



Capítulo III

Diseño del sistema de control de la temperatura en los selladores de la máquina.

3.1. Introducción.

Para la modernización de la máquina Sollas 20 es necesario realizar un control exacto de la temperatura en los selladores, con el objetivo de mantener la temperatura en un valor estable, así el sellado queda con la calidad requerida. Un nuevo diseño para el control requiere de cierta información, específicamente, su modelo matemático. En el capítulo se recurre a la identificación experimental para la obtención del modelo. Una vez que se obtiene el modelo, este se valida y se procede al diseño del controlador, por uno de los métodos existentes para ello, se ajustan sus valores buscando una respuesta óptima y se escoge la estrategia de control adecuada, basándose en los diferentes parámetros de la respuesta temporal del sistema. Posteriormente se analiza la calidad del control y se pone a prueba ante una referencia variable.

3.2. Identificación.

El término “Identificación de Procesos” fue adoptado en la década de los 60 en el ámbito de los especialistas de control automático, puede ser definido como la obtención de la estructura y los parámetros de un modelo matemático que reproduce con suficiente exactitud, para los fines deseados de control automático, las características dinámicas del proceso objeto de estudio[21].

La identificación experimental de un proceso consiste en estimular (con alguna señal conocida) la variable de entrada y, a partir del análisis de la respuesta del proceso, determinar el modelo matemático del mismo.

3.2.1. Métodos de identificación de sistemas [22].

Para clasificar estos métodos es necesario y de gran utilidad hacerlo teniendo en cuenta el tipo de modelo obtenido, estos se clasifican en:

- Métodos no paramétricos: facilitan la obtención de modelos no paramétricos del sistema, algunos de estos métodos son: análisis de la frecuencia transitoria,

análisis de la respuesta en frecuencia, análisis de la correlación, análisis espectral, etc.

- Métodos paramétricos: proporcionan la obtención de modelos paramétricos, estos requieren la elección de una viable estructura del modelo, de un criterio de ajuste de parámetros y también de los parámetros que mejor ajustan el modelo a los datos experimentales.
- Métodos de identificación (off-line): son utilizados en aquellas aplicaciones en que no precise un ajuste continuado del modelo, se realiza la identificación previa de la planta, considerándose que la validez de los parámetros alcanzados no se verá alterada con el paso del tiempo.
- Métodos de identificación (on-line): los parámetros se van actualizando continuamente a partir de los nuevos datos de entrada-salida obtenidos durante la evolución del proceso. Estos métodos son muy utilizados en sistemas de control adaptativo.

3.2.2. Métodos de obtención de modelos.

Para conocer el comportamiento de un sistema en condiciones determinadas y ante unas determinadas entradas, es posible recurrir a la experimentación sobre dicho sistema y a la observación de sus salidas. En muchos casos la experimentación puede resultar compleja o incluso imposible de llevar a cabo en procesos reales, por lo que es necesario que se trabaje con un modelo que se aproxime a la realidad. Básicamente, un modelo es una herramienta que permite predecir el comportamiento de un sistema sin necesidad de experimentar sobre el sistema real.

Para el diseño de un controlador continuo o discreto, sea a través de técnicas clásicas o en variables de estado, demanda de un modelo de la planta que va ser controlada, y que además caracterice su comportamiento dinámico. El modelo facilita al proyectista estimar y validar mediante simulación la corrección de los parámetros del controlador, obteniéndose una respuesta que satisfaga las especificaciones pretendidas.

Son tres los métodos primordiales para lograr el modelo de un sistema [21]:

- Analítico: se basa en las relaciones físico-químicas del proceso por identificar esbozando ecuaciones de balance de masa, de energía, etc.; conduciendo a

modelos complejos y no lineales que deben ser sometidos a procesos de simplificación y linealización. El inconveniente primordial de este enfoque consiste en que se requiere conocimientos muy especializados sobre la tecnología del proceso y no siempre están disponibles.

- Experimental: el más inmediato y el que puede lograr resultados a más corto plazo. Las señales manipuladas con más frecuencia son los escalones y las llamadas secuencias binarias pseudo-aleatorias. También se ha intentado con rampas, sinusoides, impulsos y otras. La limitación más importante de esta solución es la necesidad de implantar perturbaciones indeseables en el proceso que normalmente chocan con la resistencia de los operadores. En situaciones ideales, el experimento de identificación debería hacerse contando con una computadora conectada en línea con el proceso, pero en la práctica, en muchas ocasiones, es necesario basarse en observaciones periódicas de las variables y el procesamiento fuera de línea de los datos.
- Rekursivo: Se basa en una u otra modificación del método de mínimos cuadrados. Asume que una estructura fija del modelo consiste casi siempre en una ecuación de diferencias lineales. Lo particular es que se parte de una estimación inicial, generalmente arbitraria, de los parámetros del modelo que se va actualizando y mejorando con cada nueva información obtenida. Este tipo de identificación está concebida fundamentalmente para usarse dentro de un esquema de control adaptable, también por razones de conveniencia práctica, se ha utilizado para obtener modelos para estudios de simulación. Como los datos que se utilizan tienen generalmente la forma de secuencias discretas de mediciones de las variables del proceso, los modelos que se identifican son también de naturaleza discreta.

3.2.3. Metodología para realizar una correcta identificación [22].

Con vista a la identificación de sistemas para la obtención de la estructura y los parámetros del modelo matemático, se empleará una metodología que comprende las siguientes etapas:

1. Diseño experimental y su ejecución: En esta primera etapa es necesario decidir el tipo de señal de excitación, la dependencia entre las variables, el mejor período para la adquisición de datos y la cantidad de datos necesarios.
2. Pre-procesamiento de los datos: En esta etapa es preciso observar y reparar los datos erróneos, aplicar algún tipo de filtro para eliminar posibles ruidos, eliminar “*offsets*” y analizar la autocorrelación y la correlación cruzada de las mediciones.
3. Determinación de la estructura del modelo: En esta etapa es fundamental definir el tipo de modelo a utilizar: continuos o discretos, lineales o no lineales, etc. Además, es necesario un procedimiento para determinar el orden del modelo.
4. Estimación de los parámetros del modelo: Esta etapa está muy relacionada con la anterior, en ella se presenta el problema de decidir el método o métodos de estimación de parámetros que se va a utilizar para calcular el valor de los mismos. En general se puede escoger entre dos técnicas distintas: en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia.
5. Validación del modelo: Es la etapa en la que debe preguntarse si el modelo identificado es suficientemente representativo del proceso estudiado y se debe definir un criterio para evaluar la calidad. Generalmente se dispone de varios modelos candidatos y debe escogerse uno de ellos basándose en algún criterio.

Independientemente del objetivo de la identificación, es necesario tener siempre en cuenta que existe una distancia considerable entre un modelo matemático, por sofisticado que este sea, y el proceso real. Por lo que hay que realizar un uso cauteloso del modelo resultante de una identificación y tener siempre presente que la realidad es mucho más compleja que cualquier modelo.

3.2.4. Identificación del proceso de temperatura en los selladores de la máquina.

La identificación del proceso de temperatura puede hacerse por medio del análisis de diferentes señales, tales como: señal escalón, ruido blanco, secuencia binaria pseudoaleatoria, proceso autoregresivo de media móvil y suma de sinusoides. Para este proceso también hay que tener en cuenta los supuestos del modelo, condiciones en las que se desarrolla el mismo. En el caso de la identificación, para la obtención del modelo

de variación de la temperatura en los selladores de la máquina, se tiene en cuenta que se desarrolla a temperatura ambiente y no hay perturbaciones externas.

3.2.4.1. Recolección de los datos.

La máquina encelofanadora en la cual se llevará a cabo el proceso de identificación no cuenta con ningún sistema que permita la adquisición de los datos, solamente presenta un indicador de las temperaturas de los selladores. Todo el proceso se realizará manualmente.

Se acordó recurrir como señal de estímulo al sistema, un paso escalón, la señal más simple que se puede utilizar para la identificación. Esta se aproxima, por ejemplo, a la apertura o cierre súbitos de una válvula, un cambio rápido de tensión o corriente que alimenta a algún tipo de actuador eléctrico, etc. En la práctica, vale acotar, que una señal de este tipo puede lograrse de forma aproximada.

Esta señal tiene como ventaja que se puede generar de forma sencilla y que en la mayoría de los casos el tiempo de experimentación es relativamente corto.

Como desventaja se puede decir que el paso escalón introduce una alteración brusca en el comportamiento del sistema, lo que no siempre puede ser permitido en los procesos industriales.

Para lograr estimular el proceso fue necesario desconectar el controlador, con lo cual queda anulado su efecto sobre el sistema.

Inmediatamente con el proceso en su estado inicial donde la temperatura medida es la del ambiente que rodea la máquina, se aplicó un paso escalón (0 a 220V) que permite la variación de temperatura en la resistencia e inmediatamente se comenzó la recolección de datos, una muestra cada 2 segundos, la cual finalizó al establecerse la temperatura en la resistencia de los selladores. Las variaciones de la temperatura en las resistencias eléctricas oscilaron de 35 °C hasta 174 °C aproximadamente.

3.2.4.2. Análisis de los datos obtenidos.

Durante el experimento la señal excitadora provocó un cambio de estado en la variable temperatura y hasta que esta se establece en un nuevo estado, por lo que la señal de entrada cumple con la condición de ser persistente.

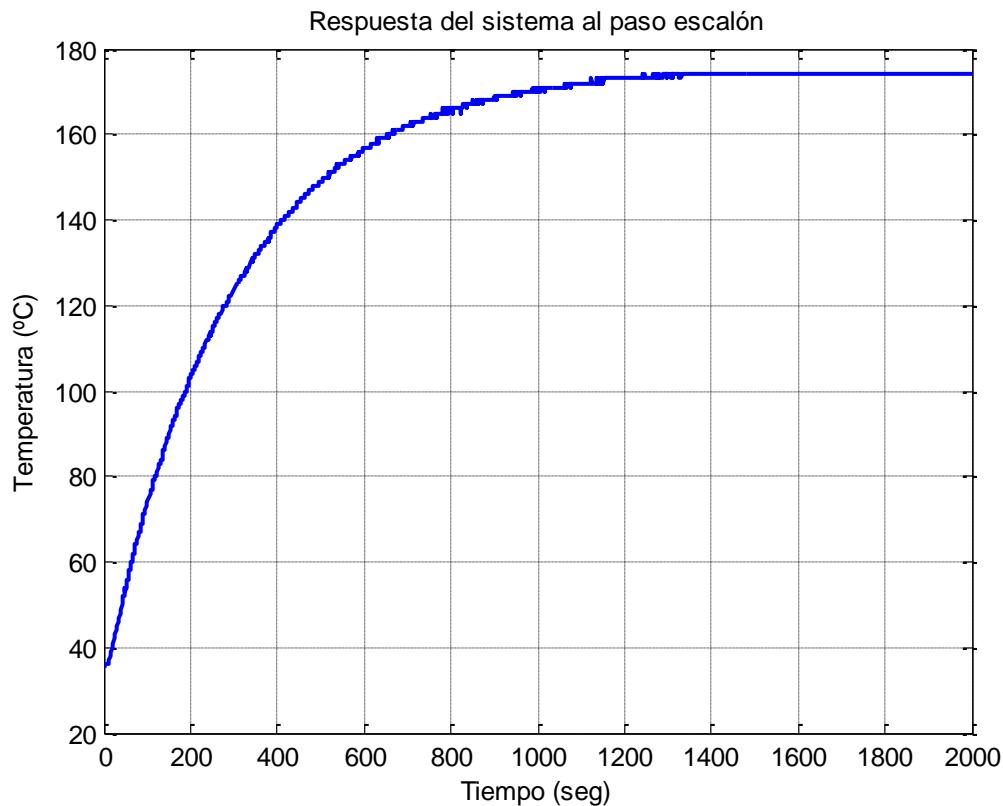


Figura 3.1: Gráfica de la respuesta del sistema al paso escalón.

Una vez obtenidos los datos se deben validar dichos datos para ver si contienen la cantidad de información como para obtener un buen modelo que describa al proceso, en correspondencia con los objetivos de la identificación. El primer paso es el análisis de los datos obtenidos para ver posibles errores en las mediciones que estén fuera de lo común, es decir que físicamente no son posibles o explicables.

Análisis del ruido y filtrado de la señal

Dentro de este proceso se debe analizar si la señal de salida presenta ruidos o desplazamientos o tendencias que puedan entorpecer el análisis y obtener el modelo del proceso, así como determinar su estabilidad. Con la ayuda de la transformada rápida de

Fourier (ver Anexo 18.1) se logra esto, como se puede observar en el gráfico mostrado a continuación.

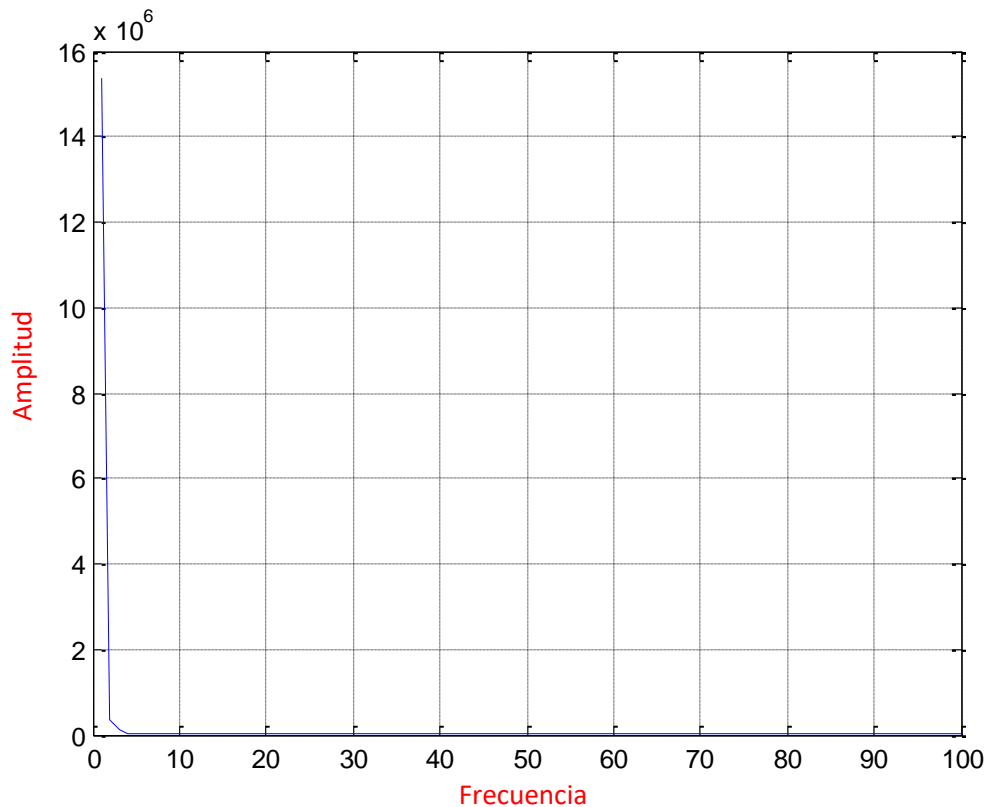


Figura 3.2: Gráfica de análisis de la densidad espectral para la señal de salida.

En el gráfico mostrado se puede apreciar que, en las muestras de la señal de salida, toda la energía está concentrada alrededor de las bajas frecuencias. Como no se observa la presencia de ruido no es necesaria la utilización de filtros.

Análisis de Autocorrelación

También se realizó un tratamiento a los datos de salida para ver cómo se correlaciona con ella misma desplazada en determinados instantes de tiempo, con el objetivo de verificar que el período de muestreo seleccionado fue el correcto. La autocorrelación de los datos de entrada no se realizó porque la señal es un paso escalón y este tipo de señal brinda poca información.

La autocorrelación (ver Anexo 18.2) de las variables es posible observarla mediante los criterios de control clásicos y a través de las gráficas.

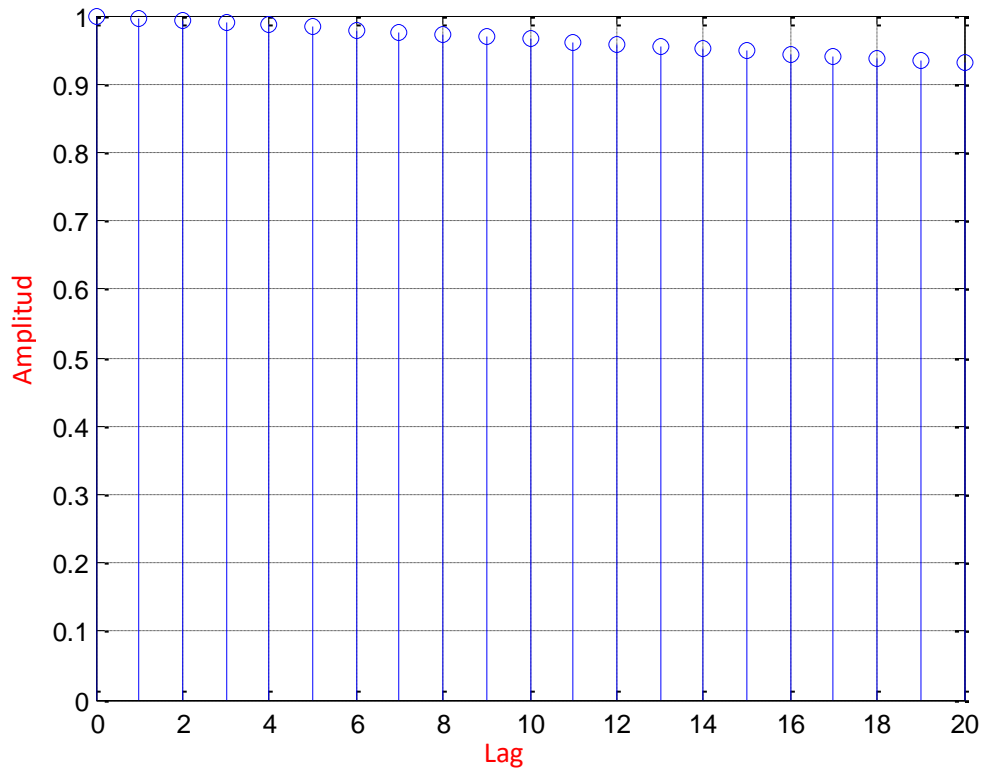


Figura 3.3: Gráfica de autocorrelación de los datos de salida.

Como se aprecia, los valores de la autocorrelación para la salida del sistema se mantienen por encima de 0.8, o sea, que la señal se encuentra bien correlacionada consigo misma, por lo que se puede afirmar que no hay pérdida de información y por tanto la selección del período de muestreo es correcta.

Análisis de correlación cruzada

La correlación cruzada (ver Anexo 18.3) ofrece una medida de la relación entre dos o más variables. El grado de correlación se cuantifica a través del coeficiente de correlación que puede variar entre -1 (perfecta correlación negativa) y +1 (perfecta correlación positiva).

Mediante el análisis de la correlación cruzada entre las variables de entrada y de salida, es posible tener una noción acerca del retardo existente en el sistema, o sea, se puede conocer cuántos instantes de muestreo demora en responder la salida del proceso que se estudia ante una variación en la entrada [9].

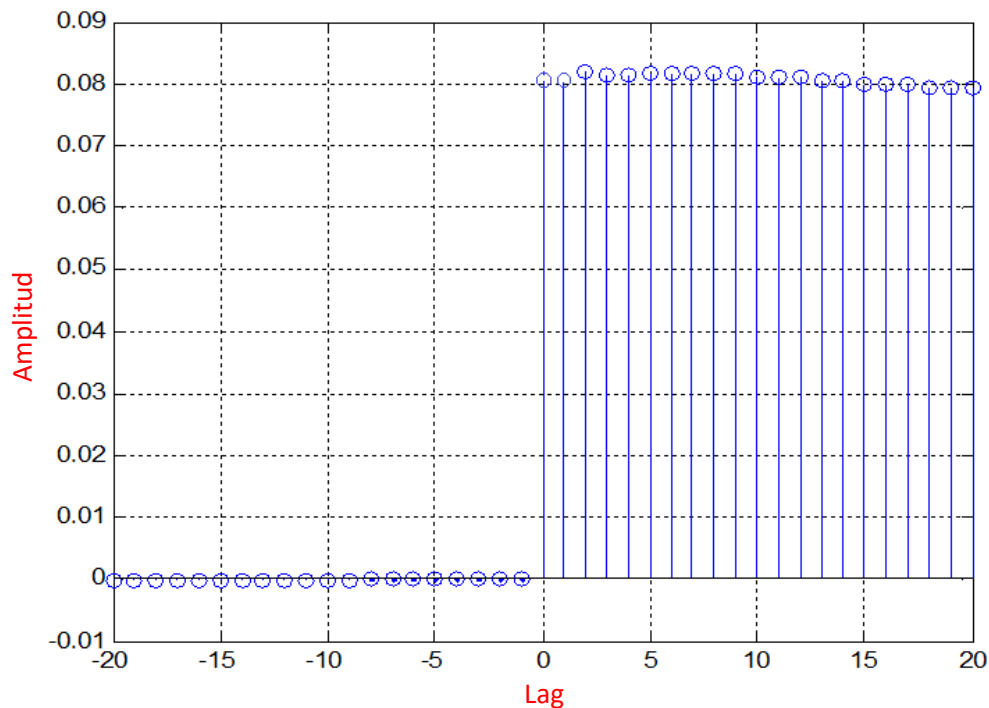


Figura 3.4: Gráfica de correlación cruzada de los datos de entrada con los de salida.

Haciendo referencia a lo antes mencionado, se puede apreciar en la figura anterior que la mayor correlación es de 0.083 y se obtiene a los 3 instantes de muestreo y como el período de muestreo es de 2 segundos, entonces la estimación del tiempo de retardo es de 6 segundos aproximadamente.

3.2.4.3. Obtención de la estructura del modelo.

El modelo matemático está definido por su estructura (tipo, orden, pasos de retardo) y por sus parámetros (coeficientes desconocidos). Hay varias formas de catalogar los modelos matemáticos: deterministas o estocásticos, dinámicos o estáticos, de parámetros distribuidos o concentrados, lineales o no lineales, y de tiempo continuo o tiempo discreto. Los tipos de modelos que se pretenden obtener serán:

- Deterministas: expresan la relación entre la entrada y la salida mediante una ecuación exacta.
- Dinámicos: las salidas evolucionan con el tiempo tras la aplicación de una determinada entrada.
- De parámetros concentrados: sin considerar la variación en función del espacio.

- Lineales: bajo determinadas consideraciones o puntos de operación se pueden realizar aproximaciones lineales.
- Invariantes en el tiempo: donde los parámetros del sistema no varían en el tiempo.
- Continuos: donde las variables evolucionan continuamente en el tiempo y pueden tomar cualquier valor en un rango dado.

Se puede decir por simple inspección de la respuesta transitoria que se asemeja a la respuesta de un sistema de primer orden con retardo, sin embargo, en la búsqueda de un mejor control y veracidad del modelo se analizan estructuras de modelos de primer y segundo orden con retardo.

En la Figura 3.5 se muestran las estructuras de los modelos obtenidos, así como los porcentos de ajuste de estos con respecto a la curva seleccionada para la identificación.

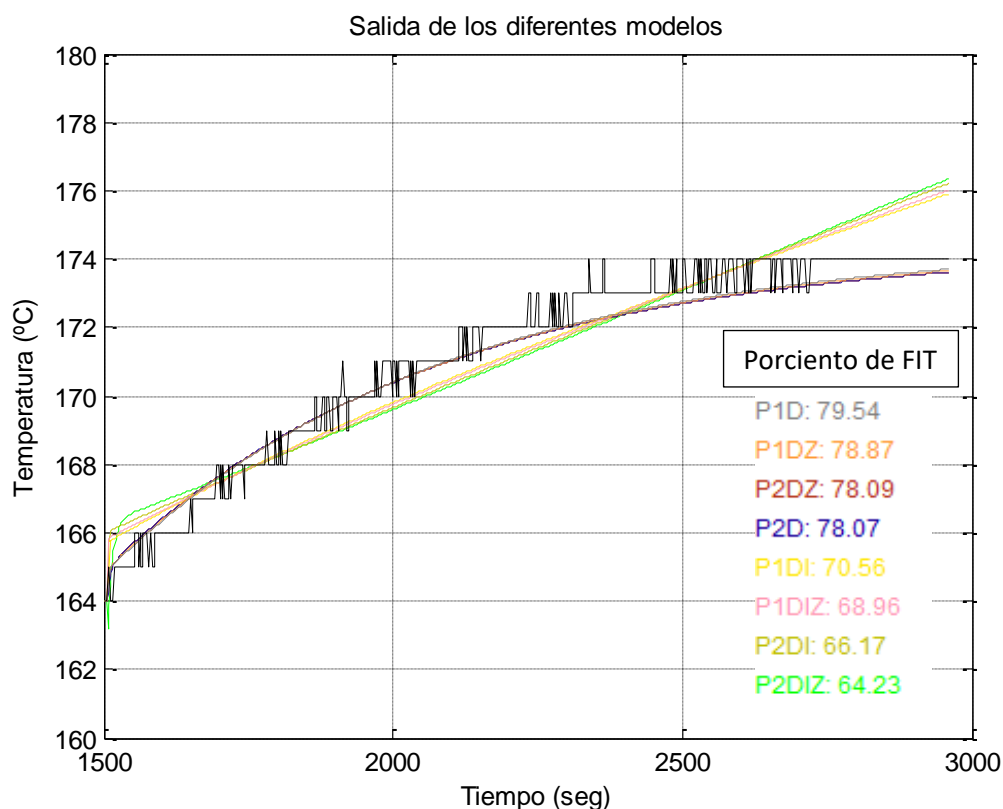


Figura 3.5: Porciento (%) de ajuste FIT para los modelos obtenidos.

Los modelos obtenidos presentan ajustes (FIT) mayores que un 64 %, como se nota en la figura anterior, aunque no todos representan buenas aproximaciones del proceso real, ya que la literatura asegura que un FIT por encima de un 75% para la industria es el adecuado.

Analizando los modelos obtenidos y llegando a un punto medio entre los criterios anteriores se determina la selección de un modelo de primer orden con retardo (P1D), el cual presenta el mayor porcentaje de ajuste a la curva real del proceso de variación de temperatura. La decisión es tomada basándose en la idea de obtener un modelo lo suficientemente representativo del proceso y a la vez lo más sencillo posible.

3.2.4.4. Estimación de los parámetros del modelo.

Para obtener el modelo es preciso realizar varias pruebas con varias estructuras de modelos. Al finalizar el modelo que más se corresponda con la dinámica del proceso es el que describirá el comportamiento temporal de dicho proceso y el que se utilizará en la etapa de diseño del sistema de control y ajuste de los parámetros del controlador.

Los vectores de entrada y salida (tensión y temperatura, respectivamente) del proceso se muestran en la Figura 3.6.

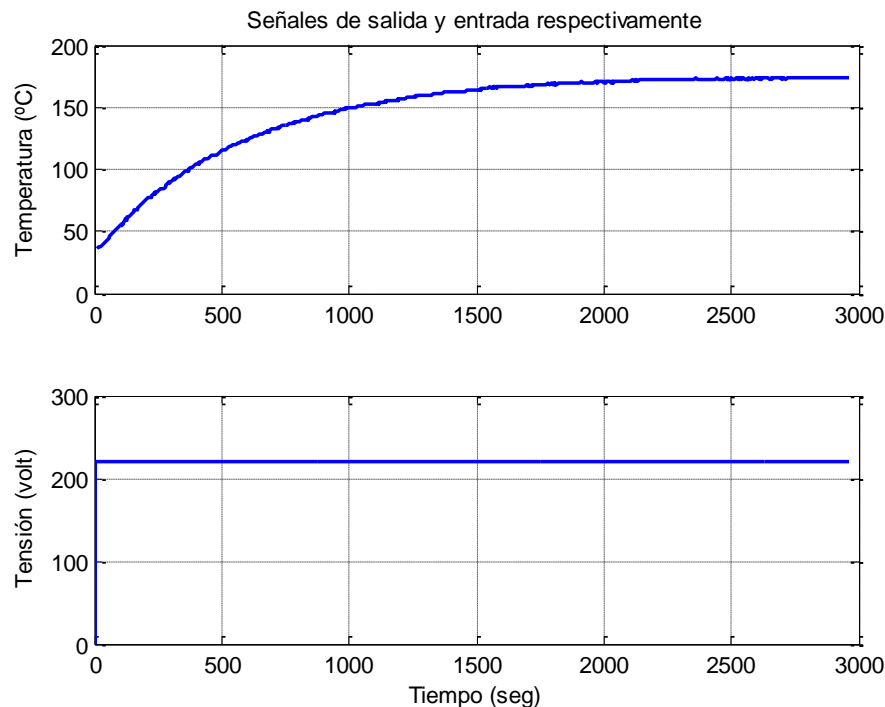


Figura 3.6: Vectores de entrada y de salida.

Los parámetros del modelo seleccionado son los siguientes:

$$K = 0.79307$$

$$T_1 = 577.19 \text{ seg}$$

$$T = 6 \text{ seg}$$

Expresándolo en forma de función transferencial queda como (9):

$$G_p(s) = \frac{0.79307 \cdot e^{-6s}}{(577.19s+1)} \quad (9)$$

3.2.4.5. Validación del modelo.

Una vez que la estructura ha sido escogida, el próximo paso consiste en seleccionar un modelo particular de dicha estructura, es decir, determinar un conjunto particular de parámetros para dicha estructura. Concluido este paso el modelo hallado puede llegar a ser el mejor disponible, sin embargo, más importante aún es saber a ciencia cierta si dicho modelo es suficientemente bueno para hacer uso del mismo. El proceso de evaluación de un modelo para determinar si es el apropiado, es conocido como validación del modelo [23].

Cuando un modelo ha sido obtenido a partir de datos experimentales, es necesario examinar el mismo para conocer en qué medida el modelo obtenido se ajusta a las mediciones realizadas [24].

Para asegurar esto, es necesario la realización de algunas pruebas basadas en la comparación de datos y criterios estadísticos (ver Anexo 18.4), estas son:

1. Error de simulación (ES): Se define como la relación que existe entre la suma de la media del error (\bar{e}) y su varianza ($\text{var}(\mathbf{e})$), y la media de la salida real (\bar{y}) y su varianza ($\text{var}(\mathbf{y})$). Como criterio práctico se considera que, a escala industrial, para un error de simulación (e_{sim}) menor que el 2.5%, el modelo es aceptable. Este error se puede calcular mediante la expresión (10):

$$e_{\text{sim}} = \frac{(\bar{e} + \text{var}(\mathbf{e}))}{(\bar{y} + \text{var}(\mathbf{y}))} \quad (10)$$

2. Porcentaje de aproximación (FIT): El índice de mejor ajuste o FIT por su nombre en inglés, es una comparación entre los datos medidos y estimados con respecto

al promedio de los datos medidos. Su resultado es un porcentaje que llega hasta 100%, donde 100% indica un ajuste perfecto y 0% muestra que, en promedio, los datos medidos duplican a los datos estimados. Puede tomar valores negativos, en cuyo caso la capacidad de réplica del modelo estimado es nula. Esta puede expresarse como (11).

$$\text{FIT}[\%] = 100 * (1 - (\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|) / (\sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}|)) \quad (11)$$

3. Coeficiente de determinación o proporción de la varianza (VAF): Este índice brinda una medida porcentual de la coincidencia entre dos señales, en este caso, entre la salida medida y la salida del modelo, y se define como (12):

$$\text{VAF} = \left(1 - \frac{\text{MSE}}{\text{std}(y)^2}\right) \quad (12)$$

4. Error de predicción final (EPF): Es utilizado para determinar si el modelo ha logrado atrapar las propiedades dinámicas de interés en el sistema, por lo cual es recomendable ampliar el horizonte de predicción más allá de las constantes de tiempo fundamentales del sistema. Como criterio práctico se considera aceptable que la media del error de predicción final sea menor que el 10% de la media de la salida real. Queda expresada como (13).

$$e_{pf} = \frac{(\bar{e})}{y + \text{var}(y)} \quad (13)$$

La Tabla 3.1. muestra los criterios antes explicados, referidos al modelo escogido.

Tabla 3.1: Índices de validación.

ES (%)	FIT (%)	VAF (%)	EPF (%)
0.1457	95.4147	99.7898	0.9087

Con el análisis de los índices de validación del modelo se puede afirmar que el modelo queda validado y puede ser usado como una aproximación bastante exacta del modelo real. Ya sea para cualquier análisis del comportamiento del proceso ante una perturbación, como para el diseño del sistema de control.

3.2. Diseño de la estrategia de control.

La implementación adecuada de un algoritmo para el control automático de un proceso productivo es un factor esencial para mejorar la productividad y la competitividad.

Una vez obtenido el modelo del proceso, el diseño del controlador se facilita considerablemente, ya que se tiene un conocimiento real de la dinámica del sistema. La selección del controlador y la determinación del algoritmo de control se realizan atendiendo a las necesidades del proceso y a las características del comportamiento obtenido con cada acción de control. El algoritmo seleccionado deberá ser el más simple capaz de satisfacer los requisitos deseados, los parámetros de la respuesta transitoria del sistema: pico máximo, tiempo de subida, tiempo de establecimiento y error de estado estacionario [25].

El control clásico empleado durante décadas en los sistemas de control ha ganado la popularidad de los fabricantes y la confianza de los usuarios. Como líder en este campo se encuentran el regulador PID (Proporcional Integral Derivativo) y el PI (Proporcional Integral), ocupando un lugar especial en la industria [22].

A pesar de que los avances tecnológicos que acontecen en nuestros tiempos requieren de complejos algoritmos de control, en las empresas no dejan de existir lazos simples en los que un control PID resulta suficiente. Otra de las razones por la que los modernos algoritmos de control no han conseguido desplazar al PID está en su robustez, la excelente respuesta del sistema y su flexibilidad. Un controlador PID es uno de los métodos de control más frecuentes y precisos dentro de la regulación automática. Como su nombre lo indica está dividido en tres acciones: proporcional, integral y derivativa. El peso de la influencia que cada una tiene en la suma final viene dado por la constante proporcional, el tiempo integral y el tiempo derivativo respectivamente [26].

El controlador PID utiliza el algoritmo general mostrado en la expresión (14):

$$u(t) = K(e(t)) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (14)$$

Donde:

u: señal de control

e: señal de error

K: ganancia proporcional

T_i: tiempo integral

T_d: tiempo derivativo

La señal de control es así una suma de tres términos: el término-P (que es proporcional al error), el término-I (que es proporcional a la integral del error), y el término-D (que es proporcional a la derivada del error).

Acción proporcional: Una ventaja de esta estrategia de control es que requiere del cálculo de un parámetro (ganancia **K**) y, además, genera una respuesta bastante instantánea. Sin embargo, el controlador posee una característica indeseable, que se conoce como error de estado estacionario. En el caso del control proporcional puro, la ley de control general se reduce a (15):

$$u(t) = K(e(t)) + u_b \quad (15)$$

la acción de control es simplemente proporcional al error de control. La variable u_b es una polarización o un reset. Cuando el error de control $e(t)$ es cero, la señal de control toma el valor $u(t) = u_b$.

Acción integral: La acción integral elimina el error de estado estacionario, pero se obtiene una mayor desviación del valor de consigna, la respuesta es más lenta y el periodo de oscilación es mayor que en el caso de la acción proporcional. Siguiendo el algoritmo general se tiene que la señal de control viene dada por (16):

$$u(t) = K(e(t)) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (16)$$

Acción derivativa: La acción derivativa da una respuesta proporcional a la derivada del error (velocidad de cambio del error). Añadiendo esta acción de control a las anteriores, se elimina el exceso de oscilaciones. No elimina el error de estado estacionario. Se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error; (si es constante, solamente actúan los modos: proporcional e integrar). Siguiendo el algoritmo general se tiene que la señal de control viene dada por la expresión (17):

$$u(t) = K(e(t)) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (17)$$

3.3.1. Cálculo teórico de los parámetros del controlador.

En un sistema de control regulatorio, hay dos aspectos esenciales para el diseño, en primer lugar, determinar qué controlador emplear, o sea, que algoritmo de control es el adecuado para el sistema y los requerimientos impuestos; y en segundo lugar ajustar el controlador, es decir, determinar el valor adecuado de los parámetros del mismo [27].

Una vez seleccionado el algoritmo de control se determinan los valores convenientes de los parámetros de este, o sea, hacer el “ajuste” o la “sintonía” del controlador.

Existen diversos métodos para el ajuste de los controladores, pero en general se derivan de 3 métodos básicos [28]:

- Método de las oscilaciones permanentes.
- Método de las oscilaciones amortiguadas.
- Método de la curva de reacción.

Método de la curva de reacción.

En los métodos de las oscilaciones permanentes y amortiguadas se aplica el estímulo al sistema en lazo cerrado. En el método de la curva de reacción se abre el lazo y se aplica el estímulo al proceso directamente.

Inicialmente se aplica el paso escalón y posteriormente se extraen de la respuesta al paso escalón los valores necesarios: t_2 , t_1 , ΔC_s ; los cuales se muestran en la Figura 3.7.

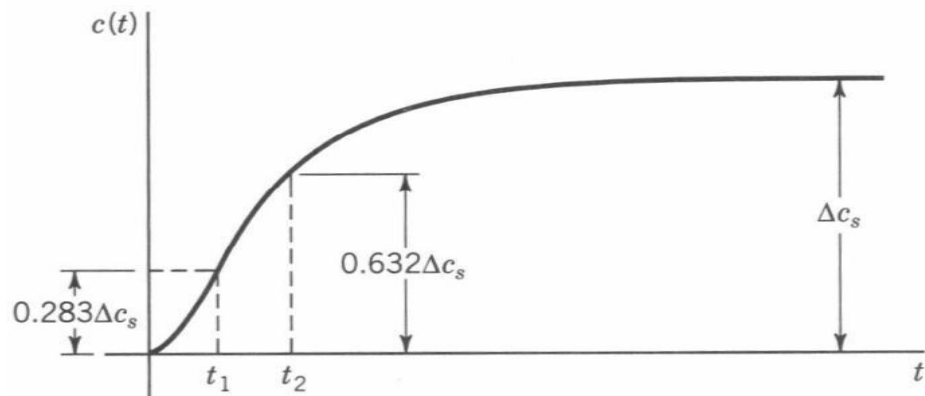


Figura 3.7: Datos necesarios del método de la curva de reacción.

La respuesta del sistema en lazo abierto brindó una respuesta como se muestra en la Figura 3.8.

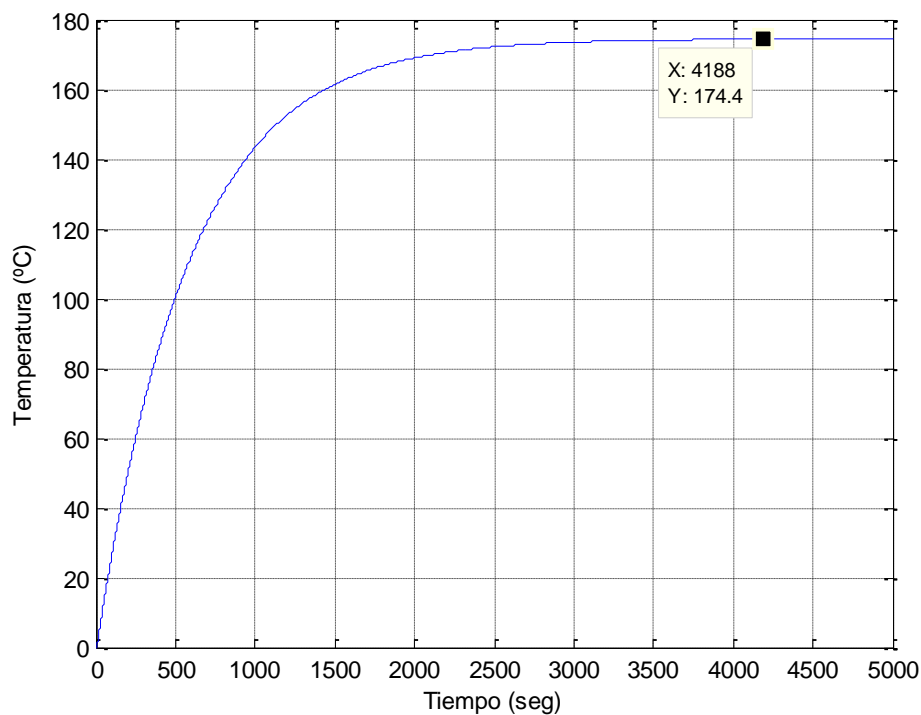


Figura 3.8: Respuesta del sistema en lazo abierto.

Para el cálculo de los parámetros se utilizaron las expresiones (18), (19), (20):

$$\tau = 3/2 * (t_2 - t_1) \quad (18)$$

$$L = t_2 - \tau \quad (19)$$

$$K = \Delta C_s / \text{Amplitud del paso} \quad (20)$$

Luego, con estos valores se halla mediante la utilización de la Tabla 3.2 los valores de sintonización del controlador.

Tabla 3.2: *Tabla de valores de sintonización.*

Control	Kc	Ti	Td
P	τ/KL	-	-
PI	$0.9\tau/KL$	$L/0.3$	-
PID	$1.2 \tau/KL$	$L/2$	$L/0.5$

Los valores calculados son los siguientes:

Para PID:

$$Kc = 7.3039$$

$$Ti = 9.4612$$

$$Td = 37.8448$$

Para PI:

$$Kc = 5.4779$$

$$Ti = 63.0747$$

Al utilizar estos datos teóricos para parametrizar el controlador se obtuvieron las siguientes gráficas, Figura 3.9 para el PID y Figura 3.10 para el PI.

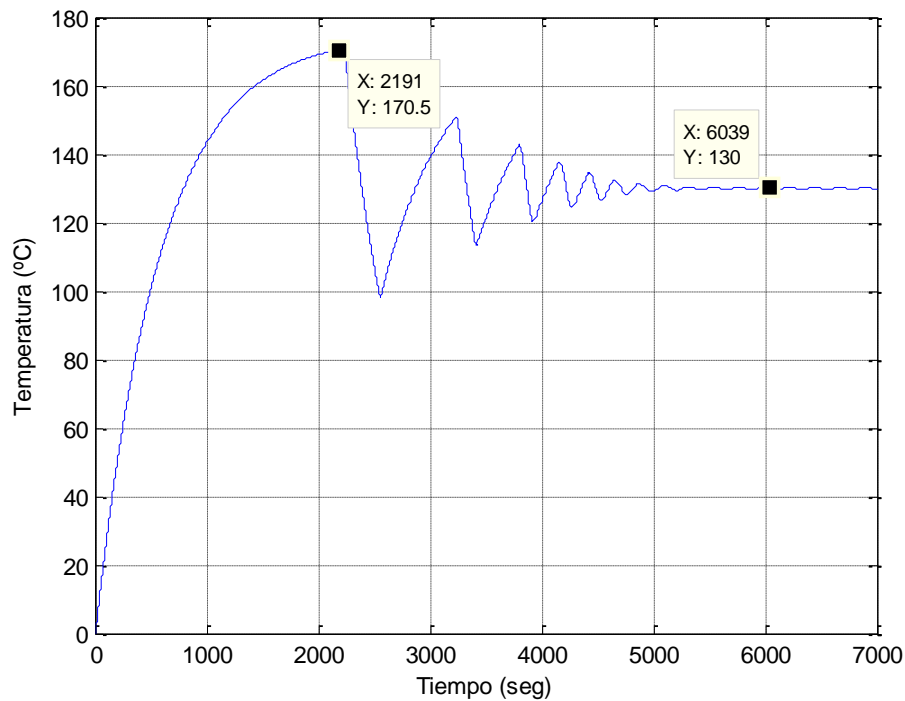


Figura 3.9: Respuesta del sistema ante un paso en la referencia, con controlador PID.

En la figura se observa que el sistema presenta una respuesta estable con un tiempo de establecimiento ($T_s = 5000$ s) y el porcentaje de pico máximo (%MP= 31.15%).

Es importante destacar que la temperatura es una variable de dinámica lenta por esto el tiempo de establecimiento está por los 5000 s.

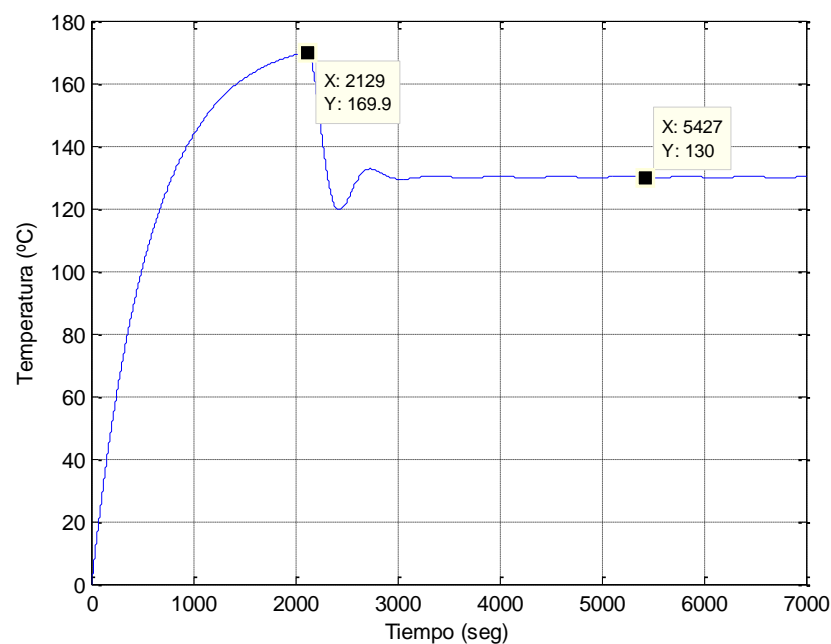


Figura 3.10: Respuesta del sistema ante un paso en la referencia, con controlador PI.

Este sistema muestra una respuesta estable con un tiempo de establecimiento ($T_s=3000$ s) y un porcentaje de pico máximo ($\%MP= 30.69\%$).

Debido a que ambos sistemas tienen un porcentaje de pico máximo por encima del 20%, no cumplen con los requerimientos de diseño y para obtener una respuesta más adecuada es necesario realizar un ajuste fino.

3.3.2. Ajuste fino de los parámetros del controlador.

Para realizar el ajuste fino de los parámetros del controlador se utilizó el método de optimización de parámetros (Anexo 18.5). Para realizar dicho ajuste es necesario imponer las condiciones de la respuesta temporal del sistema ante un paso escalón en la referencia. Estas condiciones las impone el diseñador del lazo de control y consiste en establecer por donde se quiere que pase la respuesta temporal del sistema.

En la figura se muestra el esquema desarrollado para determinar los parámetros del controlador.

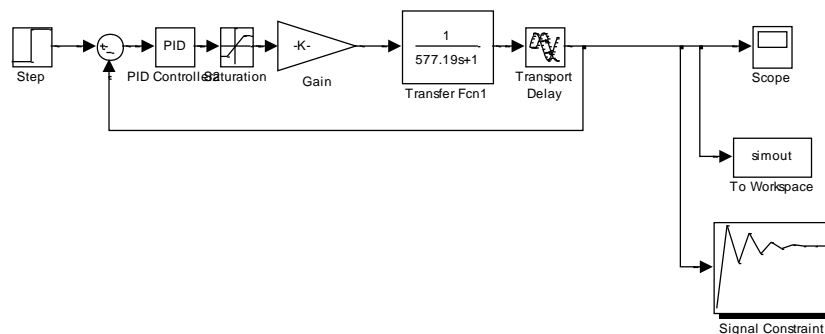


Figura 3.11: Diagrama en bloques del sistema.

Después de sucesivas pruebas, se obtuvieron los siguientes resultados. Los parámetros de los controladores son:

<u>Para PID:</u>	$P = 8.9069003$	<u>Para PI:</u>	$P = 38.7660$
	$I = 0.4915$		$I = 0.0040$
	$D = 1.1053005$		

En las Figuras 3.12 y 3.13. se muestra el resultado obtenido al emplear los datos del ajuste fino para un controlador PID y PI, respectivamente, en el lazo de control ante un paso escalón en la referencia de 130 °C.

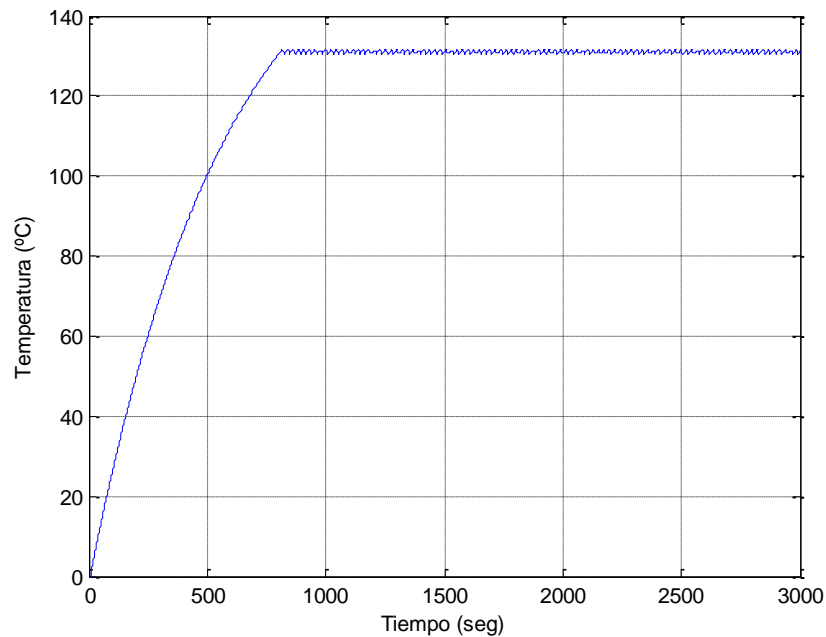


Figura 3.12: Gráfica de la respuesta temporal del sistema con la acción de control *PID*.

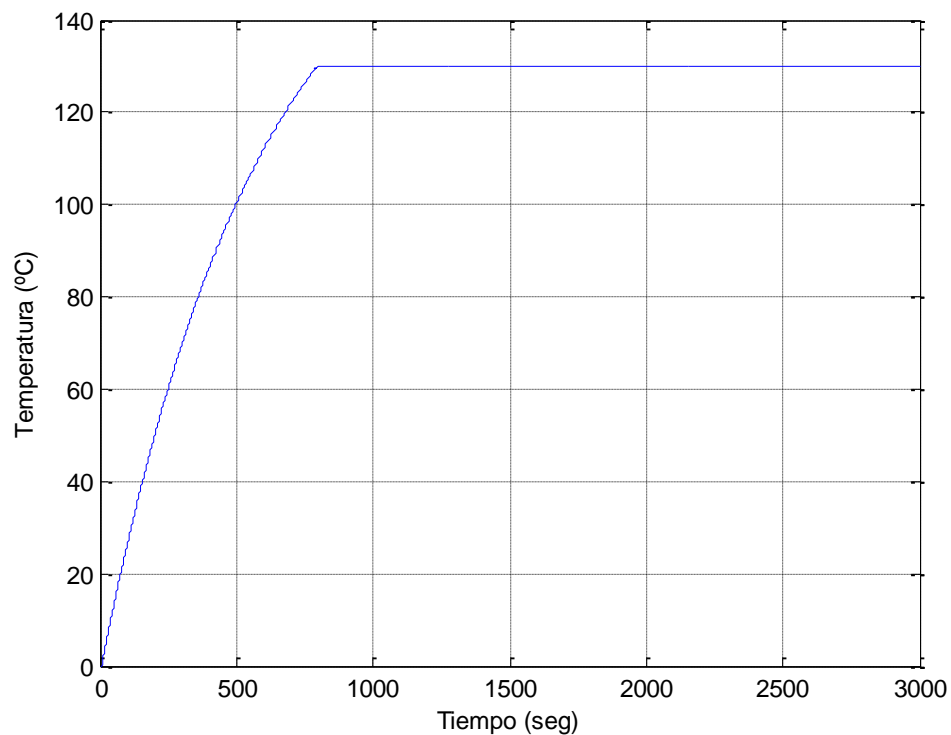


Figura 3.13: Gráfica de la respuesta temporal del sistema con la acción de control *PI*.

3.3.3. Análisis de la respuesta temporal.

El análisis de la calidad del control se realiza mediante la simulación del sistema en lazo cerrado, obteniendo los parámetros de respuesta del sistema en el dominio del tiempo continuo para los valores de ajuste encontrados (Anexo 18.6). Los parámetros fundamentales para su evaluación son:

Tiempo de subida o levantamiento (T_r): Es el tiempo que transcurre entre el 10% y el 90% del valor de la referencia.

Tiempo de establecimiento (T_s): Es el tiempo necesario para que la respuesta se mantenga dentro de un intervalo de $\pm 2\%$ del valor de la referencia.

Porcentaje de pico máximo (%MP): Es el máximo valor de la respuesta por encima del valor de referencia.

Error de estado estacionario (Eee): Es la diferencia entre el valor de salida del sistema y el valor de referencia.

Tabla 3.3: Resultados de los parámetros de la respuesta.

Controlador	T_r (s)	T_s (s)	%MP	Eee
PID	605	775	0.49	0
PI	596	760	0	0

Haciendo un análisis de los parámetros de la respuesta temporal y las gráficas del sistema, ante ambos controladores, se puede apreciar que el controlador PI es ligeramente más efectivo que el PID, contando con un mejor tiempo de establecimiento y de subida.

3.3.4. Análisis de la respuesta del proceso ante una referencia variable.

Utilizando señales de referencia variable para el sistema como se describe en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Intervalos de tiempo donde la señal varía.

Tiempo de simulación	Valor de la señal de entrada
0 – 900 s	100 °C
900 – 1920 s	57.5°C
1920 – 2900 s	87°C
2900 – 3000 s	114.5 °C

En las Figuras 3.14 y 3.15 se muestra la referencia variable del lazo (en rojo) y la salida del sistema con acción de control PID y PI respectivamente ante dicha referencia (en azul). Se puede apreciar que el sistema es capaz de seguir dicha referencia, siendo ésta, otra prueba del desempeño satisfactorio de los reguladores seleccionados.

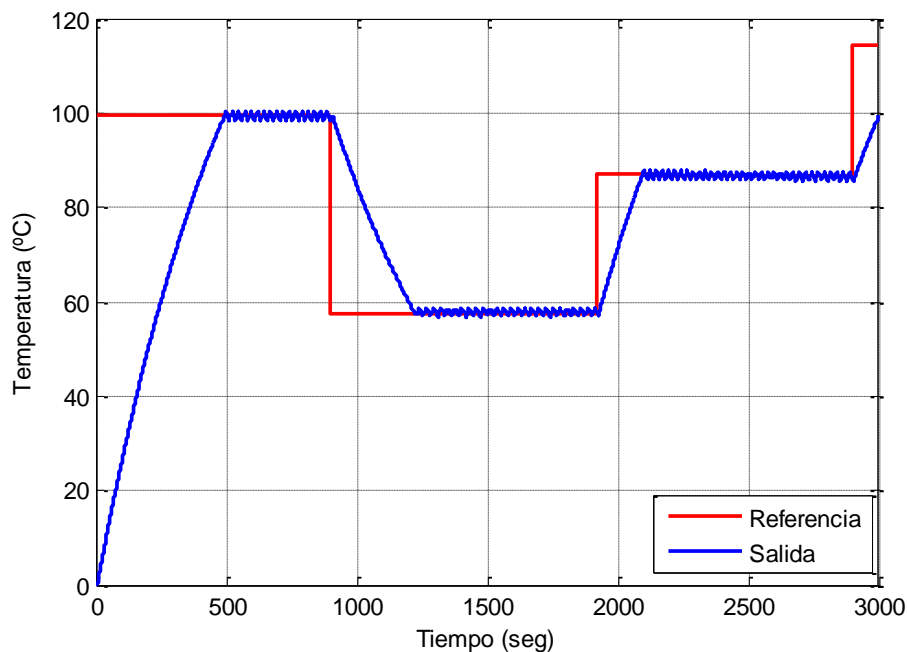


Figura 3.14: Respuesta del sistema ante una referencia variable con acción de control PID.

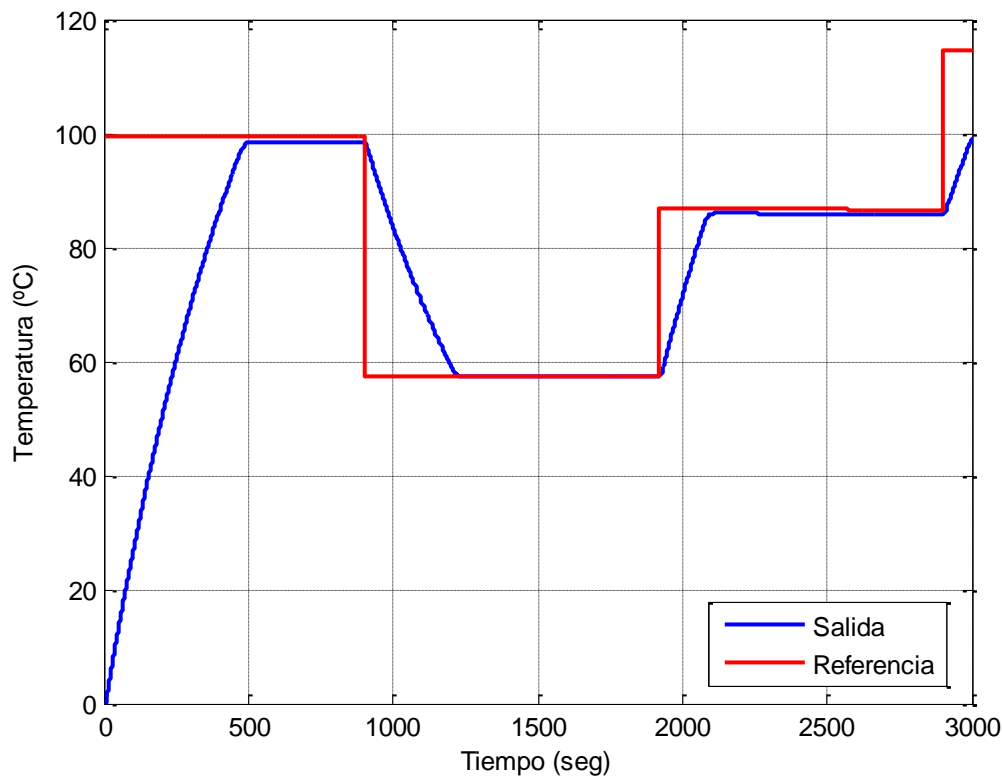


Figura 3.15: Respuesta del sistema ante una referencia variable con acción de control *PI*.

Se puede concluir que el controlador PI seleccionado brindó una respuesta conveniente en el lazo de control ante las pruebas a las que fue sometido y por tanto queda validado para su uso en el lazo de control de la temperatura de sellado de la máquina.

3.4. Conclusiones.

En el capítulo se abordaron temas referentes al proceso de identificación, sus métodos y pasos a seguir para su concepción. Se profundiza en los tipos de modelos existentes y en las técnicas empleadas para su obtención. Se determinó y validó la estructura del modelo que describe el comportamiento de variación de la temperatura, además se compararon diferentes modelos, seleccionando el más sencillo que satisfaga nuestros requisitos. Se realiza el diseño del controlador por el método de la curva de reacción, después se le realiza un ajuste fino y se comparan las respuestas del sistema con controladores PI y PID, seleccionando el PI por ser más efectivo.