en el estado estacionario. La desventaja de usar la acción integral es que agrega

algo de inercia al sistema, haciéndolo más inestable. Aumentar la acción total de K_i tiene los siguientes efectos:

1. Reducir el error del sistema en estado permanente.
2. Aumenta la inestabilidad del sistema.
3. Ligero aumento en la velocidad del sistema.

2.3.3. Acción derivativa

Como sugiere el nombre, esta acción de control es proporcional a la derivada de la señal de error $e(t)$. La derivada del error es otra forma de llamar a la tasa de cambio del error. Cuando el sistema se mueve hacia el punto de referencia a una alta tasa de cambio, el sistema tiene inercia. Esto provoca sobreimpulsos y oscilaciones alrededor de la referencia.

Para evitar este problema, el controlador debe determinar la velocidad a la que el sistema se acerca al punto de referencia para el frenado previo y evitar el exceso a medida que se acerca al punto de referencia deseado.

El aumento de la constante de control de la derivada K_d tiene los siguientes efectos:

1. Aumentar la estabilidad del sistema controlado.
2. Reduzca un poco la velocidad del sistema.
3. El error de estado estacionario seguirá siendo el mismo.

2.4. Controlador por reubicación de polos

La reubicación de polos se utiliza para definir el comportamiento del sistema en función de la posición de los polos del sistema, con el objetivo de mover los polos a una posición deseada de manera que el comportamiento de este se ajuste a especificaciones de diseño.

Para diseñar un controlador por reubicación de polos es necesario conocer de antemano la dinámica del sistema, conocer los polos iniciales y poder controlar sus posiciones en lazo cerrado para obtener una respuesta particular, lo que implica que el sistema debe ser controlable.

Bajo ese criterio se podrá determinar la matriz de ganancia de realimentación de estados K requerida para la reubicación de los polos en los lugares requeridos por el diseño, donde $x(k)$ son los estados presentes y $x(k + 1)$ los estados futuros, donde G es la matriz de estados y H es la matriz de entrada del sistema.

$$x(k + 1) = (G - HK)x(k) \quad (2.2)$$

Pero el diseño del controlador según la ecuación 2.2, se necesita que todas las variables de estado puedan ser medidas, pero debido a las características de la planta eso no es posible de forma directa. Por lo cual es necesario la implementación de un observador de estados, que permita estimar los valores no medibles a partir de la variable de salida y de control, para lo cual el sistema también debe ser

observable. Se asume que los estados $x(k)$ no están disponibles para compararse con los estados estimados $\tilde{x}(k)$. Sin embargo, dado que se conoce la salida estimada y es completamente medible ($\tilde{y}(k) = C\tilde{x}(k)$) se la podrá comparar con $y(k)$, para lo cual se usa el esquema que se muestra en la figura 2.4.

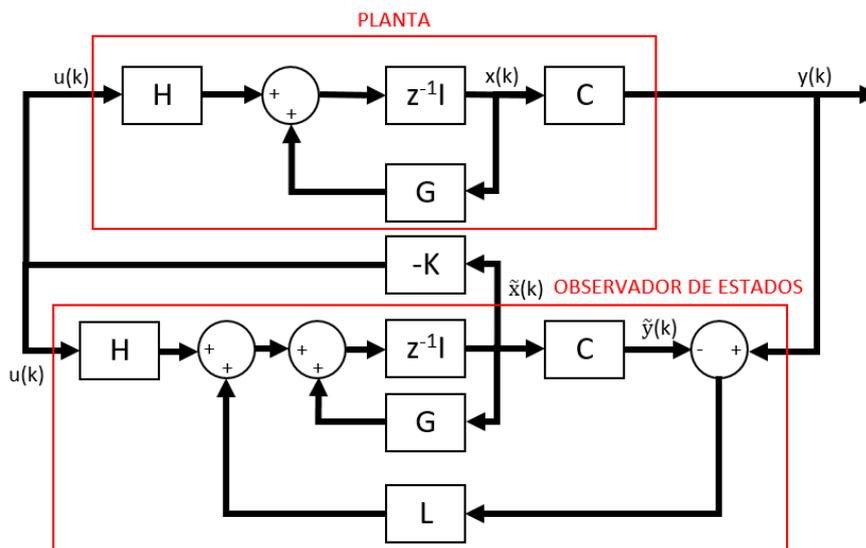


Figura 2.4: Representación de variables de estado con observador

El observador de estados mostrado en el diagrama anterior se lo conoce como observador predictivo, pues el estado estimado $\tilde{x}(k+1)$ está un periodo de muestreo adelante de la medición $y(k)$. Donde los valores característicos de $(G - LC)$, se los conocen como polos del observador.

Teniendo en cuenta que L es el vector de ganancia que corrige el error entre los estados reales y observados, y que C es la matriz de salida del sistema, se obtienen las siguientes ecuaciones.

$$x(k+1) - \tilde{x}(k+1) = (G - LC)[x(k) - \tilde{x}(k)]$$

$$e(k) = x(k) - \tilde{x}(k)$$

$$e(k+1) = (G - LC)e(k) \quad (2.3)$$

Se requiere que la matriz $(G - LC)$ sea estable, el vector de error de estimación $e(k)$ convergerá a cero para cualquier error inicial, y si los valores característicos tienen un comportamiento dinámico suficientemente rápido el error tenderá a cero a una velocidad adecuada.

Donde las matrices K y L se las determina de la siguiente forma:

$$|zI - G + HK| = 0 \quad (2.4)$$

$$|zI - G + CL| = 0 \quad (2.5)$$

Los polos del observador por lo general se seleccionan para que la respuesta de este sea mucho más rápida que la respuesta del sistema. Con ello en base la función de transferencia pulso del controlador quedará definida como:

$$D(z) = -\frac{U(z)}{Y(z)} = K[zI - G + HK + LC]^{-1}L \quad (2.6)$$

Y considerando que se desea tener un error de estado estacionario igual a cero, ante una entrada de tipo escalón se debe agregar un factor de corrección K_o en la referencia. Con lo cual el lazo de control quedaría definido como se observa en la siguiente Figura 2.5.

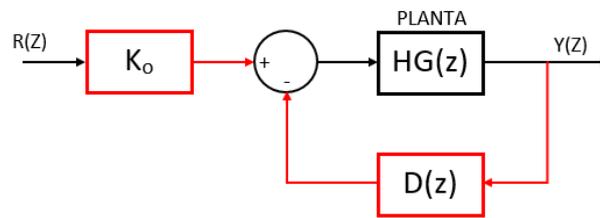


Figura 2.5: Lazo de Control por Observador de Estados

Donde K_o se la obtiene de la evaluación del límite:

$$K_o \lim_{z \rightarrow 1} \frac{HG(z)}{1 + D(z)HG(z)} = 1 \quad (2.7)$$

Capítulo 3

3. IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA

3.1. Diseño del experimento

Para realizar la identificación de la planta, se tuvo que tener en cuenta que el equipo no podía ser desmantelado por pertenecer a un hospital, lo cual limita el tipo de acciones que se podían realizar sobre el mismo.

Considerando las restricciones de uso del equipo en mantenimiento, se logró desconectar la unidad de calor radiante del control de la incubadora. Dicha unidad incluye el driver de potencia; mismo que puede recibir señales entre 0 y 5 voltios DC.

La medición de temperatura se la hizo por medio de una sonda tipo RTD externa debido a que los sensores de la incubadora son de tipo digital serial, y no hay forma de realizar un registro de dichos datos de forma directa.

En la Figura 3.1 se puede observar el diagrama de interconexión de los dispositivos para realizar la toma de datos de la planta.

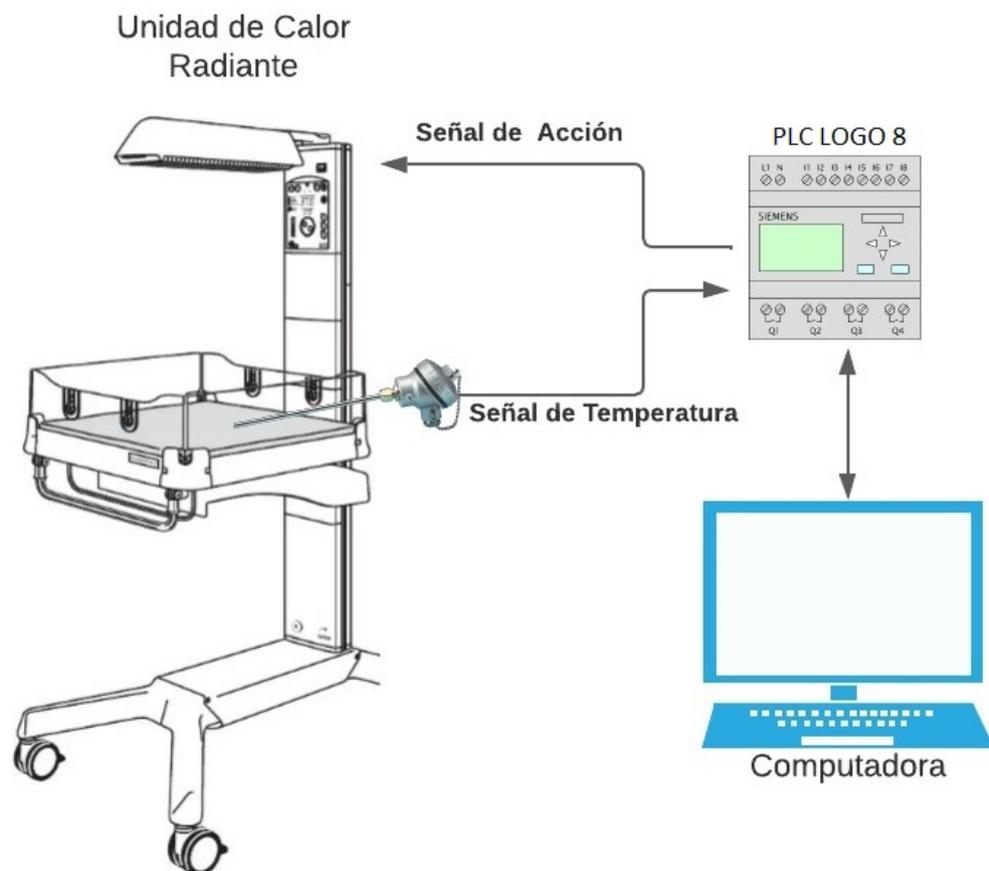


Figura 3.1: Diagrama de interconexión del experimento

3.2. Análisis de la respuesta de la planta

Por medio del computador se realizó una prueba inicial al enviar una señal al actuador de 3 voltios, como se observa en la Figura 3.2, con el objetivo de estimar el tiempo de estabilización de la planta y el valor de temperatura al que puede llegar.

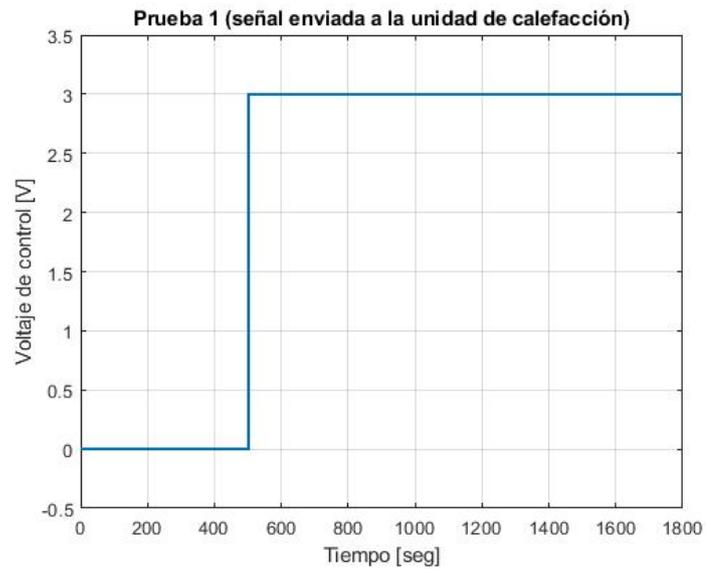


Figura 3.2: Señal de entrada para la prueba 1

En la primera prueba se pudo observar que la planta alcanza un punto de estabilidad, lo que corresponde a un tiempo de estabilización de 1700 segundos, con un valor aproximado de 79 °C, tal como se observa en la Figura 3.3.

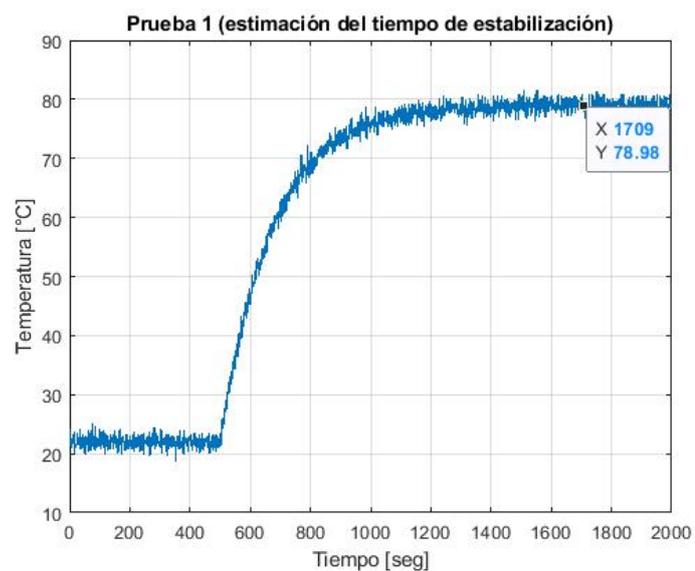


Figura 3.3: Señal de salida para la prueba 1

A partir de la estimación obtenida se procedió a diseñar una nueva señal de entrada con el objetivo de reunir más datos, de tal forma que sirvan para la identificación de la planta. El experimento para la toma de datos tuvo una duración de 1 hora y 48 minutos y se realizaron un total de 4 cambios en el voltaje de entrada.

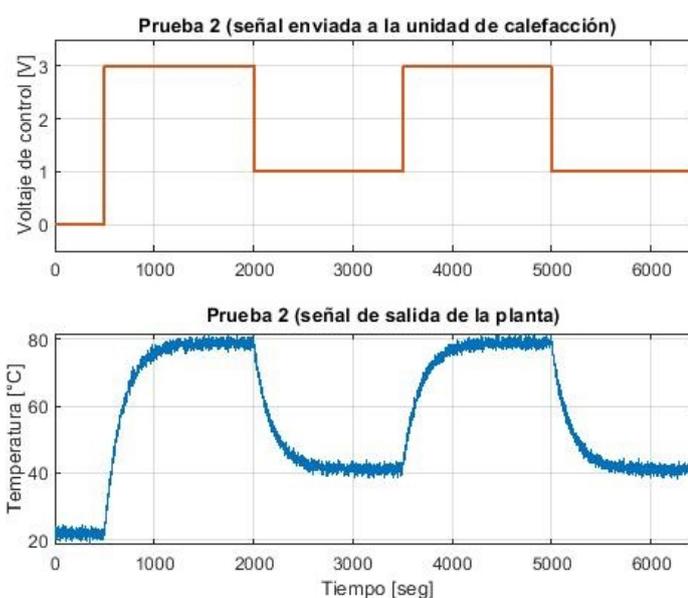


Figura 3.4: Señales de entrada y salida para la prueba 2

Cabe recalcar que la señal de salida tiene un nivel de offset, debido a la temperatura ambiente de aproximadamente 21 °C, dicha temperatura es la registrada en el lugar donde se llevó a cabo el experimento.

3.3. Obtención de la función de transferencia

Una vez cargados los datos en MATLAB se procedió a realizar la identificación del sistema a partir de estos usando el toolbox System Identification.

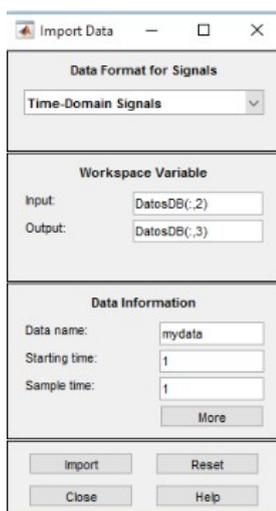


Figura 3.5: Importación de datos al toolbox de identificación

Como se muestra en la Figura 3.5, se importa los datos desde el workspace con un tiempo de muestreo de 1 segundo, ya que es el tiempo que se usó para grabar los datos de la planta durante el experimento 2.

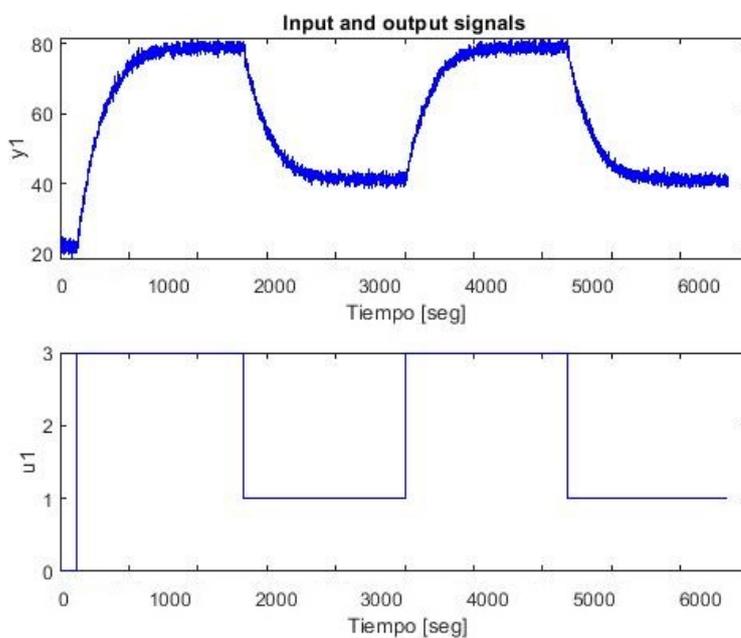


Figura 3.6: Señales de entrada y salida cargadas en el toolbox de identificación

Preprocesamiento de Datos

Como paso previo al análisis de los datos para la identificación se realiza lo siguiente:

- Remoción de medias
- Selección de datos para estimación y validación

En la remoción de medias se pretende quitar el punto de operación de los datos tomados con el propósito de concentrar el análisis solo en los cambios provocados por la señal de entrada, tal como se muestra en la Figura 3.7.

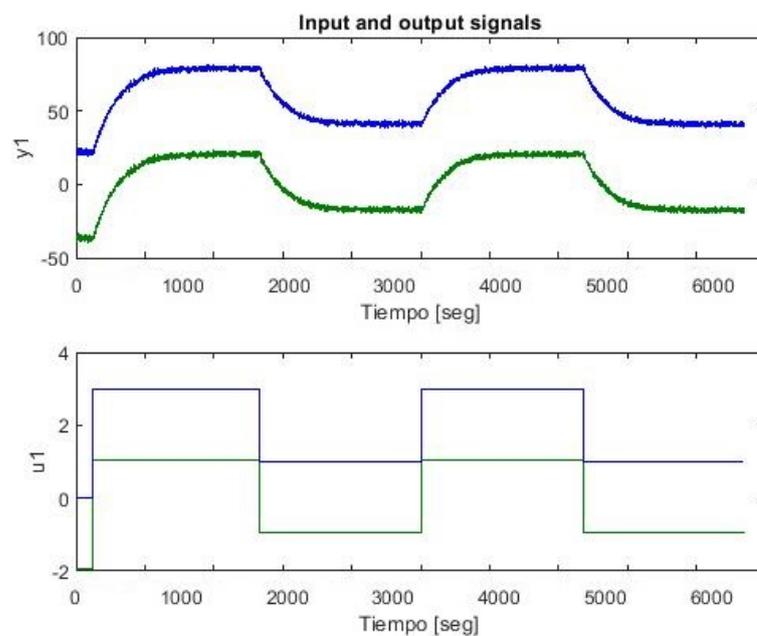


Figura 3.7: Remoción de medias en las señales de entrada y salida

Como se observa en la Figura 3.8, en la selección de datos para estimación y validación se escogen grupos de datos que no contengan el arranque del sistema de igual forma no debe contener perturbaciones externas al mismo.

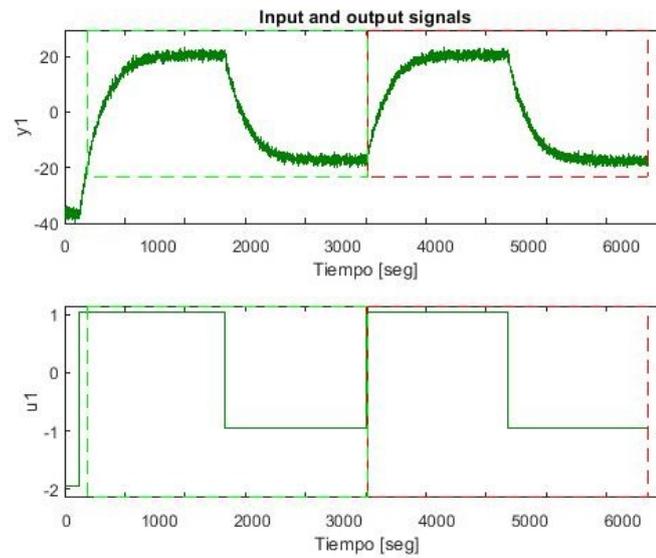


Figura 3.8: Selección de datos de estimación y validación

Una vez seleccionados los rangos se obtiene dos grupos de datos; el primer grupo será utilizado para realizar el análisis de estimación del modelo que represente al sistema, mientras que el segundo grupo será usado para validar los modelos obtenidos del análisis previo, tal como se muestra en la Figura 3.9.

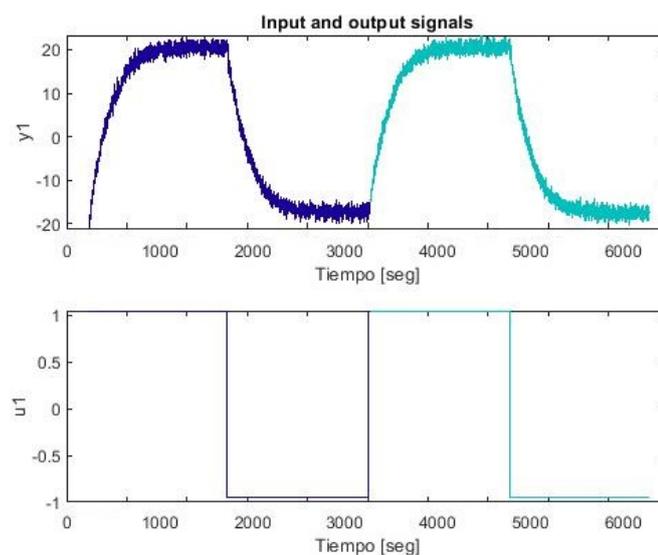


Figura 3.9: Datos de validación (azul), datos de estimación (celeste)

Con los datos cargados se procede a realizar el análisis de estimación por medio de Polynomial Models, donde se puede obtener modelos basado en las siguiente estructuras:

ARX

ARMAX

Output Error (OE)

Box-Jenkins (BJ)

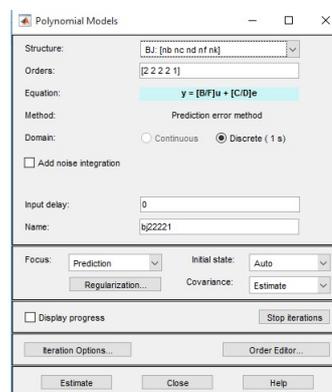


Figura 3.10: Selección de la estructura para la estimación

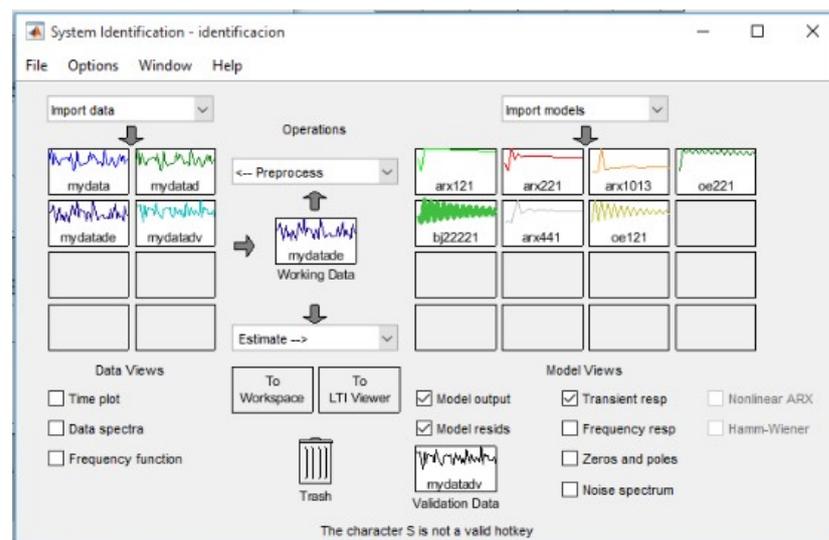


Figura 3.11: Modelos obtenidos

Una vez que se obtienen modelos de cada estructura, se procede a la verificación de cada uno con el objetivo de encontrar el modelo que mejor se aproxime a los datos obtenidos durante el experimento.

Se busca el modelo que mejor aproxime su salida a la forma de onda de la señal de validación.

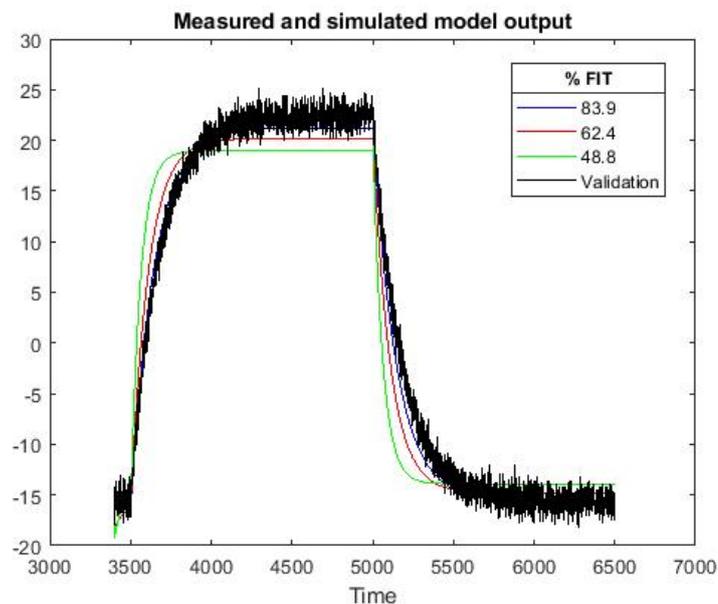


Figura 3.12: Comparación de los modelos obtenidos con los datos de validación

Una vez seleccionados los modelos que mejor representan el comportamiento de los datos de validación, se procede a analizar el modelo de cada uno, para ello se verifica que se cumplan los criterios de parsimonia, de tal forma que se cumpla tanto para la auto correlación como para la correlación cruzada, seleccionando el modelo que satisfaga los criterios.

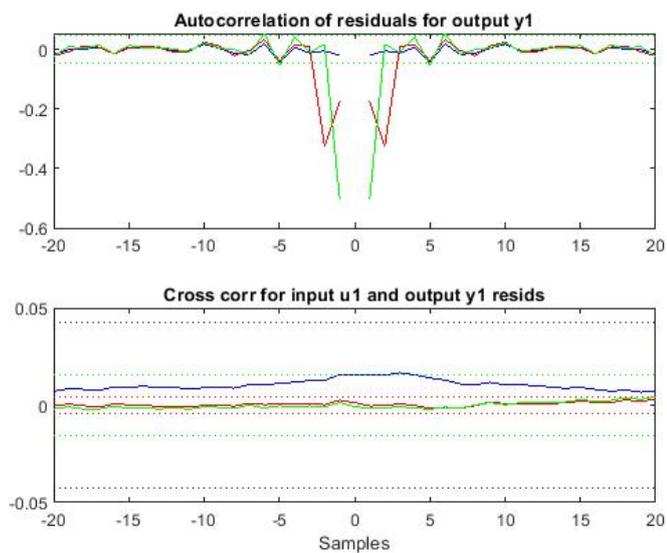


Figura 3.13: Autocorrelación y correlación cruzada

Como se puede observar la en la figura 3.13 de los modelos seleccionados previamente solo uno cumple los criterios para la autocorrelación y la correlación cruzada, la misma que se puede ver en más detalles en la figura 3.14.

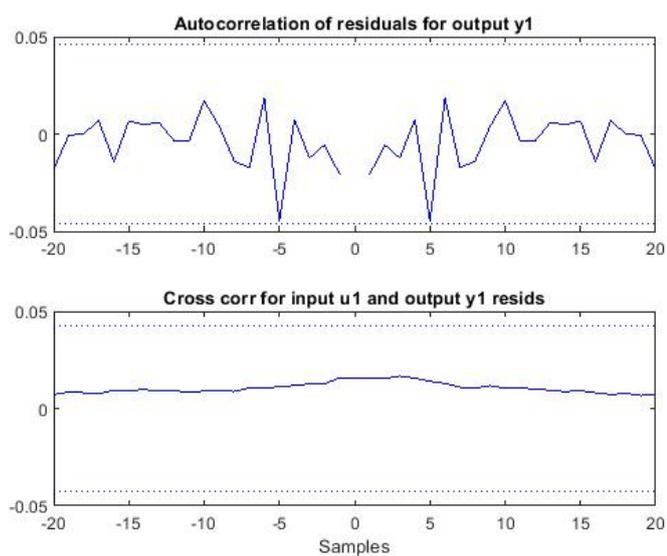


Figura 3.14: Autocorrelación y correlación cruzada del modelo que cumple los criterios de parsimonia

Posteriormente se observa la respuesta escalón de los modelos, tal como se observa en la figura 4.1, el modelo obtenido con la estructura Box-Jenkins representada en color azul es la que mejor representa el comportamiento en magnitud y tiempo del sistema con respecto a la respuesta real de la planta, con ello se procede a exportar dicho modelo.

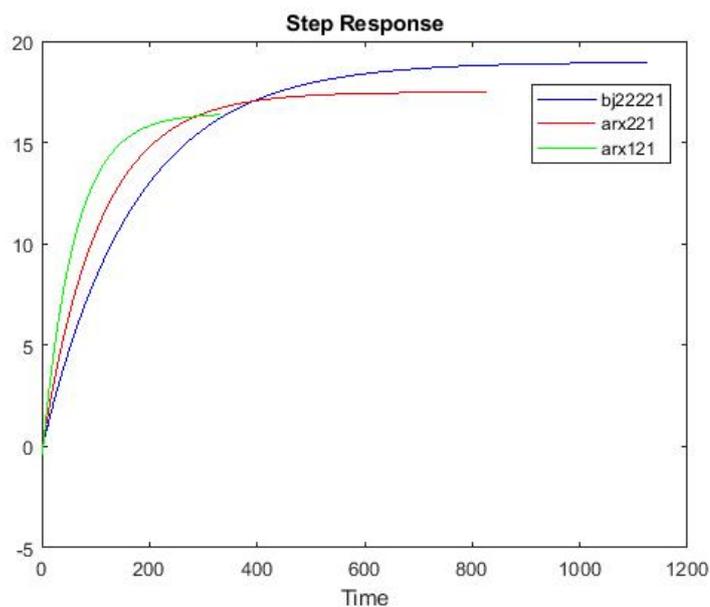


Figura 3.15: Respuesta a la entrada escalón de los diferentes modelos identificados

Con lo cual se obtiene la función de transferencia que se usará para el diseño del controlador PID en tiempo continuo, la misma que se muestra a continuación.

$$G(s) = \frac{0,11007(s^2 + 0,6123s + 9,872)}{s^3 + 0,0106s^2 + 9,87s + 0,0571} \quad (3.1)$$

Mientras que para el diseño del controlador por reubicación de polos en tiempo discreto se usará la función de transferencia mostrada en la ecuación 3.2, la cual se obtiene a partir de la discretización de la función de transferencia

continua obtenida previamente.

$$G(z) = \frac{0,1233z + 0,09602}{z^2 + 0,003364z - 0,9918} \quad (3.2)$$

Finalmente se compara las funciones de transferencia con los datos obtenidos en el experimento 1 para verificar que se cumple la dinámica representada por los datos.

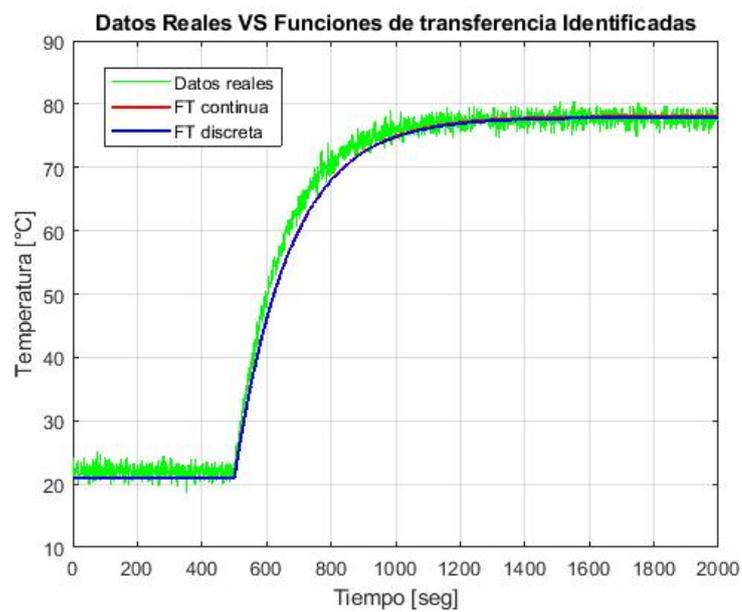


Figura 3.16: Respuesta a la entrada escalón de las funciones de transferencia a utilizar y de la planta

Capítulo 4

4. DISEÑO DE LOS CONTROLADORES

Para el diseño de los controladores se va a considerar que la respuesta del sistema ante una entrada escalón debe cumplir las siguientes especificaciones:

- Tiempo de estabilización menor a 200 segundos
- Sobrenivel porcentual menor al 5 %
- Error de estado estacionario igual a cero

4.1. Diseño del controlador PID clásico

Una vez obtenida la función de transferencia continua se procede al diseño del controlador PID, mediante la técnica del lugar geométrico de las raíces.

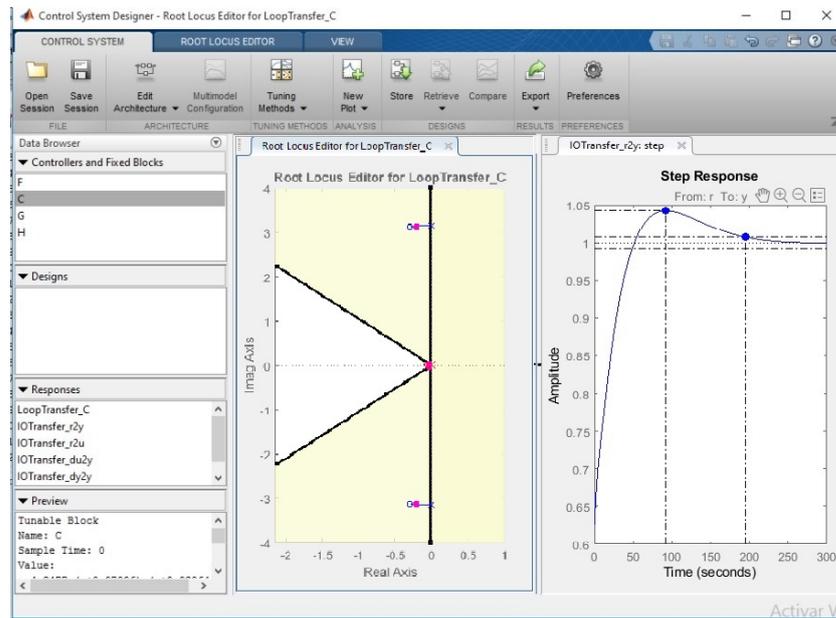


Figura 4.1: Diseño del controlador PID mediante el lugar geométrico de las raíces

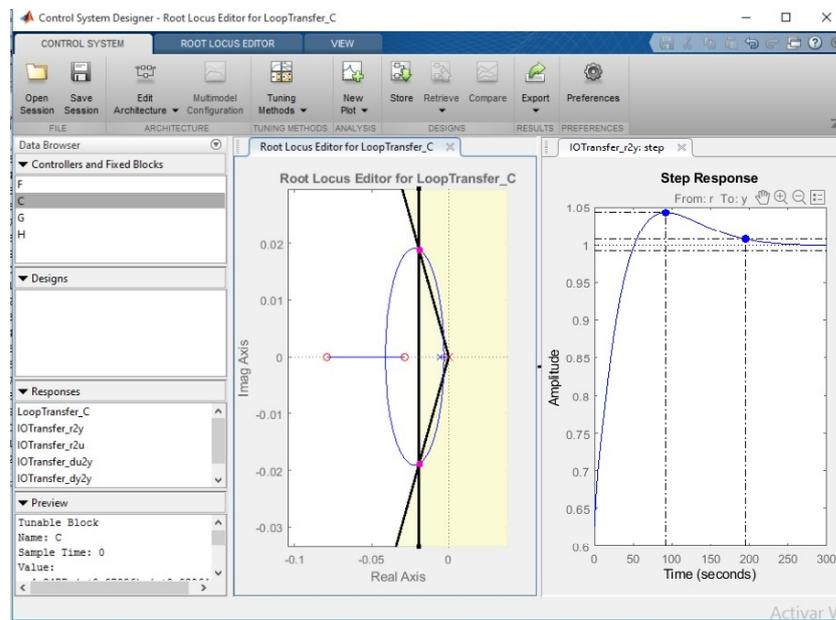


Figura 4.2: Área de interés del lugar geométrico de las raíces

Estableciendo los requerimientos de diseño en Sisotool y ajustando las respectivas ganancias, se obtuvo el controlador mostrado a continuación:

$$C_{pid} = 0,453 \cdot e(t) + 0,00423 \int e(t)dt + 0,73 \frac{de(t)}{dt}$$

4.2. Diseño del controlador por reubicación de polos

Una vez implementadas las ecuaciones en MATLAB se obtuvo la función de transferencia pulso del controlador y K_o que se muestra a continuación.

$$D(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{2,61z - 2,352}{z^2 + 0,2904z + 0,1304}$$

$$K_o = 0,1814$$

4.3. Simulación de los controladores en la planta identificada

Una vez diseñados ambos controladores se procedió a implementar los diagramas de bloques correspondientes, para probar el desempeño de cada uno ante una entrada escalón a una temperatura de 36.5°C considerando que la planta tiene una temperatura inicial de 22°C correspondiente a la temperatura ambiente.

4.3.1. Controlador PID

Para la simulación del controlador PID por medio de Simulink se implementó el siguiente diagrama de bloques:

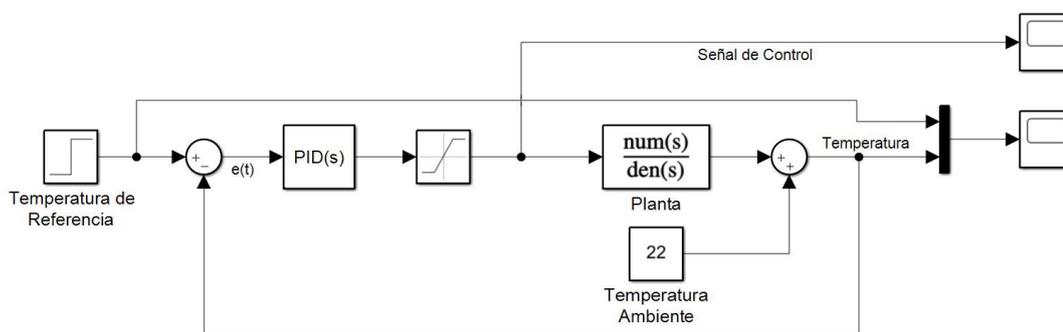


Figura 4.3: Diagrama de bloques para simular el controlador PID

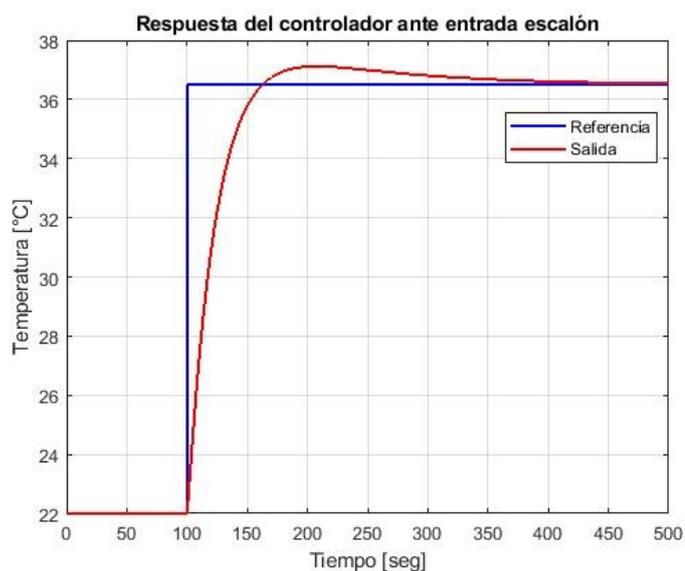


Figura 4.4: Señales de entrada y salida con el controlador PID

Como se puede observar en la Figura 4.4, la señal de salida sigue a la referencia alcanzando la temperatura deseada. Considerando una banda del 2% como se muestra en la ecuación 4.1, el tiempo de estabilización obtenido es de 200 segundos.

$$t_{ss} : Temp_{final} - 2\%(Temp_{final} - Temp_{ambie}) < Temp \quad (4.1)$$

$$Temp < Temp_{final} + 2\%(Temp_{final} - Temp_{ambie})$$

$$36,5 - 0,29 < Temp < 36,5 + 0,29$$

$$36,21 < Temp < 36,79$$

Y el sobre nivel porcentual es del 3 % tal como se muestra en la ecuación 4.2.

$$SP = \frac{Temp_{pico} - Temp_{SS}}{Temp_{SS} - Temp_{inicial}} * 100\% \quad (4.2)$$

$$SP = \frac{37,1 - 36,5}{36,5 - 22} * 100\%$$

$$SP = 4,1\%$$

Además, se puede observar en la Figura 4.5 que la acción de control del PID se mantiene dentro del rango de trabajo la mayor parte del tiempo, aunque se puede observar que debido a la acción del controlador la señal quiere superar el rango permitido en el actuador, por lo que se ve saturada justo en el cambio de referencia.

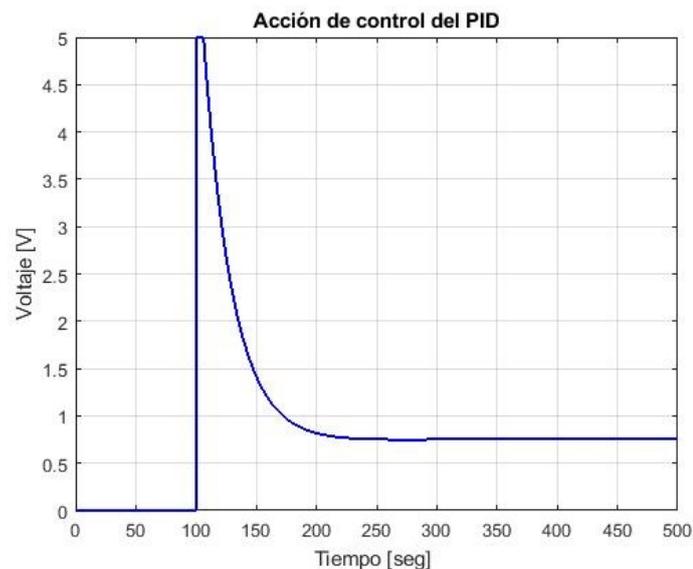


Figura 4.5: Señal de acción generada por el controlador PID

4.3.2. Controlador por reubicación de polos

Para la simulación del controlador por reubicación de polos en Simulink se implementó el siguiente diagrama de bloques:

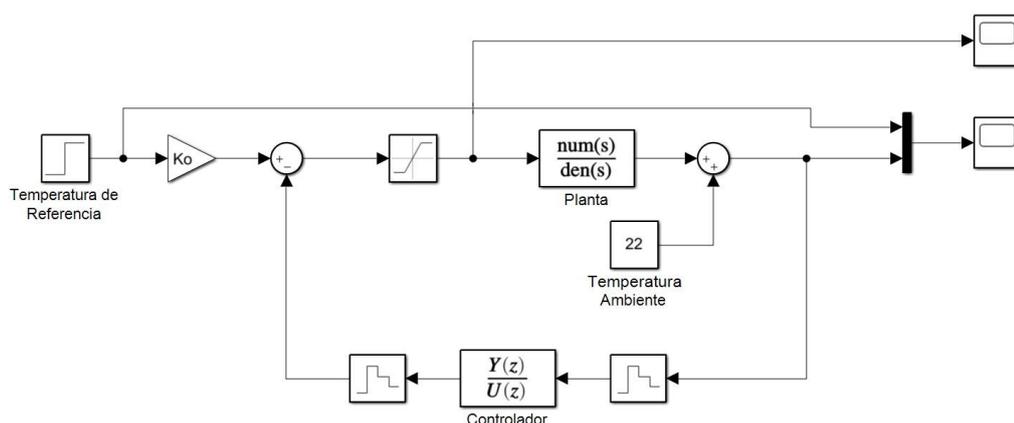


Figura 4.6: Diagrama de bloques para simular el controlador por reubicación de polos

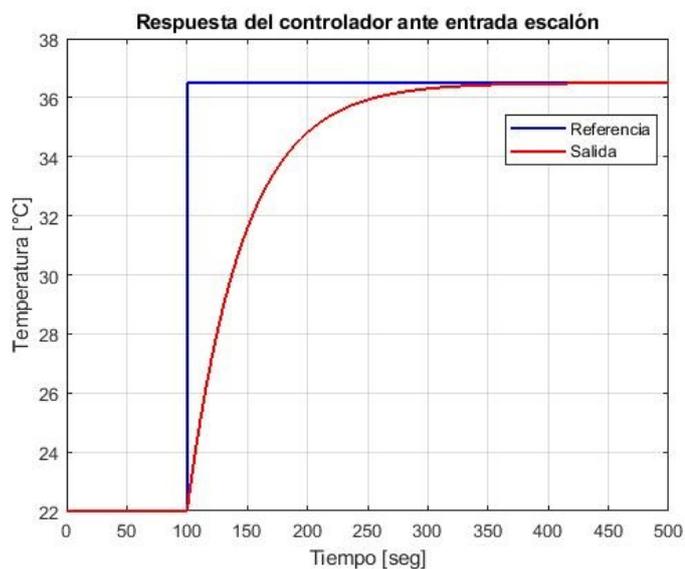


Figura 4.7: Señales de entrada y salida con el controlador por reubicación de polos

Como se puede observar en la Figura 4.7, la señal de salida sigue a la referencia alcanzando la temperatura deseada. Considerando una banda del

2% como se muestra en la ecuación 4.3, el tiempo de estabilización obtenido es de 200 segundos, sin tener sobre nivel porcentual.

$$t_{ss} : Temp_{final} - 2\%(Temp_{final} - Temp_{ambie}) < Temp \quad (4.3)$$

$$Temp < Temp_{final} + 2\%(Temp_{final} - Temp_{ambie})$$

$$36,5 - 0,29 < Temp < 36,5 + 0,29$$

$$36,21 < Temp < 36,79$$

Mientras que la señal de control se mantiene dentro del rango de trabajo todo el tiempo sin saturarse en ningún momento, esto se puede observar en la Figura 4.8.

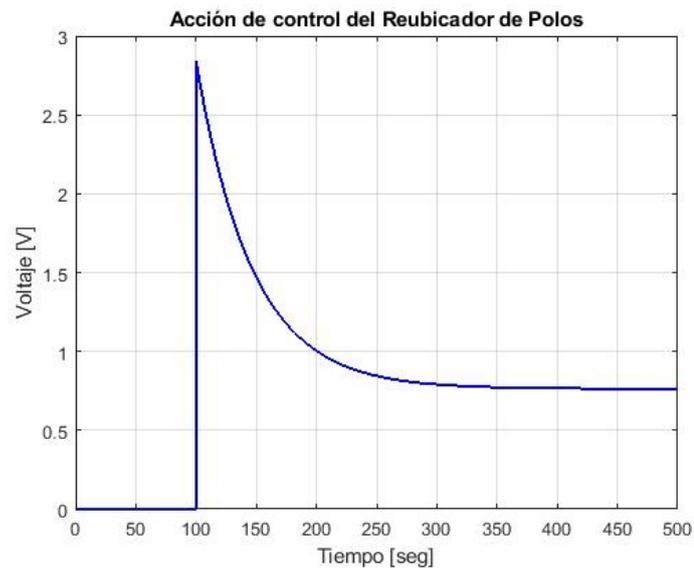


Figura 4.8: Señal de acción generada por el controlador por reubicación de polos

4.4. Simulación de los controladores con perturbaciones externas al lazo de control

Para comprobar la respuesta de los controladores en condiciones similares a las reales, se los sometió a perturbaciones externas de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ que actúan en el tiempo igual a 500 segundos y a 800 segundos, para observar su comportamiento.

4.4.1. Controlador PID

Para la simulación del controlador PID por medio de Simulink se implementó el siguiente diagrama de bloques que incluye una perturbación ascendente y otra descendente:

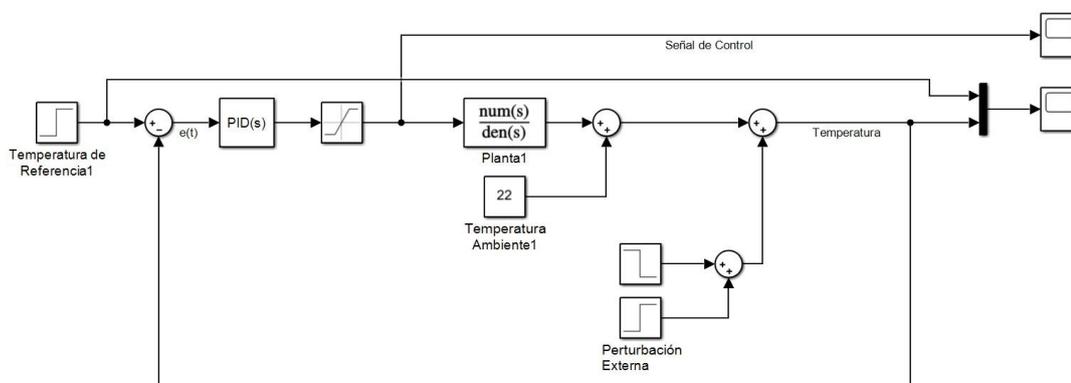


Figura 4.9: Diagrama de bloques para simular el controlador PID con perturbación externa

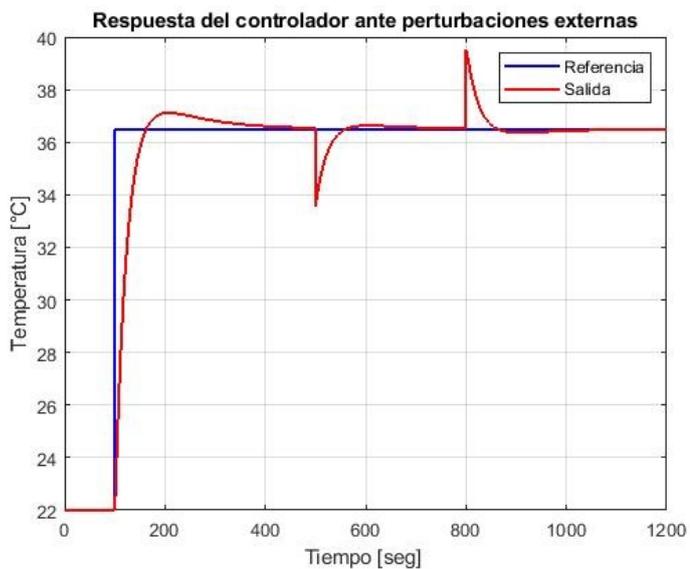


Figura 4.10: Señales de entrada y salida con el controlador PID ante perturbaciones externas

Como se puede observar en la Figura 4.10, la señal de salida sigue a la referencia alcanzando la temperatura deseada; incluso ante perturbaciones externas regresa a la temperatura deseada.

Se puede observar que la señal de control tiene cambios bruscos y llega a saturarse ante ambas perturbaciones, tal como se puede muestra en la Figura 4.11.

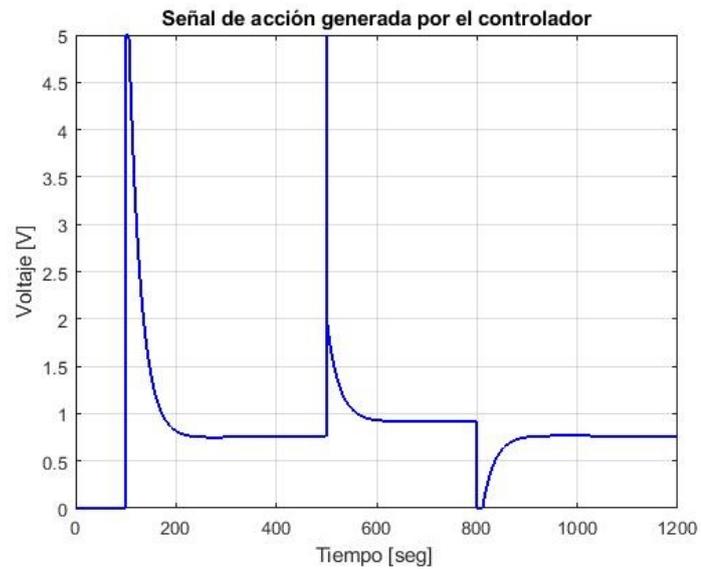


Figura 4.11: Señal de acción generada por el controlador PID sometido a perturbaciones externas

4.4.2. Controlador por reubicación de polos

Para la simulación del controlador por reubicación de polos en Simulink se implementó el siguiente diagrama de bloques que al igual que en el caso anterior incluye una perturbación ascendente y otra descendente:

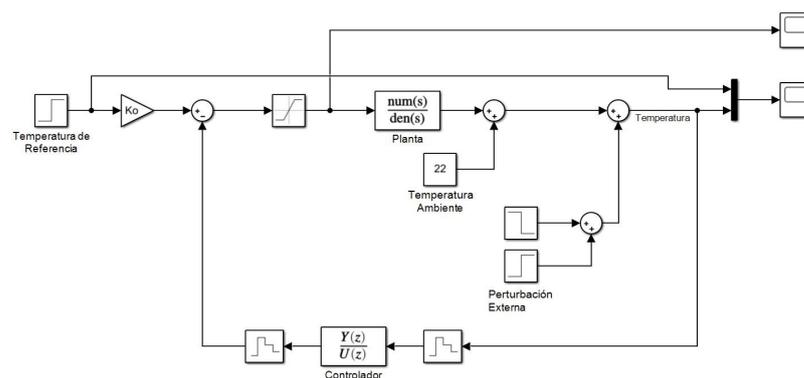


Figura 4.12: Diagrama de bloques para simular el controlador por reubicación de polos con perturbaciones externas

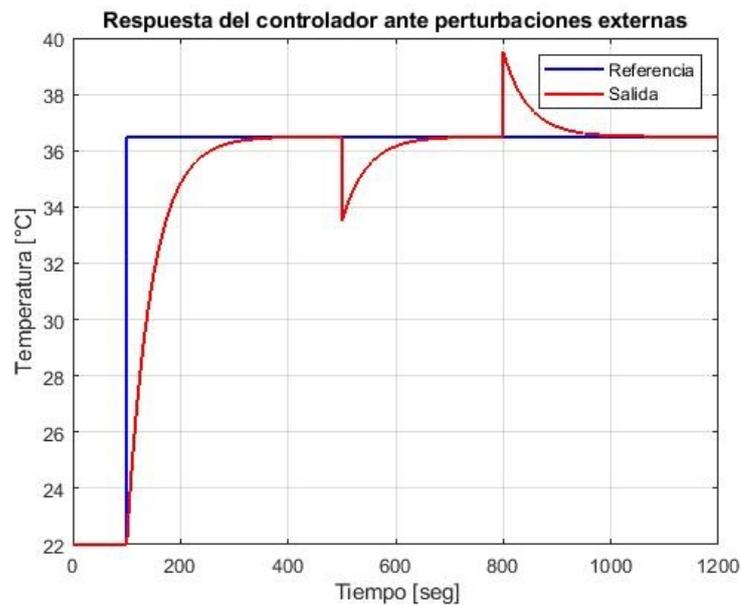


Figura 4.13: Señales de entrada y salida con el controlador por reubicación de polos ante perturbaciones externas

Como se puede observar en la Figura 4.13, la señal de salida sigue a la referencia alcanzando la temperatura deseada incluso luego de las perturbaciones externas, vuelve al punto de operación sin problemas.

Además, la señal de control se mantiene dentro del rango de trabajo todo el tiempo sin saturarse en ningún momento, esto se puede observar en la Figura 4.8.

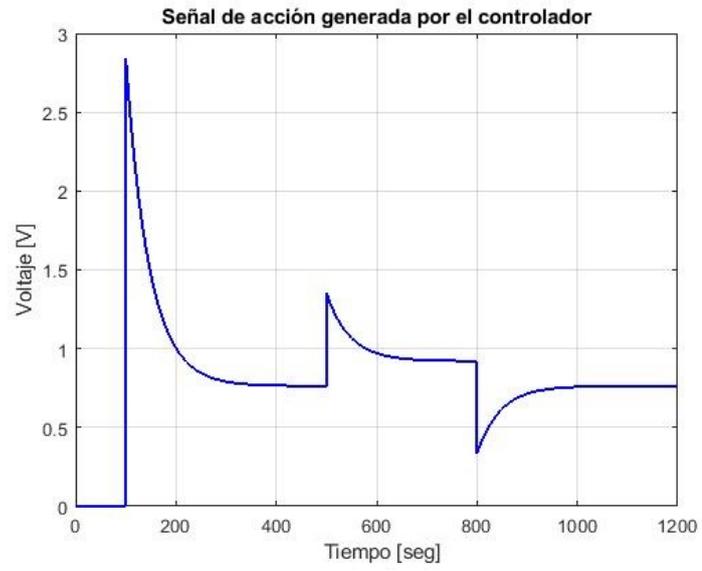


Figura 4.14: Señal de acción generada por el controlador por reubicación de polos sometido a perturbaciones externas

Capítulo 5

5. RESULTADOS OBTENIDOS

5.1. Análisis comparativo de los controladores diseñados

Analizando el comportamiento de ambos controladores, se puede denotar que ambos cumplen las características de diseño; el tiempo de estabilización es menor a los 200 segundos y el sobrenivel porcentual está por debajo del 5%. Pero también hay que tener en cuenta cómo se comporta la señal generada por los controladores y que ingresa al actuador de calor radiante.

Para ello se realiza la comparación de las respuesta de cada controlador ante cambios en la referencia y cambios ocasionados por perturbaciones externas de tal manera que se pueda discernir el que mejor se comporte.

5.2. Respuesta de la planta ante cambios de referencia

Comparando la respuesta de los controladores ante cambios en la referencia, se puede notar que ambos logran seguir los cambios manteniendo los requerimientos del diseño sin problemas, tal como se muestra en la Figura 5.1.

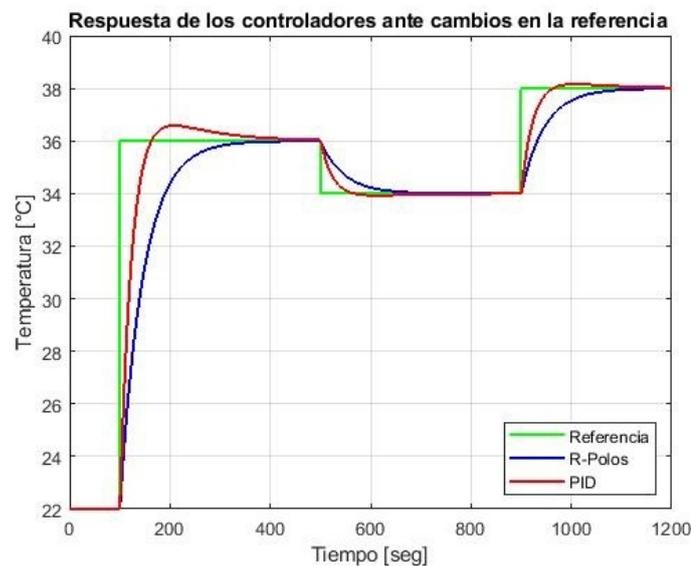


Figura 5.1: Comparativa de ambos controladores ante cambios en la referencia

Cabe destacar que los cambios de referencia en la planta real son mínimos, por lo cual se escogió cambios para la simulación de 2°C, lo cual es considerablemente mayor a lo que sucedería en la incubadora real.

Analizando la señal de control generada por ambos controladores, cabe destacar que la del controlador por reubicación de polos tiene un mejor comportamiento, manteniendo dicha señal siempre dentro del rango de operación y realizando cambios suaves ante las variaciones, contrariamente a

la señal dada por el PID que muestra saturaciones en cada cambio, como se observa en la Figura 5.2.

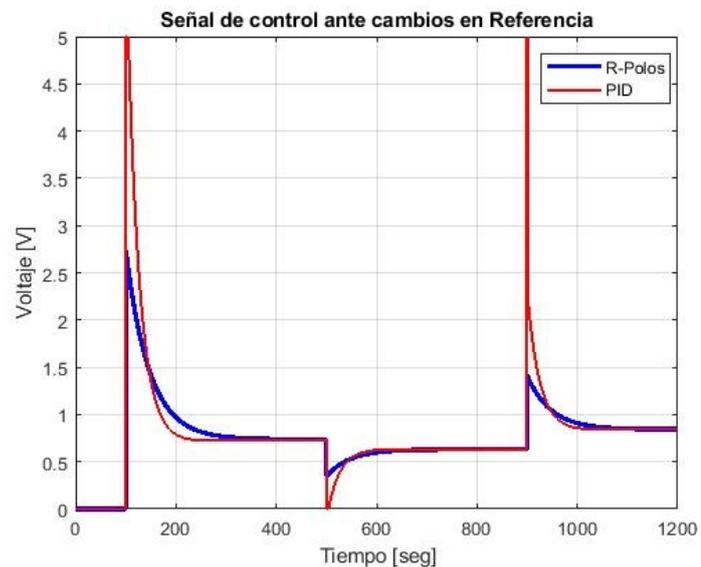


Figura 5.2: Comparativa de las señales de control ante cambios en la referencia

5.3. Respuesta de la planta ante perturbaciones externas

Comparando la respuesta de los controladores ante perturbaciones externas, nuevamente se puede observar que ambos logran seguir los cambios manteniendo los requerimientos del diseño sin problemas, tal como se muestra en la Figura 5.3.

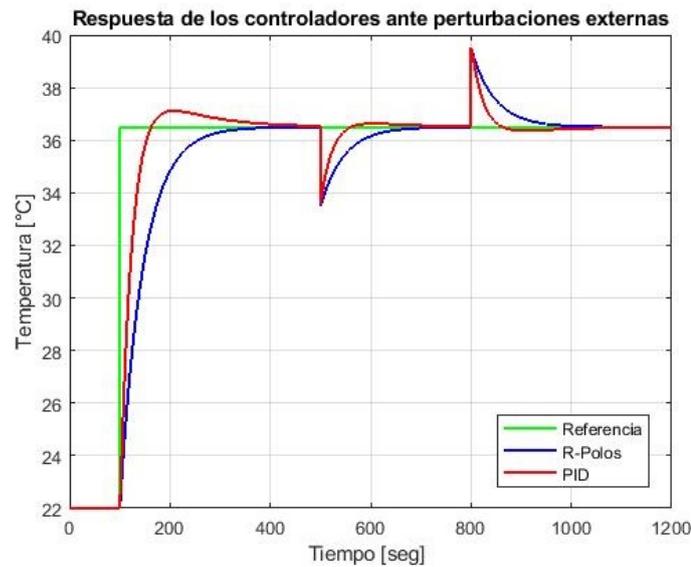


Figura 5.3: Comparativa de ambos controladores ante perturbaciones externas

Cabe destacar que las perturbaciones dadas en la planta real son considerables, debido a la constante renovación de aire de las salas médicas. Por esta razón se escogió para la simulación cambios de 3°C, lo cual es aproximado a lo observado en la planta real.

Analizando la señal de control generada por ambos controladores, cabe destacar que la del controlador por reubicación de polos tiene un mejor comportamiento, manteniendo dicha señal siempre dentro del rango de operación y realizando cambios suaves ante las variaciones, contrariamente a la señal dada por el PID que muestra saturaciones y cambios bruscos, como se observa en la Figura 5.4.

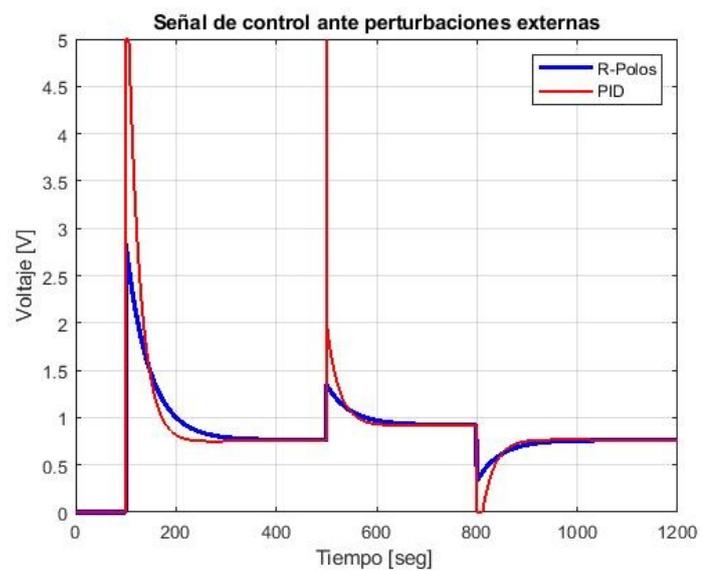


Figura 5.4: Comparativa de las señales de control ante perturbaciones externas

Conclusiones y Recomendaciones

CONCLUSIONES

- 1) En el presente trabajo se pudo identificar el comportamiento de la incubadora neonatal, sin necesidad de alterarla en gran medida. Para lograr esto fue necesario utilizar una sonda de temperatura externa, y conectar directamente al actuador de la unidad de calor radiante al dispositivo de adquisición de datos. De esta manera, se pudieron obtener los datos que permitieron encontrar la función de transferencia que representaba de mejor manera la dinámica del sistema.
- 2) Se logró diseñar ambos controladores, cumpliendo las especificaciones de diseño, ya que ambos lograron un tiempo de estabilización algo menor de 200 segundos, mientras para el sobre nivel porcentual el controlador PID mantiene un porcentaje alrededor del 4.9%, a diferencia del controlador por reubicación de polos que no presento sobre nivel porcentual.
- 3) Con las simulaciones de ambos controladores se puede observar que ambos logran seguir la referencia, o mantenerla antes perturbaciones externas. Sin embargo, al analizar las señales que se envían al actuador, se puede concluir que el controlador

por reubicación de polos es más amigable con la planta al no presentar cambios bruscos ni saturaciones, a diferencia del controlador PID. Por esta razón se puede concluir que el controlador diseñado por reubicación de polos es el más adecuado para ser usado en la planta real.

- 4) Finalmente se puede concluir que la incubadora por calor radiante, pudiera adaptarse a las perturbaciones externas ocasionadas por la constante renovación de aire en el hospital, si se considera cambiar el controlador ON/OFF existente por un controlador como el diseñado en el presente trabajo.

RECOMENDACIONES

- 1) Previo a realizar la toma de datos para la identificación del sistema es recomendable realizar un par de pruebas de tiempo abierto, con el fin de estimar los efectos de la magnitud y duración de la señal de entrada, para luego poder diseñar un experimento adecuado para el proceso de identificación.
- 2) Como se trata de datos reales tomados de una planta física, estos están afectados por ruido, por lo cual es importante, tener en cuenta las tolerancias al ruido del dispositivo de adquisición de datos y del sensor a usar.
- 3) Durante el análisis de los modelos que representen el comportamiento de la planta, es recomendable usar el modelo que mejor se aproxime, pero a la vez que tenga el menor grado posible, para facilitar el diseño de los controladores.
- 4) Para los controladores diseñados además de verificar que estos cumplan los requerimientos planteados, se debe tener en cuenta el comportamiento de la señal de control, porque de esto depende el funcionamiento a largo plazo que tendría el actuador.

Bibliografía

- [1] ANDRÉS PEÑA, *“Guías de Tratamiento Unidad de Cuidados intensivos Neonatal”*,(2012). Hospital San Juan de Dios de Serena de Chile.
- [2] ANA QUIROGA, *“Guía de Práctica Clínica de termorregulación en el recién nacido”*, (2010). Sociedad Iberoamericana de Neonatología de Argentina
- [3] LYON AJ, FREER Y. , *“Goals and options in keeping preterm babies warm”*, (2011). Arch Dis Child Fetal Neonatal; 96: F71-74.
- [4] BISSINGER RL, ANNIBALE DJ., *“Thermoregulation in very low-birth-weight infants during the golden hour: results and implications”*,(2010). Available in: Adv Neonatal Care.
- [5] FLENADY VJ, WOODGATE PG., *“Radiant warmers versus incubators for regulating body temperature in newborn infants”*, (2003). Cochrane Database Syst, Issue 4. Art. No.: CD000435.DOI:10.1002/14651858.CD000435
- [6] JISHENG, *“Mesa calefactora de radiación infantil”*,(2021). Dispositivo Médico Co., Ltd.
- [7] *“Identificación de Sistemas Dinámicos”*, (2013). Universidad Nacional de la Plata, Cátedra de control.
- [8] VALLEJO, R., *“Identificación paramétrica de sistemas dinámicos”*, (2011). Revista Científica Ingeniería y Desarrollo, no 2, p. 10-22.