



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

CÁTEDRA DE SISTEMAS DE CONTROL 1

Año : 2024

TRABAJO PRÁCTICO FINAL

“Control de temperatura de horno electrico para metales”

Alumnos:

Gil Cernich, Manuel

Ramirez, Valentin José

Docentes:

Ing. Adrián Agüero

Ing. Juan Pedroni

Introducción.....	4
Definición del sistema.....	4
Análisis del sistema.....	6
Modelado matemático para la planta.....	6
Modelado matemático para el sensor.....	8
Modelado matemático para el actuador.....	10
Función de transferencia.....	10
Análisis de estabilidad.....	10
Análisis temporal.....	11
Polos dominantes.....	11
Análisis de modelo.....	11
Especificaciones de diseño.....	12
Diseño de controlador.....	13
Simulación.....	13
Conclusiones.....	13
Bibliografía.....	13
Anexo.....	13

Introducción.

El tratamiento térmico de materiales, es esencial en la modificación de propiedades en aceros y aleaciones metálicas, para ello utilizamos los hornos eléctricos. En este contexto, exploramos la implementación de un controlador en un horno industrial, con el objetivo de lograr tratamientos térmicos óptimos o fundición de metales mediante una calibración meticulosa del sistema.

Definición del sistema.

El tratamiento térmico es un conjunto de procesos industriales que consisten en modificar las propiedades físicas, mecánicas y/o químicas de los materiales, principalmente aceros y aleaciones metálicas. Entre estos tratamientos térmicos se encuentran el revenido, templeado, recocido, forjado, esmaltado sobre metales, enlozado, entre otros. Estos tratamientos térmicos pueden hacerse mediante el uso de hornos eléctricos, en nuestro caso un **HM-1** de la marca nacional **SIMCIC**.

El horno tiene unas resistencias que a medida que circula corriente estas se calientan, generando así el aumento de temperatura dentro del horno y permitiendo el uso para distintas aleaciones metálicas. Para lograrlo, es necesario cumplir ciertas condiciones específicas, por lo que el control de la temperatura ocupa un rol fundamental garantizando la calidad, eficiencia y seguridad de los mismos.

Los niveles de entrada y salida del sistema son constantemente medidos de forma de tener una señal de error a través de un sistema de lazo cerrado. Esta señal es la que luego es enviada al controlador para poder estar dentro de un rango cercano al setpoint.

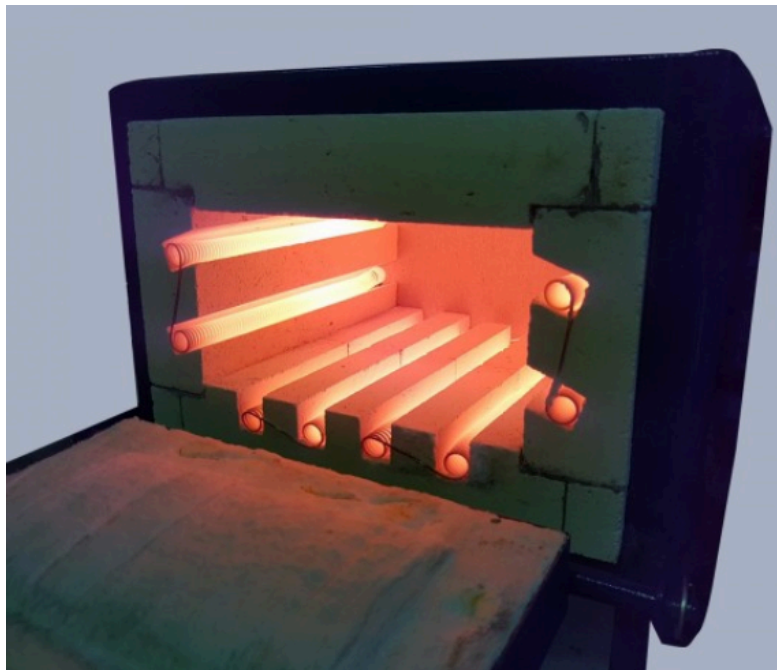


Fig 1. Horno modelo HM-1 en funcionamiento.

Nuestro objetivo es controlar la temperatura interna de un horno eléctrico de uso industrial usando una termocupla o termopar como sensor. Esto es posible mediante un variador de potencia del equipo que es estimulado por el microcontrolador, el cual tiene la tarea de transformar señales digitales provenientes del microcontrolador a señales analógicas, para este caso variará la corriente que atraviesa las resistencias del horno.

La función para la que hacemos uso de un controlador en este sistema es que este controle que el horno esté calibrado en una temperatura específica para poder llevar a cabo correctamente la fundición o tratamiento del metal. Así entonces, lo que vamos a controlar mediante este sistema de control es la temperatura en grados centígrados del interior de nuestra “cocina” eléctrica.

Como **actuador** vamos a utilizar un relé de estado sólido (SSR) el cual a diferencia del relé electromecánico utiliza semiconductores para la conmutación de estados y no contactos físicos. El relé de estado sólido recibe una señal modulada PWM la cual nos ayuda a variar la potencia del sistema a partir del ancho de pulso recibido.

Para medir la variable de salida, en grados kelvin, usaremos como sensor una termocupla, que estará conectada al controlador. El controlador es quien nos brinda el valor concreto del setpoint, que es la temperatura que el usuario necesita. Este setpoint se ingresa de manera digital al microcontrolador, que se encarga de comparar el valor obtenido por el sensor con el setpoint.

Todos los sistemas poseen algún tipo de perturbación que afecta a nuestro sistema, como pueden ser filtraciones en el aislamiento del horno, variaciones en la alimentación o variaciones en la carga térmica del horno.

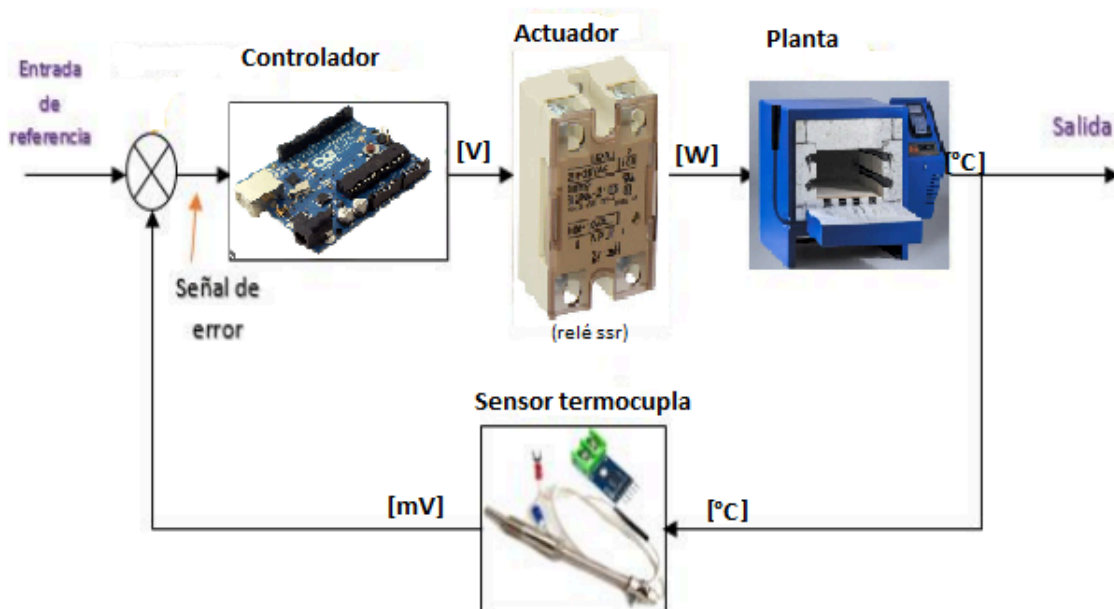


Fig 2. Diagrama de bloques del sistema.

En un sistema de control de temperatura para un horno, las linealidades y no linealidades se refieren a la relación entre las entradas y las salidas del sistema. La linealidad implica que la respuesta del sistema es proporcional a las variaciones en la entrada, mientras que la no linealidad indica que esta relación no es proporcional.

El comportamiento de las resistencias utilizadas para calentar se puede decir que mantienen una relación lineal si la corriente suministrada es lineal, pero también a su vez pueden variar su propio valor resistivo al variar su temperatura, por esta razón el estudio del comportamiento no lineal puede resultar complejo. Para este trabajo consideramos un sistema sin perturbaciones externas y lineal.

Análisis del sistema.

Para el análisis de diseño del sistema, vamos a determinar el modelado matemático de la planta, del sensor y del actuador.

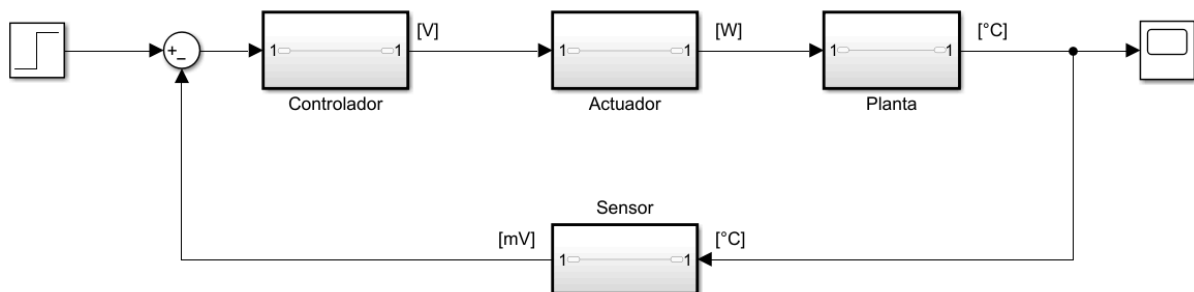


Fig 3. Diagrama de bloques del sistema.

Modelado matemático para la planta

Para la planta, haremos uso de la analogía termoeléctrica de la ley de ohm, donde el voltaje equivale a la temperatura, la corriente a la velocidad de transferencia de calor y la resistencia en ohms es igual a la resistencia térmica [K/W]. Con el fin de simplificar los cálculos, supondremos que el aislamiento es perfecto y que la temperatura del ambiente es igual a cero $T_a = 0$.

Equivalente Eléctrico			Equivalente Térmico		
Parámetros	Símbolo	Unidad	Parámetros	Símbolo	Unidad
Corriente	i	A	Calor generado	q	W
Voltaje	u	V	Temperatura	θ	°C
Resistencia	R	Ω	Resistencia	R_{th}	°C/W
Capacitancia	C	F	Capacitancia	C_{th}	J/°C
Nodo de referencia	Gnd	V	Temperatura ambiente	θ_{amb}	°C

Fig 4. Tabla de equivalencias térmicas y eléctricas.

Para calcular el volumen del horno, usaremos sus dimensiones internas, que están dadas por el fabricante. Para el horno **SIMCIC HM-1**^[41], estas son:

- Ancho: 190 [mm]
- Alto: 110 [mm]
- Fondo: 230 [mm]

El horno está constituido por una capa de ladrillos refractarios **K28** y una placa aislante de **Perlitemp**. De la manera que está compuesto, podemos afirmar que las resistencias térmicas de los materiales están en serie. La suma de las inversas de las conductividades térmicas de cada uno nos dará la resistencia térmica total de nuestro circuito:

Conductividad térmica a ~1200 °C:

- Ladrillos K28 ^[42]: $0.38 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$
- Perlitemp ^[43]: $0.14 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$

Las unidades que vamos a usar para trabajar con el modelo matemático, a partir del análisis que hace el ingeniero Katsuhiko Ogata en su libro “Ingeniería de control moderna” para sistemas térmicos, son las siguientes:

- **H** = Razón de transferencia de calor $\left[\frac{Kcal}{seg} \right]$
- **T** = Temperatura $[^{\circ}C] = [K]$
- **R** = Resistencia térmica $\left[\frac{K}{Kcal} \right] = \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$
- **λ** = Conductividad térmica $\left[\frac{W}{m \cdot ^{\circ}C} \right] = \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$
- **m** = Masa de aire dentro del horno [Kg]
- **C** = Capacitancia térmica $\left[\frac{Kcal}{^{\circ}C} \right] = \left[\frac{J}{K} \right]$
- **c** = Calor específico del aire a temperatura ambiente $\left[\frac{Kcal}{Kg \cdot ^{\circ}C} \right] = \left[\frac{J}{Kg \cdot K} \right]$

Y, a partir de la analogía termoelectrónica^[44] presentada en la figura 4, podemos representar nuestro modelo térmico como un modelo eléctrico, cuyo circuito equivalente es el siguiente:

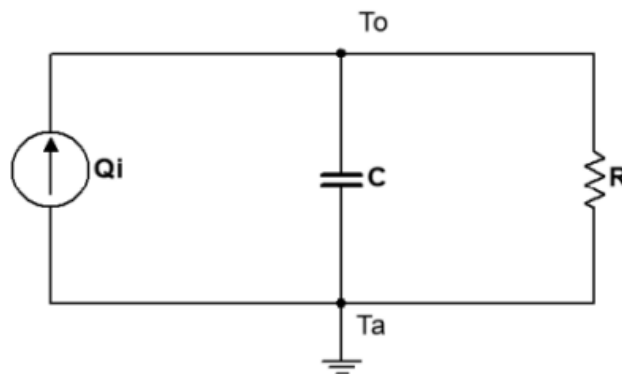


Fig 5. Circuito eléctrico del sistema.

Teniendo en cuenta los componentes y variables de nuestro circuito podemos saber que:

$$R_{th} = \frac{1}{\lambda \text{ de ladrillo } K28} + \frac{1}{\lambda \text{ de Perlitemp}} = \frac{1}{0.38} + \frac{1}{0.14} = 9.77 \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$$

$$m = Vol \text{ interior} \cdot Densidad \text{ aire} = 0.004807 [m^3] \cdot 1.225 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] = 0.00588 [Kg]$$

$$C = m \cdot c = 0.005888575 [Kg] \cdot 1006 \left[\frac{J}{kg K} \right] = 0.001413258 \left[\frac{J}{K} \right]$$

Aplicando la ley de Kirchhoff de corrientes a nuestro circuito:

$$-H + iC + iR = 0$$

$$-H + C \frac{d(T_o - T_a)}{dt} + \frac{T_o - T_a}{R_{th}} = 0$$

Como suponemos $T_a = 0 [^{\circ}C]$:

$$-H + C \frac{dT_o}{dt} + \frac{T_o}{R_{th}} = 0$$

A partir del uso de la transformada de Laplace, podemos encontrar la función de transferencia de la planta:

$$H(s) = C \cdot s \cdot T_o(s) + \frac{T_o(s)}{R_{th}}$$

$$\rightarrow H(s) = T_o(s) \left[Cs + \frac{1}{R_{th}} \right]$$

Para finalmente obtener la función de transferencia de la planta:

$$\frac{T_o(s)}{H(s)} = \frac{R_{th}}{R_{th} \cdot C \cdot s + 1} = \frac{0.1688}{s + 0.01728}$$

Esta función de transferencia representa como la temperatura del horno, la cual es la salida, varía respecto a la entrada que es la energía emitida por los resistores que producen el calentamiento. El modelo es propicio para nuestro trabajo y se demuestra que la función es adecuada para el problema.

La unidad de trabajo de H es energía sobre unidad de tiempo, de lo que se encarga el controlador y actuador modificando la potencia que llega a las resistencias, aumentando y reduciendo la temperatura interna del horno según el caso.

Modelado matemático para el sensor

Una termocupla es un sensor de temperatura que funciona en base al principio de la termoelectricidad, se constituye por dos metales distintos unidos en sus extremos. Cuando existe un cambio de temperatura en la unión cálida en relación a la unión fría, se crea un cambio de voltaje a través del circuito. Este cambio de voltaje se mide y se utiliza para calcular la temperatura en la unión cálida. Como la máxima que alcanza nuestro horno es de 1200 °C vamos a utilizar una termocupla tipo S para tener un rango de más y no trabajar sobre el límite.

Calibración	Elemento Positivo	Elemento Negativo	Rango de temperatura habitual
Tipo T	Cobre	Constantan	-200°C~0°C
Tipo T	Cobre	Constantan	0°C~370°C
Tipo J	Hierro	Constantan	0°C~760°C
Tipo E	Cromel	Constantan	0°C~870°C
Tipo K	Cromel	Alumel	0°C~1260°C
Tipo N	Nicrosil	Nisil	0°C~1260°C
Tipo S	90% Platino / 10% Rhinate	Pt 100%	0°C~1480°C
Tipo R	87% Platino / 13% Rhinate	Pt 100%	0°C~1480°C
Tipo B	70% Platino / 30% Rhinate	94% Platino / 06% Rhinate	870°C~1700°C

Fig 6. Tipos de Termocuplas y rangos.

Las termocuplas de tipo S son dispositivos intercambiables y económicos que emplean un conector estándar. Poseen una sensibilidad aproximada de 0,01 mV/°C y una precisión de ± 0.7 °C. Sin embargo, estos valores no son suficientes para una lectura adecuada por parte del usuario de este sistema.

Para convertir estos valores en una variable más legible, se implementará un bloque amplificador, específicamente un amplificador de ganancia 100, para ajustar la salida del sensor. De esta manera, cuando la temperatura alcance los 1000°C, el controlador registrará una lectura de 1 mV, un valor más manejable para el comparador y el sistema en general. La señal a la salida del comparador será procesada por nuestro microcontrolador.

A continuación, se presenta la función de transferencia del sensor:

$$G_{Sensor} = 0.01 \left[\frac{mV}{K} \right]$$
$$G_{Amplificador} = 100$$

Además, la multiplicación de estos dos bloques nos dará como resultado el lazo de realimentación, la cual será

$$V(s) = 1 \left[\frac{mV}{K} \right]$$

Modelado matemático para el actuador

Como especificamos antes, el actuador del sistema es un relé de estado sólido, el cual no agrega ni un cero ni un polo al sistema al ser un dispositivo de conmutación electrónica.

Tampoco presenta ningún tipo de ganancia, este solo abre o cierra el circuito “prendiendo” o “apagando” nuestras resistencias que generan el calor.

$$G_{Actuador} = 1$$

Función de transferencia

Con el análisis anterior podemos llegar a una función de transferencia de lazo abierto en la cual tenemos tres bloques en serie de Controlador, Actuador y Planta.

$$FdTLA = G_{Actuador} \cdot Planta$$
$$FdTLA = \frac{0.1688}{s + 0.01728}$$

Como nuestro sistema es realimentado, es decir es un lazo cerrado por el cual mediante un sensor controlamos nuestro error y la variable para llegar a un setpoint específico, como analizamos anteriormente, se agrega un amplificador de 100 para poder ajustar la salida a un nivel más cómodo, finalmente nuestro diagrama de bloques quedaría de la siguiente manera.

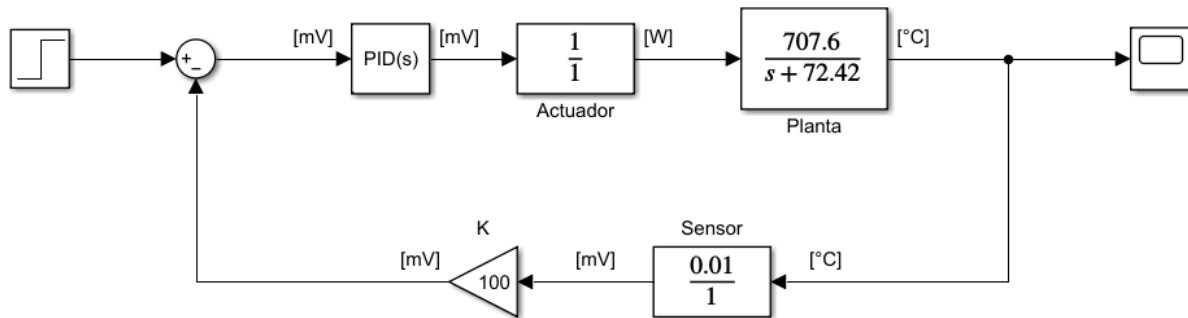


Fig 7. Diagrama de bloques.

$$FdTLC = \frac{FdTLA}{1+K*FdTLA} = \frac{0.1688}{s+0.1861}$$

Análisis de estabilidad

El análisis de estabilidad es un estudio que se realiza en sistemas para determinar cómo responden a variaciones en los parámetros, un sistema se considera estable si la salida permanece acotada para una entrada acotada.

Para el análisis utilizaremos el criterio de **Routh-Hurwitz**, este permite determinar en cual subplano del plano complejo están localizadas las raíces del denominador de la función de transferencia de un sistema. Si todas las raíces están en el semiplano izquierdo el sistema es estable.

$$\begin{array}{l} s^1 \quad 1 \\ s^0 \quad 0.1861 \end{array}$$

Al no tener coeficientes con valores negativos podemos concluir que el sistema será estable. También podemos decir que a partir de la ecuación característica nuestro sistema solo tiene un polo y este es negativo, por lo que el sistema será estable.

Otro método para analizar la estabilidad de un sistema es el **Lugar de Raíces**. El método debe su nombre al lugar geométrico de las raíces de la ecuación característica del sistema en lazo cerrado conforme la ganancia varía de cero a infinito. Es decir, a partir de nuestra función de lazo abierto, utilizaremos el lugar de raíces para observar cómo a partir de la variación de la ganancia “K” podemos modificar el valor de los polos de nuestro sistema.

$$FdTLA = \frac{0.1688}{s + 0.01728}$$

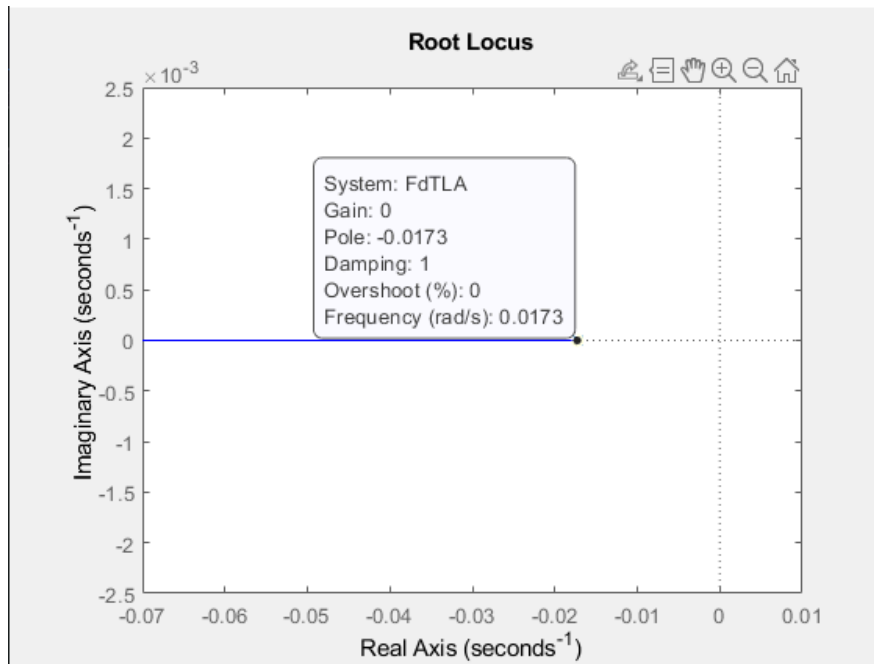


Fig 8. Gráfico de lugar de raíces en matlab.

Podemos ver que la función a lazo abierto tiene un solo polo en -0.0173, el cual se cancela con un cero en el infinito.

Análisis temporal

El análisis temporal en un sistema se refiere al estudio de cómo evoluciona dicho sistema con respecto del tiempo. En nuestro sistema nos ayuda a entender como la temperatura del horno cambia en respuesta a las diferentes condiciones, como por ejemplo una entrada escalonada.

Nuestra función de transferencia de lazo cerrado es de primer orden, ya que no tiene polos en el origen siendo **tau** nuestra constante de tiempo **R*C** y **K** nuestra ganancia. tomando la forma de:

$$G(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} = \frac{0.9071}{5.374 \cdot s + 1}$$

El tiempo de establecimiento de un sistema se refiere al tiempo que tarda un sistema en alcanzar y mantenerse dentro de un rango específico del valor final después de una perturbación o cambio de entrada. Este valor podemos encontrarlo al 98% del valor de régimen, de ahí vienen los **4*tau**. Hablando de sistemas de primer orden, el tiempo de establecimiento se suele tomar a un valor de 5% del valor final.

Este valor es 4 veces **tau**, para este caso **4*5.37 = 21 [s]**. Es decir que el sistema tarda aproximadamente 21 segundos en llegar a su estado de establecimiento.

Polos dominantes

Los polos dominantes son aquellos polos de la función de transferencia que están más cerca del eje imaginario en el plano complejo. Estos polos son los que tienen mayor

influencia en la respuesta transitoria del sistema, son los que determinan en mayor medida el comportamiento y respuesta del sistema. Para nuestro caso tenemos un único polo situado en **-0.186**.

El hecho de tener un único polo, nos dice que es un sistema de primer orden, donde este se caracteriza por tener una respuesta transitoria que es una función exponencial del tiempo, lo que significa que la respuesta del sistema cambia rápidamente al inicio y luego se estabiliza gradualmente sin sobrepasamientos.

Análisis de modelo

Utilizando el matlab podemos graficar nuestra función de transferencia al introducir una entrada escalón. Para este caso se le dará una entrada escalón de 1475 [K] haciendo referencia a la temperatura que el usuario quisiera alcanzar de 1200 [°C].

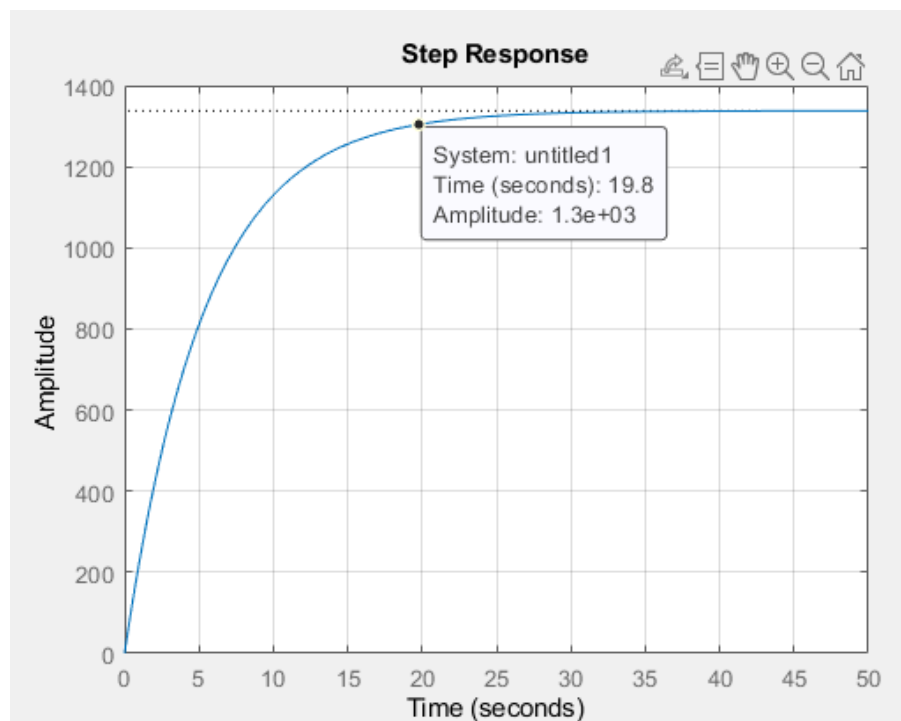


Fig 9. Respuesta escalón a la función de lazo cerrado

Podemos observar a partir de la figura 8 que aproximadamente a los 20 [s] el sistema llega a su valor de establecimiento, pero el valor de establecimiento está cerca de los 1300 [K] y no de los 1475 [K] buscados. Este error es el que buscaremos solucionar a continuación con un controlador PID, PD o PI dependiendo el análisis y los resultados que busquemos.

Error en estado estable

Para poder solucionar el error en nuestro valor de establecimiento para nuestro sistema de primer orden (Tipo 0), es necesario primero encontrar este error en estado estable. El mismo depende del tipo de entrada y el tipo de sistema, según el siguiente cuadro:

TIPO	0	1	2
e_p	$cte=1/(1+Kp)$	0	0
e_v	∞	$cte=1/Kv$	0
e_a	∞	∞	$cte=1/Ka$

Fig 10. Tabla de errores estado estable

Como nuestro sistema es de tipo de 0 ya que no tiene polos en el origen calcularemos el error para una entrada escalón unitario (e_p)

$$e_p = \frac{1}{1+Kp}$$

$$FdTLA = \frac{0.1688}{s + 0.01728}$$

$$Kp = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{0.1688}{s + 0.01728} = 9.77$$

$$e_p = \frac{1}{1+9.77} \cdot 100\% = 9.29\%$$

Por lo que tenemos un error en estado de régimen del 9.29%, el cual vamos a disminuir mediante la técnica de cancelación de polos dominantes, agregando un polo en el origen para convertir el sistema en uno de tipo 1, eliminando así el error en estado estacionario para una entrada de tipo escalón.

Especificaciones de diseño.

El error en estado estable es una medida de la precisión de un sistema de control en su funcionamiento en estado estacionario. Se define como la diferencia entre el valor deseado y el valor real de la salida de un sistema en el límite a medida que el tiempo tiende a infinito, es decir que es la diferencia entre la entrada y la salida del sistema, para una entrada definida cuando tiende a infinito.

Este análisis del error del estado estable es fundamental en el diseño de nuestro sistema ya que permite evaluar que tan bien nuestro sistema sigue una entrada dada, en nuestro caso una temperatura seteada. Cuando diseñamos un sistema las especificaciones del mismo se proporcionan en términos de comportamiento transitorio y error en estado estable, y el controlador que vamos a diseñar a continuación se diseña para que cumpla con estas especificaciones deseadas.

Como analizamos anteriormente al excitar nuestro sistema con una entrada escalón de 1475 [K] el mismo no responde de la manera que buscamos, si no que se estabiliza aproximadamente en 1335 [K], teniendo así un error del 9.5% en nuestro estado estable, que será posible mejorar cuando implementemos nuestro controlador.

$$\%error = \left| \frac{V1 - V2}{V1} \right| \cdot 100 = \left| \frac{1475 - 1335}{1475} \right| \cdot 100 = 9.5\%$$

El sobrepasamiento máximo es un parámetro que se refiere a cuanto se excede la respuesta de un sistema en su valor final de estado estable, es un indicador importante en el comportamiento transitorio, ya que un sobrepasamiento máximo muy grande puede indicar que el sistema es muy reactivo a cambios o puede llegar a producir fallas en nuestro sistema si este no soporta valores tan altos, y por el otro lado un sobrepasamiento máximo muy pequeño puede indicar que el sistema es más resistente a cambios.

En un horno eléctrico se busca minimizar el valor de sobrepasamiento para evitar que nuestra temperatura exceda el valor deseado ya que puede tener implicaciones en la eficiencia eléctrica o en el tratamiento del material. Sin embargo para nuestro caso el sistema es de orden uno, por lo cual no hay sobrepasamiento y no se llevará a cabo ningún análisis en este trabajo.

Diseño de compensador

Método de cancelación de polos dominantes:

Llegados a este punto, para cumplir el objetivo de lograr que el horno llegue a la temperatura deseada mediante el setpoint con exactitud y se mantenga en ese valor de régimen con un error en estado estable despreciable, vamos a implementar un compensador **PI**, mediante el método de cancelación de polos dominantes.

Hay que tener en cuenta que el uso de un compensador integral acarrea una respuesta inicial lenta y el controlador no empieza a ser efectivo hasta haber transcurrido un cierto tiempo, pero para nuestro caso igualmente es útil, ya que lo más importante en este proceso es que la temperatura en régimen sea lo más precisa posible e igual a la deseada para que el horneado sea correcto.

Como nuestra función de transferencia es de primer orden, el sobrepasamiento es nulo, por lo que no vamos a preocuparnos por ningún tipo de oscilación que pudiera provocar el compensador **PI**.

La ley de control PI nos da la fórmula:

$$PI(s) = Kp \frac{s + \frac{1}{Ti}}{s}$$

Donde **Kp** es la constante proporcional y **Ti** el tiempo de integración.

La función de transferencia a lazo abierto ahora es:

$$FdTLA2 = PI(S) \cdot FdTLA = Kp \frac{s + \frac{1}{Ti}}{s} \cdot \frac{0.1688}{s + 0.01728}$$

El valor del tiempo de integración lo elegimos de manera tal que cancele el polo de nuestra ecuación característica original, la cual tiene un único polo. Por lo tanto:

$$Ti = \left| \frac{1}{\text{pole}(FdTLA)} \right| = 57.8766$$

Por lo que nuestro compensador queda de la forma:

$$PI(s) = Kp \frac{s + \frac{1}{57.8766}}{s}$$

Para encontrar el valor de la constante proporcional **Kp**, hay que obtener la frecuencia natural no amortiguada **Wn** que debe tener el sistema analizando el trazado del lugar de raíces. Como es un sistema de primer orden, el tiempo de establecimiento está dado por:

$$Ts = 4\tau$$

$$\tau = \frac{1}{\xi * Wn}$$

Sabemos que el factor de amortiguamiento $\xi = 1$ por lo observado en el lugar de raíces:

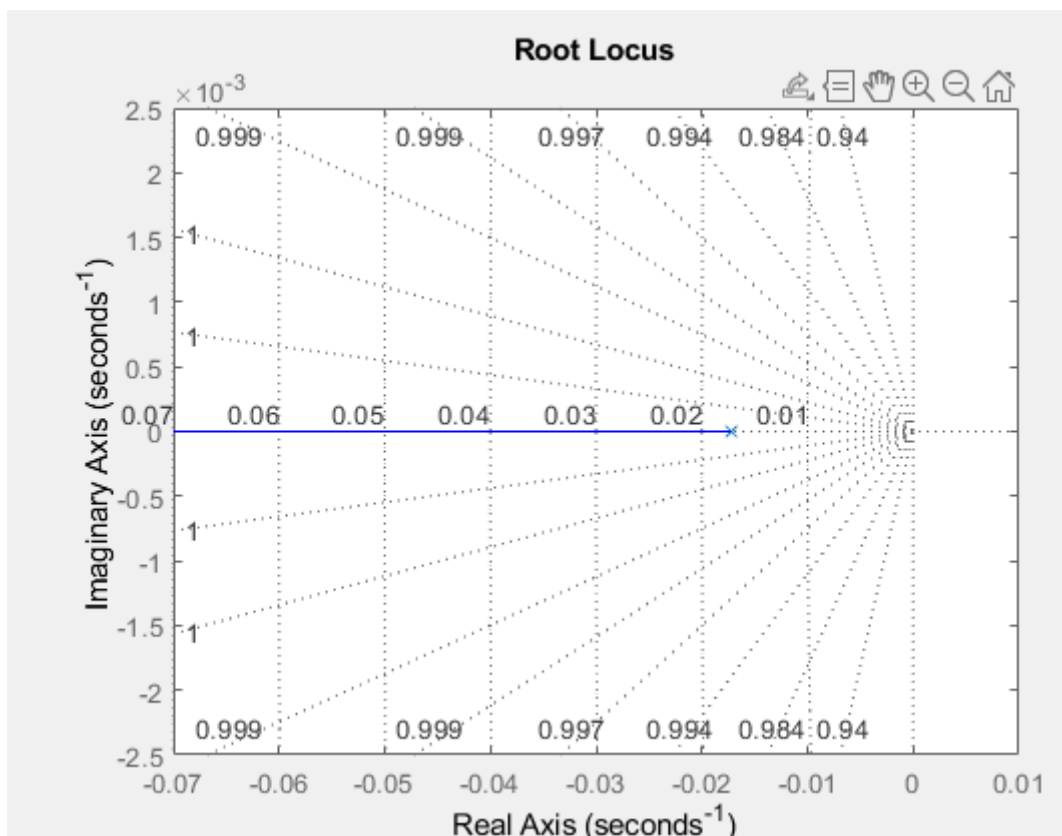


Fig 11. Lugar de raíces.

Por lo tanto si tenemos nuestro tau, el valor de establecimiento queda:

$$\tau = \frac{1}{W_n}$$

$$T_s = 4\tau = \frac{4}{W_n}$$

A partir de los valores normales que tarda un horno eléctrico de similares características en alcanzar los 1475 [°K], el tiempo de establecimiento es de 30 minutos, es decir, 1800 segundos.

Por lo tanto, encontramos la frecuencia no amortiguada **Wn**:

$$1800 = 4\tau = \frac{4}{W_n} \Rightarrow W_n = \frac{1}{450} = 0.0022222 \text{ [rad/s]}$$

Con este valor de **Wn**, buscamos en el lugar de raíces la semicircunferencia correspondiente a dicha frecuencia, así obtenemos la coordenada en el plano complejo que permita obtener la ganancia buscada, a partir del cumplimiento de la condición de módulo.

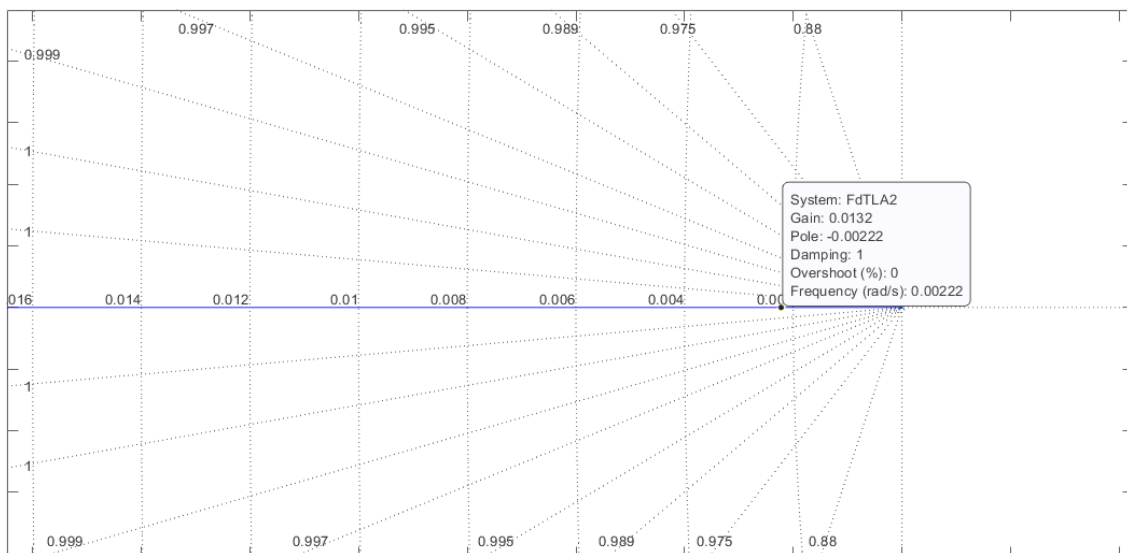


Fig 12. Lugar de raíces.

Con ese punto como referencia, planteamos la condición de módulo y obtenemos el valor de la constante proporcional:

$$K_p = \left| \frac{1}{G(s_1)} \right| = 0.0132$$

El compensador PI finalmente nos queda:

$$PI(s) = 0.0132 \cdot \frac{s + \frac{1}{57.8766}}{s}$$

Nuestro sistema a lazo abierto con controlador queda definido como:

$$FdTLA_{pi} = PI(S) \cdot FdTLA = 0.0132 \cdot \frac{s + \frac{1}{57.8766}}{s} \cdot \frac{0.1688}{s + 0.01728}$$

Definiendo así el sistema abierto con controlador:

$$FdTLA_{pi} = \frac{0.002222}{s}$$

Y el sistema cerrado con controlador como:

$$FdTLC_{pi} = \frac{0.002222}{s + 0.002222}$$

Sobre nuestra nueva función de transferencia con el controlador **PI**, también podemos volver a analizar el error en estado estacionario, para poder corroborar que nuestro error disminuyó del 9% original sin controlador a un valor igual o cercano a 0

$$e_p = \frac{1}{1 + Kp}$$

$$FdTLA = \frac{0.0022}{s}$$

$$Kp = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{0.0022}{s} = \frac{0.0022}{0} = \inf$$

$$e_p = \frac{1}{1 + \inf} \cdot 100 = 0\%$$

Logrando así, gracias al controlador, la respuesta deseada del sistema ante una entrada escalón, donde podemos verificar que el sistema cumple con todos los requerimientos y que nuestro objetivo fue cumplido:

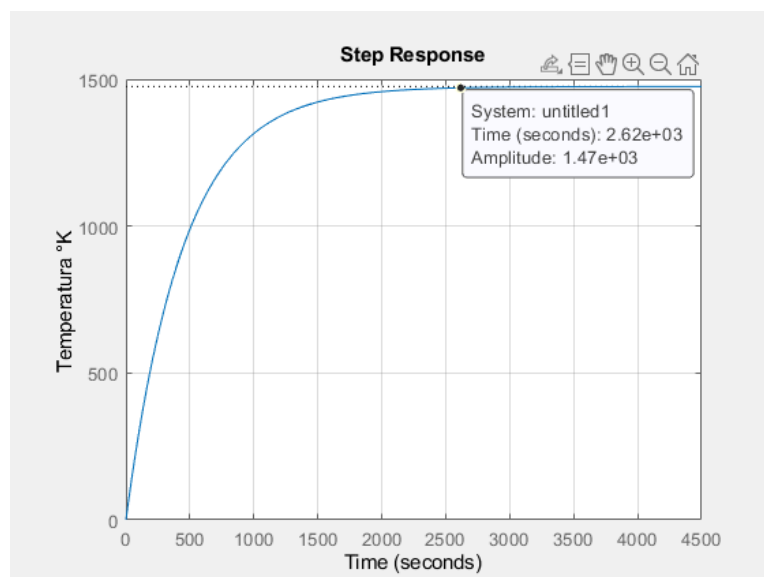


Fig 12. Respuesta escalón final.

Simulación.

Para simular vamos a plantear el escenario que venimos estudiando, de llevar el horno a 1475 [K] que es aproximadamente 1200 [°C], a esta temperatura es posible fundir el hierro para tenerlo en forma “líquida”.

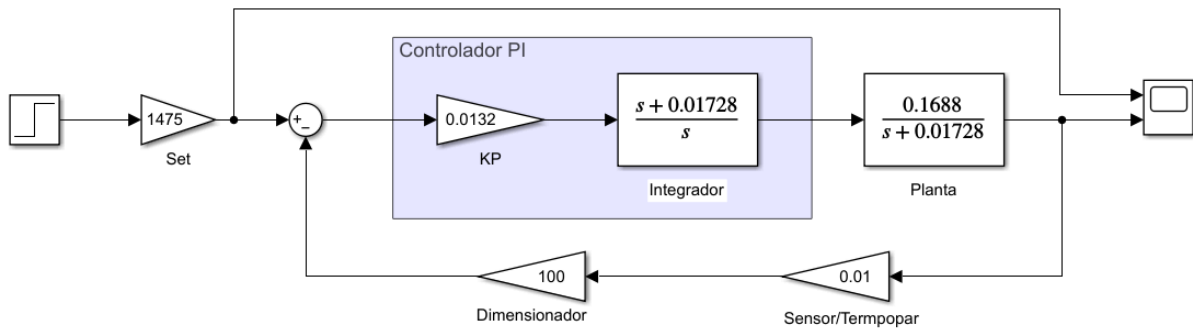


Fig 13. Diagrama de bloques simulink.

Para ello utilizaremos simulink, que es una herramienta de matlab la que nos permite a través de un diagrama de bloques, configurar los mismos y poder dar un setpoint buscado, en nuestro caso 1475 [K].

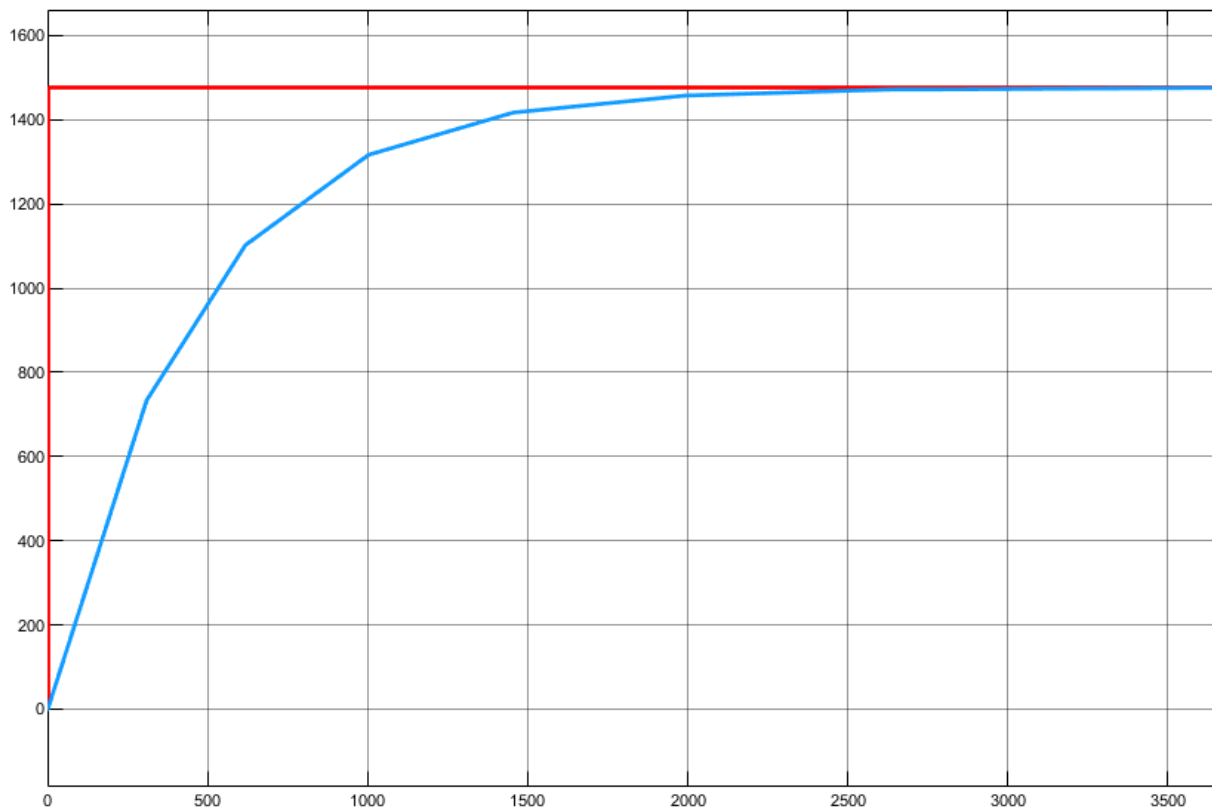


Fig 11. Simulación a 1475 Kelvin.

Podemos observar que el sistema se establece aproximadamente a los 2000 [s] o 33 [min] tal como habíamos analizado, y se mantiene dentro del rango establecido de los 1475 [K].

Conclusiones.

Al finalizar este análisis y simulación podemos resaltar ciertos detalles que surgieron en el desarrollo del sistema.

La interpretación de parámetros del sistema planteado de manera teórica fue exitoso, ya que se pudo llegar a las especificaciones de diseño planteadas para la compensación del sistema. Sin aplicar ningún tipo de controlador teníamos un error de más del 9% y al finalizar el desarrollo del mismo tenemos un error cercano a 0%.

El uso de herramientas de software nos permitió y nos facilitó la comprobación de los cálculos planteados, y así también una forma visual de comprobar nuestro sistema con diagramas de bloques y gráficos.

Bibliografía.

- Ingeniería de Control Moderna - Katsuhiko Ogata.
- Sistemas de Control Automático - Benjamin Kuo.
- Ingeniería de Control - Bolton W.

Anexo

[1]https://hornossimcic.com.ar/ficha/horno_modelo_hm_1_1200_c_medidas_internas_utiles_190mmx110mmx230mm_para_todo_tipo_de_tratamientos_termicos_metales

[2] <https://hinrasac.com/V1/insumos/ladrillos-k23-y-k26/>

[3]<http://www.perfiltra.com/products/index/perlitemp-rigid-thermal-insulation/properties#contenido>

[4]<https://www.scielo.cl/img/revistas/infotec/v31n4//0718-0764-infotec-31-04-35-gt1.png>