



**Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial**

**Proyecto Industrial Terminal:**

**Caracterización de sensores de temperatura y  
sintonización del control PID para una máquina de  
sinterizado por chispa.**

**Para obtener la especialidad en:  
“TECNÓLOGO EN MECATRÓNICA”**

**Presenta:**

**Alumno: Ing. Bladys Michael Ruiz Chávez**

**Tutor Académico: M.I. José Alfredo Manzo Preciado**

**Colaborador: Ing. Luís Roberto Olguín Valenzuela.**



**Querétaro, Qro. Septiembre 2007.**

## **TITULO:**

**CARACTERIZACIÓN DE SENSORES DE TEMPERATURA Y SINTONIZACIÓN DEL CONTROL PID PARA UNA MÁQUINA DE SINTERIZADO POR CHISPA.**

## **RESUMEN:**

El presente trabajo, describe el proceso de diseño y sintonización de un control PID paso a paso, partiendo desde la caracterización de sensores, la obtención de la respuesta de un sistema, la aproximación del sistema por medio de funciones de transferencia, la determinación de sus parámetros, hasta la simulación y la implementación de manera física. Este trabajo resultará de gran ayuda para aquellos les interese la forma en como se automatiza un proceso.

# INDÍCE:

Justificación.....	01
Definición del proyecto.....	02
Objetivos.....	03
Fundamentación.....	04
Sinterizado.....	04
Proceso de sinterizado.....	04
Sinterización por pulso de corriente.....	05
Sensores.....	09
Transductor.....	11
Acondicionador de señal.....	11
Tarjetas de adquisición de datos (DAQ).....	12
Controladores industriales.....	13
Controladores Proporcional-integral-derivativo.....	14
Procedimiento.....	15
Caracterización del sensor de temperatura infrarrojo.....	15
Obtención de la respuesta de la máquina de sinterizado a una entrada escalón.....	17
Diseño del control PID.....	20
Resultados.....	28
Simulación del PID.....	28
Pruebas prácticas de funcionamiento en la máquina de sinterizado por chispa.....	34
Conclusiones.....	37
Bibliografía.....	38

## INDÍCE DE FIGURAS:

Fig. 1	Diagrama de una máquina de sinterización por chispa.....	06
Fig. 2	Máquina de sinterizado por chispa.....	06
Fig. 3	Panel de control para la máquina de sinterizado.....	07
Fig. 4	Tarjeta MP400.....	08
Fig. 5	Potenciómetro encargado de mandar el voltaje a la tarjeta MP400.....	08
Fig. 6	Pirómetro infrarrojo Raytek.....	11
Fig. 7	Acondicionador de señal de Weidmüller.....	12
Fig. 8	DAQ de National Instruments AT-MIO-16E-2, dentro de la computadora y su tarjeta de conectores.....	13
Fig. 9	Relación de la Temperatura respecto al Voltaje para el Sensor de temperatura infrarrojo.....	15
Fig. 10	Sensor de temperatura infrarrojo, ubicado en dirección a la matriz de grafito, para medir su temperatura.....	17
Fig. 11	Respuesta al escalón de entrada de 0.5 Volts.....	18
Fig. 12	Respuesta al escalón de entrada de 1.0 Volts.....	18
Fig. 13	Respuesta al escalón de entrada de 1.5 Volts.....	19
Fig. 14	Modelo base para el diseño del PID.....	20
Fig. 15	Comparación del sistema real con el simulado.....	21
Fig. 16	Comparación del sistema real con el simulado en el plano Z, y en el plano S.....	24
Fig. 17	Comparaciones de los sistemas de primer orden y de segundo orden.....	25
Fig. 18	Respuestas de los sistemas de primer orden y de segundo orden.....	26
Fig. 19	Diagrama de bloques del control PID.....	28
Fig. 20	Respuesta de nuestro sistema a un setpoint de 420°C.....	29
Fig. 21	Respuesta del PID, al simular un setpoint de 420°C.....	29
Fig. 22	Respuesta de nuestro sistema a un setpoint de 420°C. Utilizando el doble de los parámetros Kp, Ti, y Td.....	31

Fig. 23	Respuesta del PID, al simular un setpoint de 420°C, Utilizando el doble de los parámetros $K_p$ , $T_i$ , y $T_d$ .....	31
Fig. 24	Respuesta de nuestro sistema a un setpoint de 420°C. Utilizando los valores de $P = 0.5, I = 0.001, D = 50$ .....	32
Fig. 25	Respuesta del PID, al simular un setpoint de 420°C, Utilizando los valores de $P = 0.5, I = 0.001, D = 50$ .....	33
Fig. 26	Equipo para la prueba del lazo de control con el PID.....	34
Fig. 27	Lazo de control del PID, alimentado el control de la MP400.....	35
Fig. 28	Respuesta del PID, a un setpoint de 400°C.....	35
Fig. 29	Respuesta de la máquina a un setpoint de 400°C.....	36

# JUSTIFICACIÓN.

La automatización de los procesos industriales es una tendencia actual que la industria está demandando actualmente; la utilización de estos sistemas automáticos se refleja en una mejora en la producción.

Dada la relevancia de la automatización para la industria, se plantea automatizar el control de temperatura de una máquina de Sinterizado, la cual utiliza grandes cantidades de corriente para calentar un horno y crear nuevos materiales. Esta corriente actualmente es suministrada por el usuario mediante una perilla, el problema aquí es que este control no tiene exactitud y muchas veces se suministra más corriente de la necesaria, esto equivale a más temperatura provocando que las piezas que están dentro del horno se dañen.

El principal beneficio de la realización de este proyecto es que se tendrá un control de gran exactitud sobre la temperatura del horno, además de que ya no será necesaria la presencia del operador de la perilla, ni tampoco de alguien que tome las lecturas manualmente, pues todo será enviado y documentado a una computadora.

La importancia en la realización de este proyecto es que existen investigadores que están trabajando en la obtención de nuevos materiales cerámicos y metálicos. Este equipo forma parte de un proyecto de investigación apoyado por CONACYT y es encabezado por el Dr. Sebastián Díaz, el desarrollo de este proyecto contribuye de manera significativa con sus investigaciones ya que les brinda la posibilidad de tener un control mas exacto sobre los experimentos que realizan.

## **DEFINICIÓN DEL PROYECTO:**

Implementar un control de temperatura automático para una máquina de sinterizado por chispa por medio de un sistema PID basado en el software LabVIEW.

## **OBJETIVOS:**

- **Caracterizar los sensores de temperatura.**
- **Obtener la respuesta de la máquina de sinterizado a una entrada escalón.**
- **Diseñar el control PID.**
- **Simular el control PID.**
- **Hacer pruebas prácticas de funcionamiento en la máquina de sinterizado por chispa.**



# FUNDAMENTACIÓN.

## **SINTERIZADO:**

El sinterizado es una técnica de obtención de piezas de precisión en grandes series, sin pérdida de material y por procesos que lo hacen altamente fiable y económico.

Prácticamente todas las operaciones clásicas de acabado metalúrgico son posibles en las piezas sinterizadas: Mecanizados auxiliares, tratamientos térmicos y recubrimientos superficiales.

Durante el proceso de sinterización, las piezas son sometidas a un ciclo térmico con temperatura y atmósfera controladas. En esta fase se produce la difusión entre partículas y se generan las soldaduras entre los granos de polvo, que son la base de las propiedades mecánicas y físicas de las piezas.

## **PROCESO DE SINTERIZACIÓN.**

El proceso de sinterización consta de tres etapas diferenciadas:

### **1. Calentamiento:**

En esta etapa, las piezas se calientan hasta un nivel determinado para eliminar el lubricante usado para facilitar la compactación y conseguir una buena homogeneidad de temperatura de toda la carga.

### **2. Sinterización:**

La sinterización se realiza en presencia de atmósfera reductora y con un ciclo de temperatura cuyo máximo, denominado temperatura de sinterización, está por debajo de la temperatura de fusión del material.

Para algunos materiales especiales o cuando quieren alcanzarse prestaciones superiores a lo normal, puede sinterizarse a temperaturas más elevadas.

La adecuación de la atmósfera al material a sinterizar, permite reducir, en una primera fase, la capa de óxido que pudieran tener las partículas metálicas y, así prepararlas para, una vez alcanzada la temperatura de sinterización, formar los cuellos de soldadura entre ellas.

### **3. Enfriamiento:**

Dependiendo del tipo de horno y del material a sinterizar, existen dos opciones:

*I: Standard:* es un enfriamiento lento cuyo objetivo es evitar la oxidación de las piezas cuando éstas salen del horno y se exponen al ambiente.

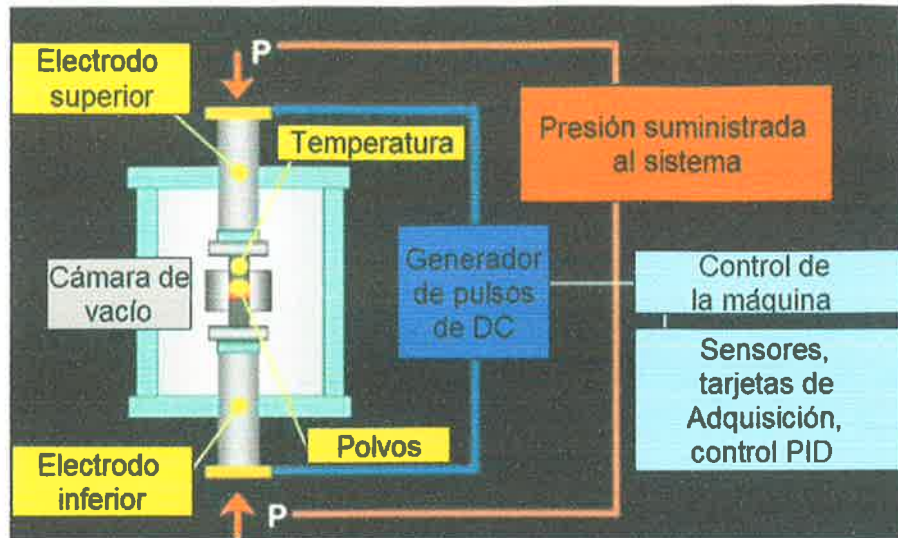
*II: Enfriamiento rápido:* Algunos hornos están equipados con una zona de enfriamiento rápido por convección.

### **SINTERIZACIÓN POR PULSOS DE CORRIENTE:**

Es una técnica de sinterizado capaz de aplicar calentamientos muy rápidos (600°C/min.) mediante la aplicación de pulsos de corriente DC, en contraste con el sinterizado convencional donde el calor es suministrado por la calefacción externa. Debido a que no se emplea combustible alguno, no se introduce ningún tipo de impurezas.

Esta técnica también es llamada Spark Plasma Sintering (**SPS**), Plasma Activated Sintering (**PAS**), Field Assisted, Sintering Technique (**FAST**), Pulse Electric Current Sintering (**PECS**).

Para ilustrar los elementos que forman una máquina de sinterizado por chispa, en la Fig. 1 se muestra el diagrama general de ésta.



*Fig. 1 Diagrama de una máquina de sinterización por chispa.*

Para el desarrollo de este proyecto se tiene una máquina de sinterizado por chispa, el cual se muestra en la Fig. 2.



*Fig. 2. Máquina de sinterizado por chispa*

Se cuenta además con un panel de control para la máquina de sinterizado por chispa, el cual se observa en la Fig. 3, éste está diseñado para que funcione con una alimentación de 220VCA-60Hz trifásica y mantenga una salida de 8VCD con un máximo de corriente a 3000 Amps. Ésta corriente es la que utilizan los electrodos.



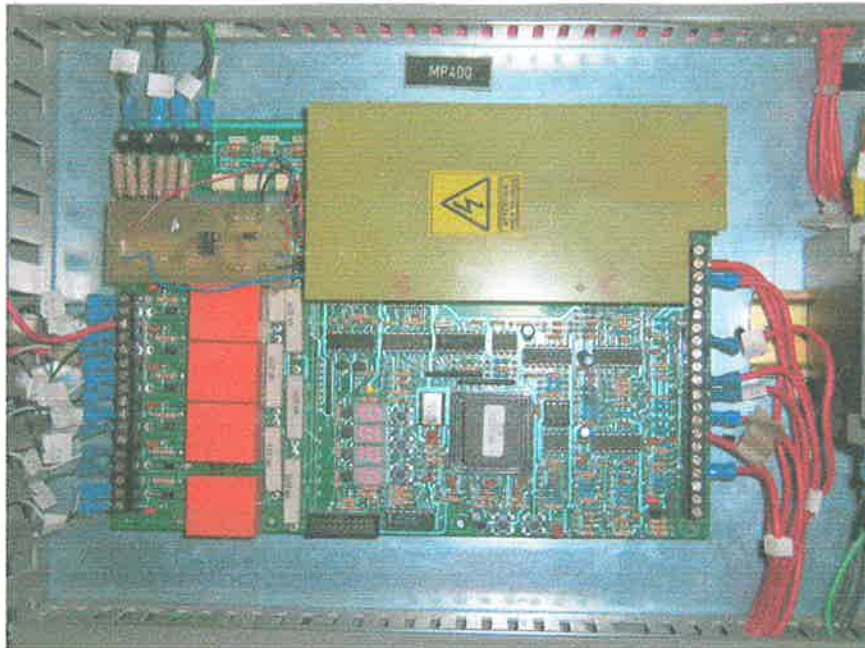
*Fig. 3. Panel de control para la máquina de sinterizado*

Este panel esta conformado por una fuente de DC la cual consta de una etapa de potencia, con un transformador trifásico de 220:8 V y un puente hexafásico de 3000 Amperes, una resistencia shunt de 4000 Amperes 60mv, cuenta con un controlador de impulsos el cual regula el ángulo de disparo de los tiristores de acuerdo a la referencia enviada por el lazo de control de corriente a través una tarjeta de regulación (MP400), las entradas y salidas digitales se encuentran en un PLC.

La responsable de la etapa de regulación es la tarjeta MP400, se alimenta con un voltaje de 110VCA del secundario del transformador, recibe la salida del PLC y realiza las siguientes funciones:

- a) Inhibe la salida de disparo de los tiristores de acuerdo con la señal programada del PLC On -Off.
- b) Ajusta la corriente de salida a los electrodos del horno.
- c) Encendido suave.

En la Fig. 4 se muestra se muestra la tarjeta MP400, ésta acepta un rango de voltaje de entrada de 0 a 5 volts.



*Fig. 4. Tarjeta MP400.*

El voltaje es suministrado a la MP400 por medio de un potenciómetro que se muestra en la Fig. 5, cuyo rango de valor que entrega varía de 0 a 5 Volts, éste se encarga del control de la temperatura, sin embargo cuando se diseñe el PID, esta perilla será reemplazada.



*Fig. 5. Potenciómetro encargado de mandar el voltaje a la tarjeta MP400.*

Dentro del proceso de sinterización existen varios componentes importantes uno de ellos son los sensores de temperatura, en este diseño se utilizaron pirómetros (*dispositivo capaz de medir la temperatura sin contacto superficial*), por tal motivo a continuación se describen algunos tipos de sensores y las características principales de cada uno de ellos:

## **SENSORES:**

El término sensor se refiere a un elemento que produce una señal relacionada con la cantidad que se está midiendo. Por ejemplo, en el caso de un elemento para medir temperatura mediante resistencia eléctrica, la cantidad que se mide es la temperatura y el sensor transforma una entrada de temperatura en un cambio de resistencia.

### **Clasificación de sensores**

Los sensores se pueden clasificar de diferentes maneras considerando, su utilidad, principio, tipo de señal que entregan, etc. En la Tabla siguiente son listados varios tipos de sensores clasificados por su objetivo de medición.

#### **Sensores de rotación y desplazamiento.**

<b>Sensor</b>	<b>Características</b>
Codificadores ópticos (Encoders).	Usados para medir posición rotatoria absoluta o incremental.
Sensores de efecto Hall.	No requieren de un contacto físico para la medición.
Sensor capacitivo.	Usados para medir nivel de líquido, detectar presencia, etc.
Giroscopio.	Medir velocidades angulares.
Acelerómetro.	Cambio de velocidad.
Sensores piezoeléctricos.	Para medir fuerza.
Sensores de contacto.	Interruptor.

### **Sensores de proximidad.**

<b>Sensor</b>	<b>Características</b>
Inductivos, efecto Hall, fotoeléctrico, capacitivo.	Robustos y no requieren contacto físico.

### **Sensores de materiales especiales.**

<b>Sensor</b>	<b>Características</b>
Fibra óptica	Usados como sensores de fuerza, nivel de líquido, temperatura, etc.
Piezoeléctricos	Usados como sensores de fuerza, aceleración, etc.

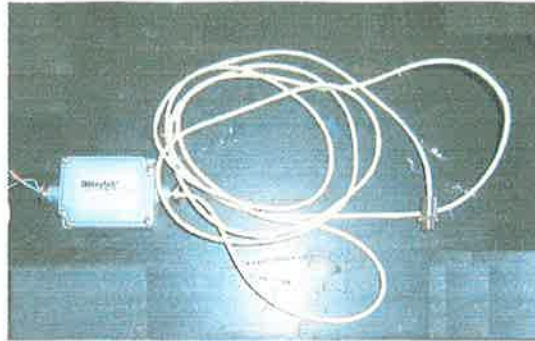
### **Micro y nano sensores.**

<b>Sensor</b>	<b>Características</b>
Sensor CCD para cámara	Tamaño pequeño y alta resolución en imágenes.
Sensor micro ultrasónico	Usado para detectar fallas en tuberías pequeñas.

### **Sensores de temperatura.**

<b>Sensor</b>	<b>Características</b>
Termopares	Son de bajo costo y son usados para medir altas temperaturas.
Termistor	Alta sensibilidad en rangos de temperatura superior a 100°C.
RTD (Resistor Temperatura Detector)	Respuesta lineal y alta sensibilidad.
Infrarrojo o pirómetros	Sensor de no contacto, usado para altas temperaturas.

Para este proyecto se utilizó un pirómetro de la marca Raytek Fig. 6, para medir una matriz de grafito, que contiene polvos metálicos. Una vez que ésta dentro del horno, es posible medir la temperatura apuntando el haz infrarrojo del pirómetro hacia la matriz.



*Fig. 6, pirómetro infrarrojo Raytek*

Este pirómetro opera en un rango de de medición de 0 - 600°C, y ofrece una salida de 4 - 20mA, y se alimenta con un rango de 12 - 24VDC.

## **TRANSDUCTOR:**

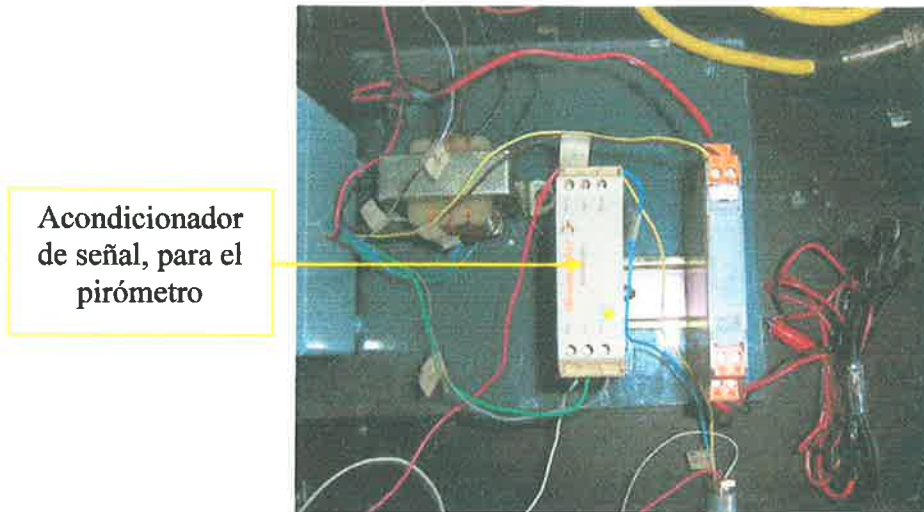
Un transductor es un dispositivo que convierte una señal de un tipo de energía en otra. La base es sencilla, se puede obtener la misma información de cualquier secuencia similar de oscilaciones, ya sean ondas sonoras (aire vibrando), vibraciones mecánicas de un sólido, corrientes y voltajes alternos en circuitos eléctricos, vibraciones de ondas electromagnéticas radiadas en el espacio en forma de ondas de radio o las marcas permanentes grabadas en un disco o una cinta magnética.

## **ACONDICIONADOR DE SEÑAL:**

Cambia la escala de una señal a la salida de un transductor para que pueda ser de utilidad, Estos pueden ser de voltaje a voltaje, de voltaje a corriente, de corriente a voltaje, y de corriente a corriente.



Para el pirómetro que se tiene se utilizará un acondicionador de señal de la marca Weidmüller, que convierte la señal de salida del sensor Raytek de 4 -20mA a una señal de 0-10Volts y se alimenta con 110/120 VAC. Éste acondicionador de señal se muestra en la Fig. 7



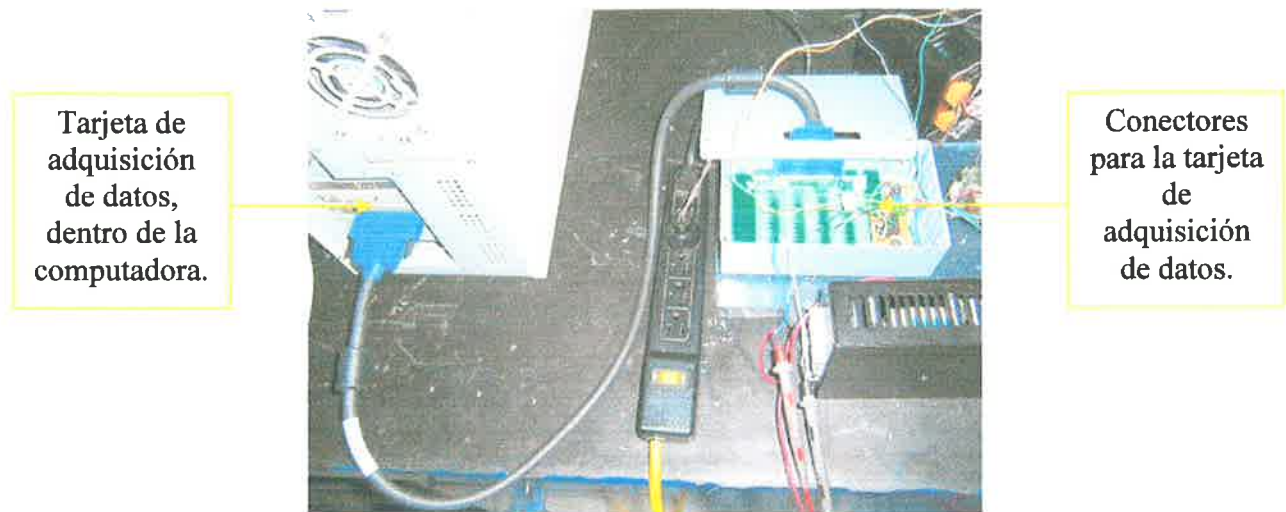
*Fig. 7 Acondicionador de señal de Weidmüller*

## **TARJETAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DAQ):**

Las tarjetas de adquisición de datos (DAQ) son tarjetas que permiten la entrada y salida de datos de la computadora a otros aparatos donde se conectan sensores y actuadores para interactuar con el mundo real. Los datos que entran y salen pueden ser señales digitales o análogas o simplemente conteos de pulsos digitales tanto de entrada como de salida.

Las tarjetas se comportan como si fueran un puerto más en la computadora, y poseen todo un protocolo y sistema de manejo, por lo que entender cada tarjeta y su funcionamiento, al igual que otro instrumento o cualquier instrumento requiere de tiempo y cuidado.

Para realizar la adquisición se cuenta con una DAQ de National Instruments AT-MIO-16E-2, localizada dentro de una computadora, Fig. 8, que opera en un rango de 0 – 10Volts, estos datos llegan a un programa en LabVIEW, que realiza un muestreo cada 0.5 segundos. Los datos que recibe la DAQ vienen del acondicionador de señal que está conectado al pirómetro.



*Fig. 8 DAQ de National Instruments AT-MIO-16E-2, dentro de la computadora, y su tarjeta de conectores.*

## **CONTROLADORES INDUSTRIALES:**

Un controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia (valor deseado), determina el error, y produce una señal de control que reducirá el error a cero, o a un valor muy pequeño. La forma como el controlador automático produce la señal de control, se denomina *acción de control*.

### **Clasificación de controladores industriales:**

Los controladores industriales, se pueden clasificar de acuerdo con sus acciones de control, de la siguiente forma:

1. Controladores de dos posiciones, o intermitentes (encendido-apagado)
2. Controladores proporcionales
3. Controladores integrales
4. Controladores proporcional-integral
5. Controladores proporcional-derivativo
6. Controladores proporcional-integral-derivativo

## **CONTROLADORES PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO:**

El controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo) es un controlador realimentado cuyo propósito es hacer que el error en estado estacionario, entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta, sea cero de manera asintótica en el tiempo, lo que se logra mediante el uso de la acción integral. Además el controlador tiene la capacidad de anticipar el futuro a través de la acción derivativa que tiene un efecto predictivo sobre la salida del proceso.

Los controladores PID son suficientes para resolver el problema de control de muchas aplicaciones en la industria, particularmente cuando la dinámica del proceso lo permite (en general los procesos que pueden ser descritos por dinámicas de primer y segundo orden), y los requerimientos de desempeño son modestos (generalmente limitados a especificaciones del comportamiento del error en estado estacionario y una rápida respuesta a cambios en la señal de referencia).

La ecuación del control PID es la siguiente:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Y la función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Donde  $K_p$  = es la ganancia proporcional,  $T_i$  = es el tiempo integral, y  $T_d$  = es el tiempo derivativo.

Una vez obtenidos estos parámetros, se podrá obtener el PID, en el programa de LabVIEW.

## PROCEDIMIENTO.

### CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA INFRAROJO.

Nuestro sensor de temperatura tiene un rango de medición de 0 a 600 °C, para determinar la relación que describía los cambios en la temperatura con respecto al voltaje, era necesario obtener la ecuación del sensor. Por tal motivo, se realizó una prueba en la que se introdujo un cubo de acero dentro de una mufla de laboratorio para obtener su temperatura, se colocó el sensor de temperatura infrarrojo en un orificio de escape de la mufla para realizar la medición; se elevó gradualmente la temperatura desde los 36 °C hasta los 520 °C, cada incremento de temperatura de medio grado se registró con su respectiva equivalencia en voltaje, en un rango de 0 a 10Volts; al graficar los datos obtenidos, se encontró que el sensor tiene un comportamiento semejante al de una recta, como se muestra en la Fig. 9.

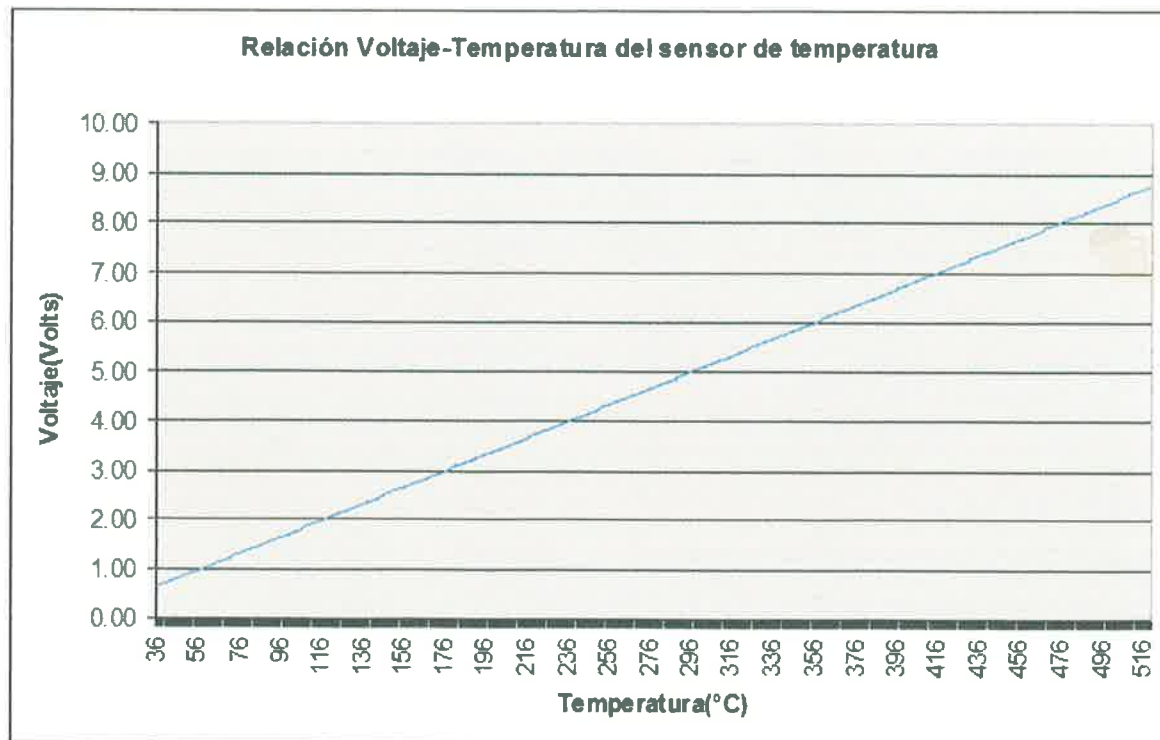


Fig. 9. Relación de la Temperatura respecto al Voltaje para el Sensor de temperatura infrarrojo.

De la gráfica de la Fig. 2, se obtuvo la pendiente de la siguiente forma: cuando se tienen dos puntos cualesquiera  $(x_1, y_1)$  y  $(x_2, y_2)$ , la pendiente queda determinada por el cociente entre la diferencia de las ordenadas de dos puntos de ella y la diferencia de las abscisas de los mismos puntos.

$$m = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \dots\dots\dots(1)$$

Al tomar los valores de los extremos de la temperatura (520°C y 36°C) con su respectivo valor de voltaje (8.8410 Volts y .7554 Volts), la ecuación quedó de la siguiente manera:

$$m = \frac{(Temperatura_2 - Temperatura_1)}{(Voltaje_2 - Voltaje_1)} = \frac{(520 - 36)}{(8.8410 - .7554)} = \frac{484}{8.0856} = 59.85$$

Sustituyendo la pendiente, los valores máximos de Temperatura y Voltaje en la ecuación (1) obtenemos la relación correcta entre voltaje y temperatura. Este procedimiento se explica a continuación:

Conociendo la pendiente, ésta se sustituyó en la ecuación de la línea recta junto con el valor máximo de temperatura y voltaje es capaz de medir el sensor.

$$m = \frac{(Temperatura_2 - Temperatura_1)}{(Voltaje_2 - Voltaje_1)} \quad \therefore \quad 59.85 = \frac{(600 - Temperatura_1)}{(10 - Voltaje_1)} \dots\dots\dots(2)$$

Despejando la temperatura de la ecuación (2) se obtiene:

$$\begin{aligned} (600 - Temperatura_1) &= 59.85(10 - Voltaje_1) \\ -Temperatura_1 &= 59.85(10 - Voltaje_1) - 600 \\ -Temperatura_1 &= 598.5 - 59.85 \times (Voltaje_1) - 600 \\ Temperatura_1 &= -598.5 + 59.85 \times (Voltaje_1) + 600 \\ Temperatura &= (59.598) \times (Voltaje) + 1.4 \end{aligned}$$

Ésta ecuación se introdujo en el programa de LabVIEW, por lo que éste nos dará la relación correcta entre voltaje y temperatura.

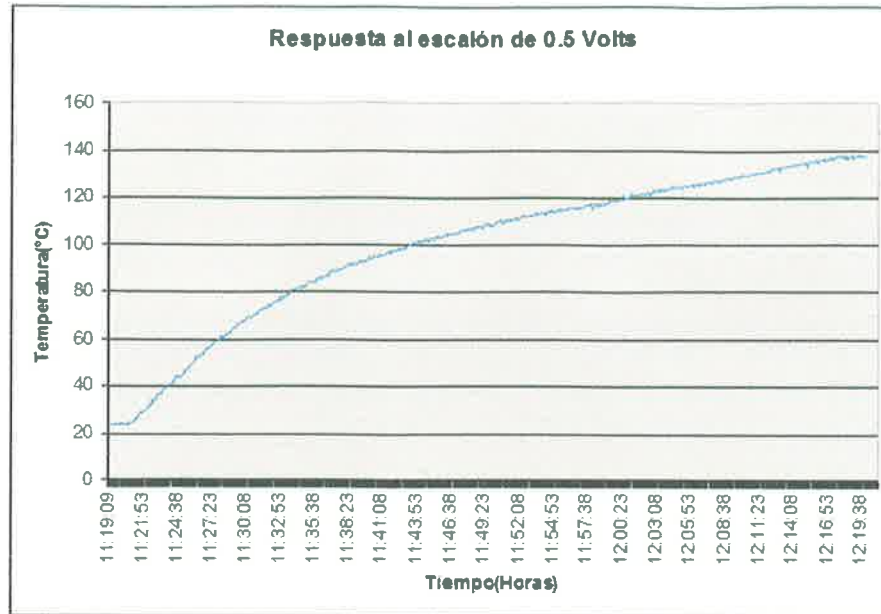
## OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA DE LA MÁQUINA DE SINTERIZADO A UNA ENTRADA ESCALÓN.

Para determinar la respuesta de la máquina, se introdujo una matriz de grafito dentro del horno de sinterizado, después se colocó el sensor de temperatura infrarrojo, para medir la temperatura de la matriz, tal y como se muestra en la Fig. 10.



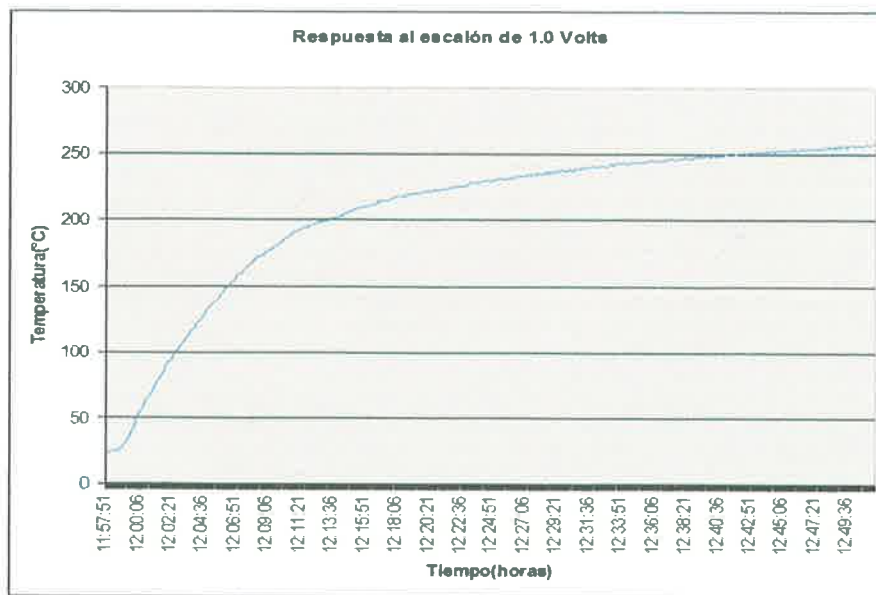
*Fig. 10. Sensor de temperatura infrarrojo, ubicado en dirección a la matriz de grafito, para medir su temperatura.*

Primero se aplicó una entrada escalón de 0.5 Volts durante una hora, la temperatura que se alcanzó en este tiempo fue de 138 °C como se muestra en la Fig. 11.



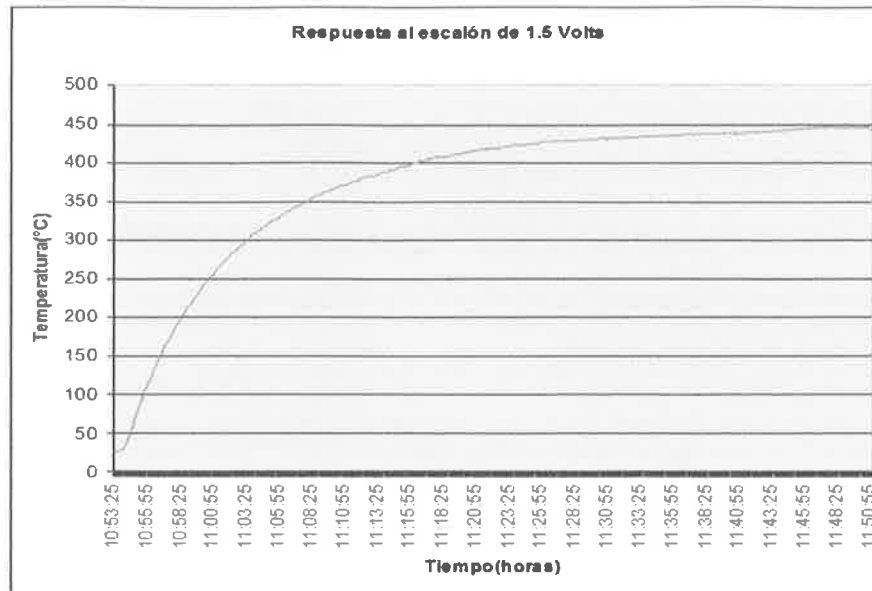
*Fig. 11 Respuesta al escalón de entrada de 0.5 Volts.*

Después se aplicó una entrada escalón de 1.0 Volts durante una hora, la temperatura que se alcanzó en este tiempo fue de 258 °C como se muestra en la Fig. 12.



*Fig. 12 Respuesta al escalón de entrada de 1.0 Volts.*

Por ultimo se aplicó una entrada escalón de 1.5 Volts durante una hora, y se alcanzó la temperatura máxima de 447 °C tal y como se muestra en la Fig. 13, cabe señalar que aunque el sensor tiene un rango de 0 a 600 Volts, éste mismo tiene una temperatura de operación ambiental no mas de 50°C, en esta parte del experimento, el sensor estaba cerca de ese rango de temperatura, por lo que un incremento mas en el voltaje, dañaría el sensor, así pues se decidió que los 1.5 volts, fueran nuestro voltaje escalón para diseñar el control PID.



*Fig. 13 Respuesta al escalón de entrada de 1.5 Volts.*



## DISEÑO DEL CONTROL PID.

Una vez obtenido el comportamiento de la máquina de sinterizado, se procedió a modificar la gráfica de la Fig. 8 para poder tener una referencia con respecto a cero; primero en el eje de las abscisas (Tiempo), las unidades de tiempo se convirtieron a segundos, después en el eje de las ordenadas (Temperatura) se restó el valor de menor temperatura a todas las mediciones. La gráfica quedó como se muestra en la Fig. 14, ésta fue el modelo base en el diseño del PID.

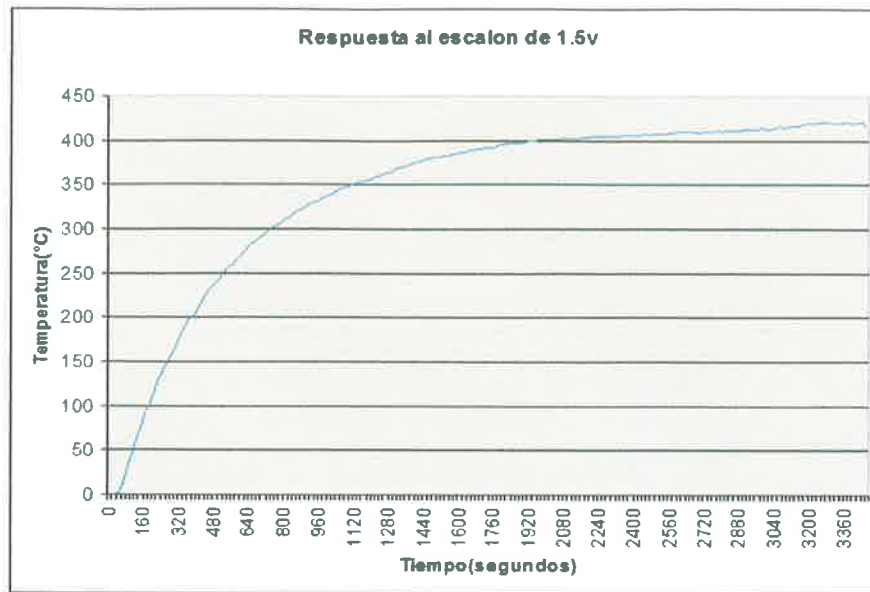


Fig. 14. Modelo base para el diseño del PID.

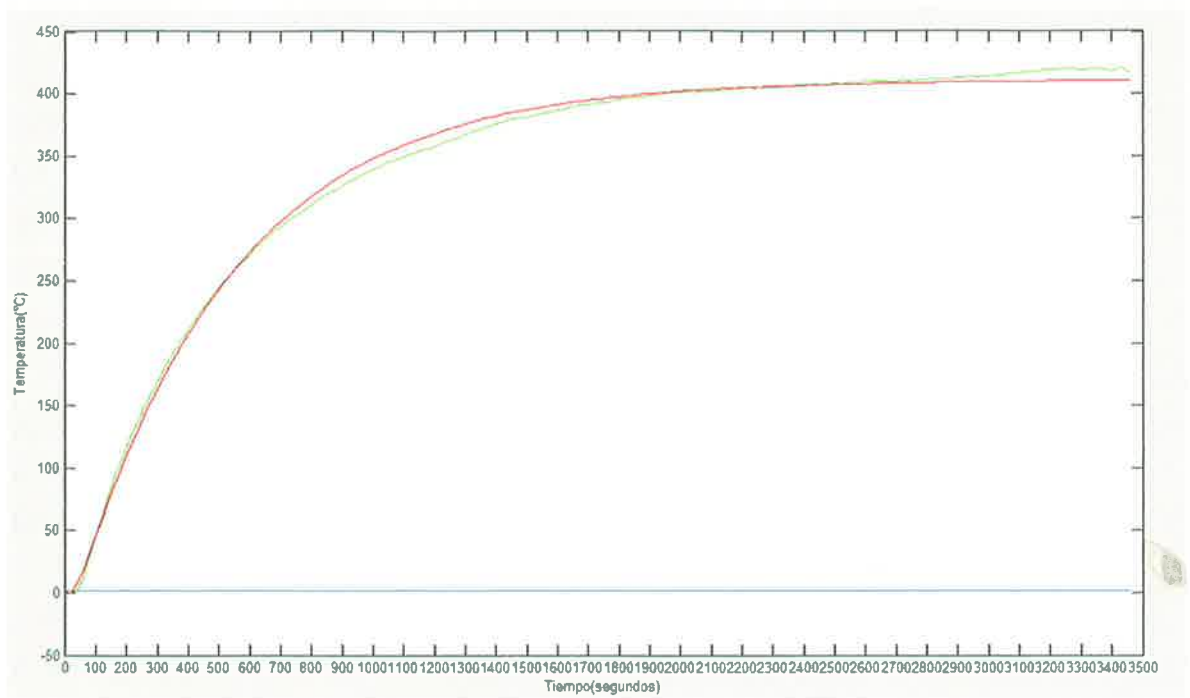
Después se utilizó un programa de mínimos cuadrados en MATHLAB el cual importa los datos de la gráfica de la Fig. 9, estos datos son: tiempo de muestreo (cada 20 segundos), voltaje de la entrada escalón y temperatura, el programa genera tres vectores con esta información; al observar la forma de la respuesta del sistema real, se aproximó ésta a un sistema de segundo orden mediante el programa, el cual generó la matriz Z. Dicha matriz contiene los coeficientes  $[b_0, a_1, b_1, a_2, b_2]$  de la siguiente función:

$$F(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}$$

Cuyos valores respectivos son [0.2933, -1.4534, -0.7206, 0.4758, 5.4331], con los cuales se buscará el modelo de la planta en Z.

$$F(z) = \frac{0.2933 - .7206z^{-1} + 5.4331z^{-2}}{1 - 1.4534z^{-1} + .4758z^{-2}}$$

En la Fig. 15 se muestran las gráficas del sistema real (Verde) y el sistema simulado (Rojo).



*Fig. 15. Comparación del sistema real con el simulado.*

A partir de los coeficientes de la matriz se pudo diseñar nuestro sistema en Z de la forma:

$$F(z) = \frac{z^{-(p+1)}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}}$$

Sustituimos los valores de nuestra matriz Z tomando para el numerador  $b_2$ , y para el denominador  $a_1$ , y  $a_2$  de la siguiente manera.

$$F(z) = \frac{5.4331z^{-2}}{1 - 1.4654z^{-1} + .4758z^{-2}}$$

De ésta ecuación se puede obtener su equivalencia en S.

$$F(s) = \frac{K_2 e^{-ts}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$$

A partir de  $a_1$  y  $a_2$  se obtuvo  $A_1$  y  $A_2$  de la siguiente manera:

$$a_1 = -(A_1 + A_2) \dots \text{Ecuación 1}$$

$$a_2 = A_1 \times A_2 \dots \dots \dots \text{Ecuación 2}$$

De la ecuación 2 tenemos:

$$a_2 = A_1 \times A_2 \quad \therefore \quad A_2 = \frac{a_2}{A_1}$$

Retomando la ecuación 1:

$$a_1 = -A_1 - A_2$$

Multiplicando la ecuación anterior por  $\frac{1}{A_2}$

$$\frac{a_1}{A_2} = -\frac{A_1}{A_2} - \frac{A_2}{A_2}$$

$$\frac{a_1}{A_2} = -\frac{A_1}{A_2} - 1$$

Igualando con cero y sustituyendo  $A_2$

$$\frac{a_1 A_1}{a_2} + \frac{A_1 A_1}{a_2} + 1 = 0$$

Sustituyendo los valores de  $a_1$  y  $a_2$

$$\frac{A_1^2}{.4758} - \frac{1.4564 A_1}{.4758} + 1 = 0$$

$$2.1017 A_1^2 - 3.0609 A_1 + 1 = 0$$

Al Resolver el sistema de ecuaciones simultaneas se obtuvo los valores de  $A_1 = .4948$  y  $A_2 = .9616$

Para obtener los tiempos  $T_1$  y  $T_2$ , siendo el tiempo de muestreo  $T_s=20$  segundos.

$$T_1 = \frac{-T_s}{\ln(A_1)} = \frac{-20}{\ln(.4948)} = 28.48\text{seg}$$

$$T_2 = \frac{-T_s}{\ln(A_2)} = \frac{-20}{\ln(.9616)} = 510.76\text{seg}$$

Para obtener K:

$$K = \frac{K_2(T_1 - T_2)}{T_s(A_1 - A_2)} = \frac{5.4331(28.48 - 510.76)}{20(.4948 - .9616)} = 280.503$$

Para obtener  $\theta$ :

$$\text{Si el numerador es } z^{-(p+1)} = 5.4331z^{-2} \therefore -(p+1) = -2$$

$$(p+1) = 2$$

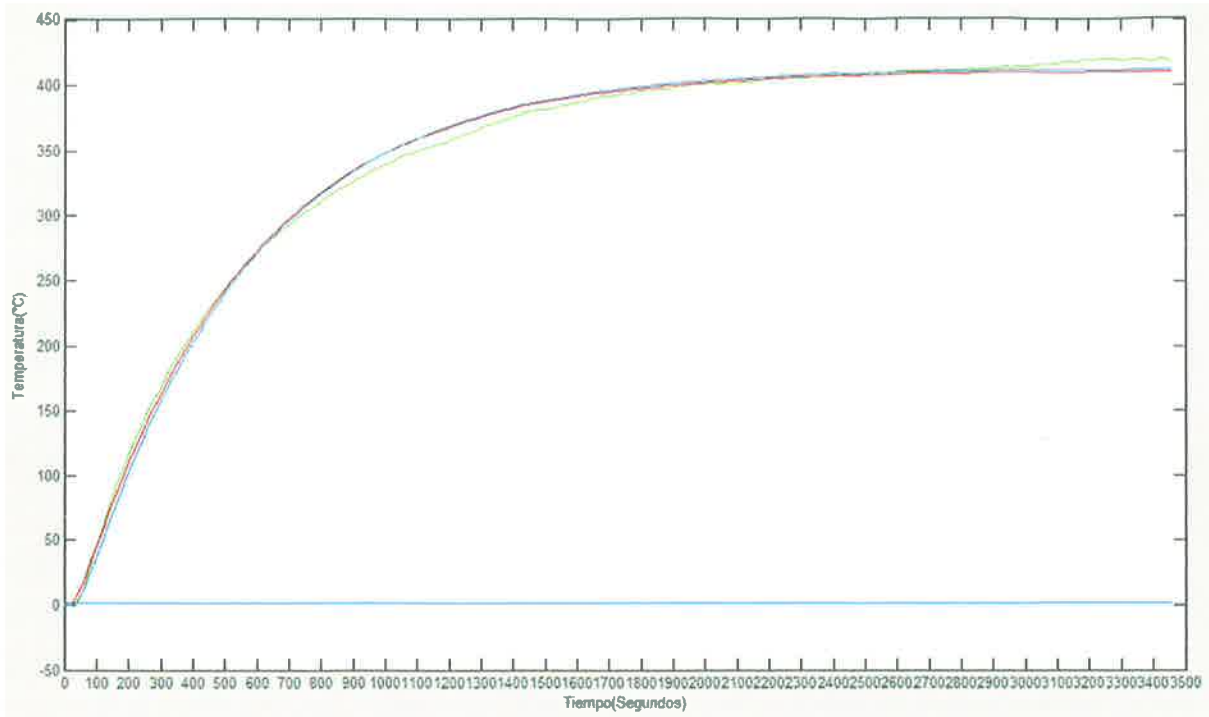
$$p = 2 - 1 = 1$$

$$\theta = p \times T_s = 1 \times 20 = 20$$

Sustituimos los valores, para obtener la ecuación de nuestro sistema en S

$$F(s) = \frac{280e^{-20s}}{(28.48+1)(510.76s+1)}$$

Después se introdujo ésta nueva ecuación en el programa de mínimos cuadrados en MATHLAB y verificamos si era similar, en la Fig. 16 se muestra las gráficas del sistema real (Verde), el sistema simulado en el plano Z (Rojo), y el sistema simulado en el plano S (Violeta). Como se aprecia en la Fig. 16, las curvas son similares, por lo tanto para el diseño del PID se tomó la ecuación en S, debido a que es más sencillo sintonizarlo.



*Fig. 16. Comparación del sistema real con el simulado en el plano Z, y en el plano S.*

La ecuación de segundo orden:

$$F(s) = \frac{280e^{-20s}}{(28.48 + 1)(510.76s + 1)}$$

Fue posible aproximarla a una de primer orden:

$$F(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{(T_1s + 1)}$$

Primero se tomaron los valores de la gráfica en los tiempos donde la curva tiene el 28.4 y el 63.2 de la respuesta, y se sustituyó en las siguientes ecuaciones:

$$T_1 + \theta = t_{0.632}$$

$$\frac{T_1}{3} + \theta = t_{0.284}$$

El 28.4 de la respuesta es 119°C, con un tiempo de 220 segundos. Y el 63.2 de la respuesta es 265°C, con un tiempo de 560 segundos.

Al sustituir los valores anteriores:

$$T_1 + \theta = 560$$

$$\frac{T_1}{3} + \theta = 220$$

Despejando el sistema de ecuaciones simultáneas se obtuvo:

$$\theta = 50$$

$$T_1 = 510$$

Sustituyendo los valores en la ecuación de primer orden.

$$F(s) = \frac{280e^{-50s}}{(510+1)}$$

En el programa Simulink, la función de transferencia de segundo orden, y la de primer orden fueron representadas por medio de bloques, para observar su respuesta, como se ve en la Fig. 17.

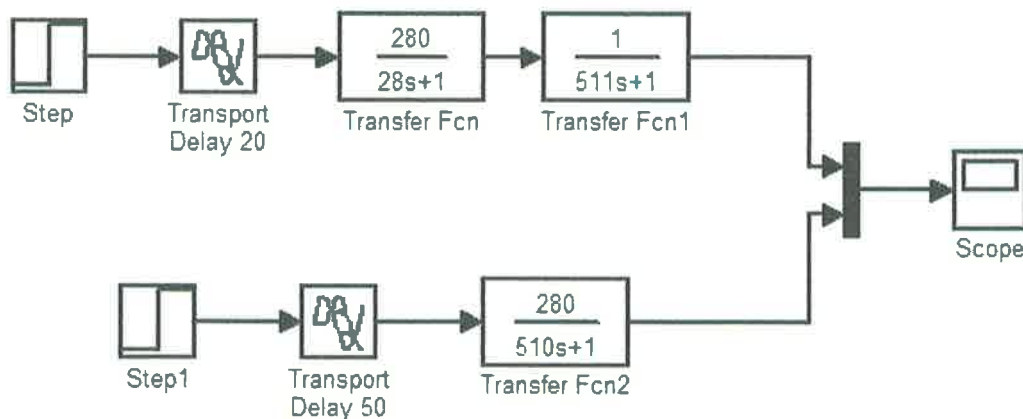
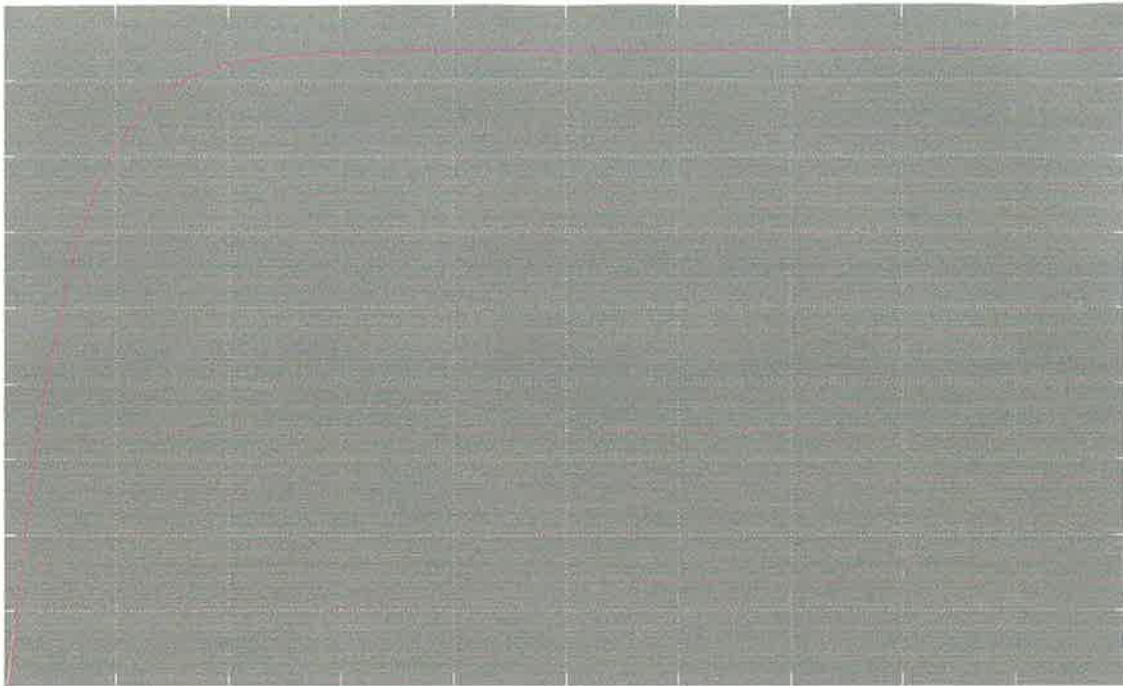


Fig. 17. Comparaciones de los sistemas de primer orden y de segundo orden.

Al graficar la función de segundo orden (amarillo) junto con la función de primer orden (púrpura) se observó que son casi idénticas como se ve en la Fig. 18.



*Fig. 18. Respuestas de los sistemas de primer orden y de segundo orden.*

De la ecuación de primer orden:

$$F(s) = \frac{280e^{-50s}}{(510+1)}$$

Se obtuvo:

$$\theta = 50$$

$$T_I = 510$$

Con estas variables se puede obtener los parámetros  $K_p$ ,  $T_i$ , y  $T_d$ , los cuales son utilizados para encontrar el PID.

$$K_p = \frac{1.2T}{\theta} = \frac{1.2(510)}{50} = 12.24$$

$$T_i = 2\theta = 2(50) = 100$$

$$T_d = .5\theta = .5(50) = 25$$

Con estos parámetros se procedió a calcular el PID para MATHLAB y LabVIEW:

$$P = Kp = 12.24$$

$$I = \frac{Kp}{Ti} = \frac{12.24}{100} = .1224$$

$$D = KpTd = (12.24) \times (25) = 306$$



## RESULTADOS:

### SIMULACIÓN DEL PID.

Con los parámetros del PID, en el programa Simulink, se representó por medio de bloques la función de transferencia que simula el sistema, este consta de una entrada escalón que es nuestro setpoint para la temperatura deseada, una ganancia de (1/60) para convertir la temperatura en voltaje, un sumador de voltaje contra voltaje, el controlador PID, una restricción de 0-5 Volts que es el rango que la MP400 acepta, la función de transferencia de segundo orden la cual retorna un valor de temperatura cuando ésta recibe un voltaje, una segunda ganancia de (1/60) que convierte la temperatura que viene de la función de orden dos a un valor de voltaje para retroalimentar el sumador y poder comparar voltaje contra voltaje. Este diagrama se muestra en la Fig. 19:

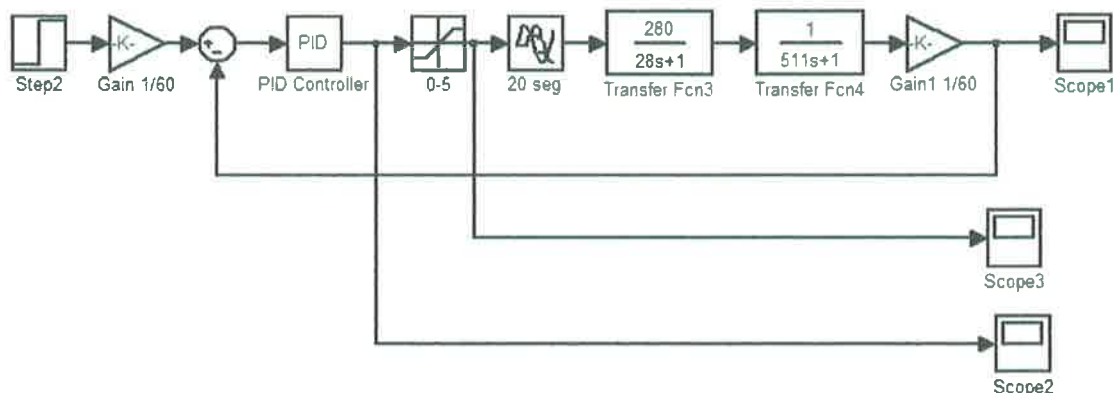


Fig. 19. Diagrama de bloques del control PID

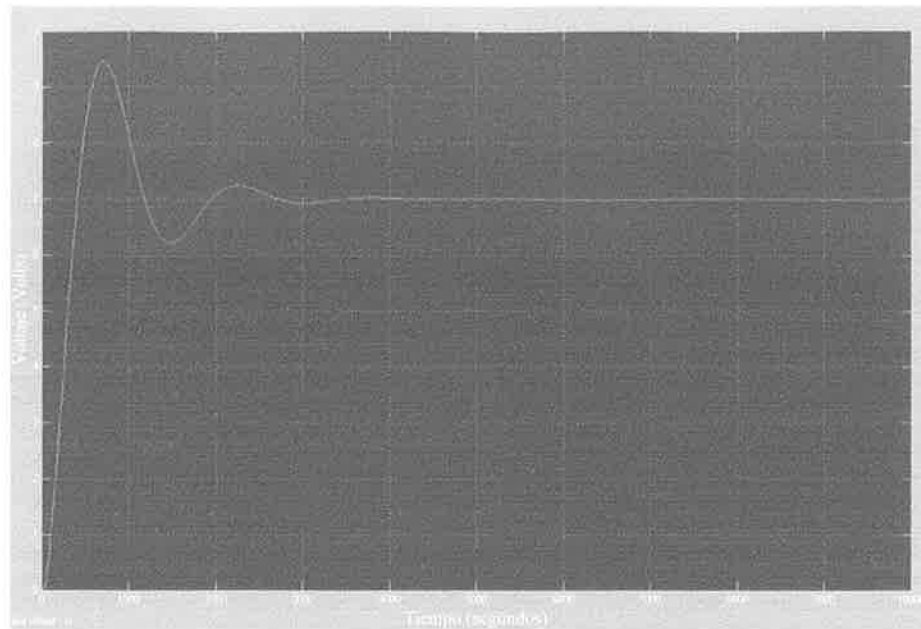
Para la simulación los valores P, I, y D se multiplicaron por (1/60) para incluirse en la función de transferencia.

$$P = 12.24 \times \frac{1}{60} = .204$$

$$I = .1224 \times \frac{1}{60} = .00204$$

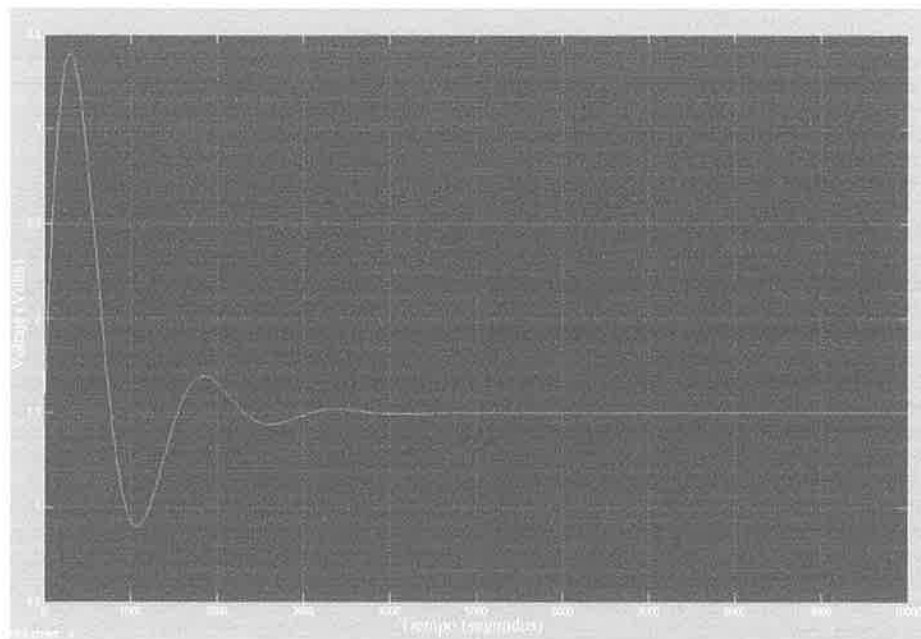
$$D = 306 \times \frac{1}{60} = 5.1$$

Al simular un valor de setpoint de 420 °C, que equivalen a 7 volts, el sistema se hizo estable después de los 4000 segundos como se ve en la Fig. 20.



*Fig. 20. Respuesta de nuestro sistema a un setpoint de 420°C.*

La respuesta del PID para estabilizar el sistema se muestra en la Fig. 21.



*Fig. 21. Respuesta del PID, al simular un setpoint de 420°C*

El diseño anterior aunque funciona, tiene muchos sobresaltos indeseables, entonces es necesario tener otros valores de referencia y poder ajustar nuestro PID, por lo tanto se duplicó el valor de los parámetros  $K_p$ ,  $T_i$ , y  $T_d$ .

$$K_p = 12.24 \times 2 = 24.48$$

$$T_i = 100 \times 2 = 200$$

$$T_d = 25 \times 2 = 50$$

Una vez obtenidos esos parámetros se procedió a calcular el PID

$$P = K_p = 24.48$$

$$I = \frac{K_p}{T_i} = \frac{24.48}{200} = .1224$$

$$D = K_p T_d = (24.48) \times (50) = 1224$$

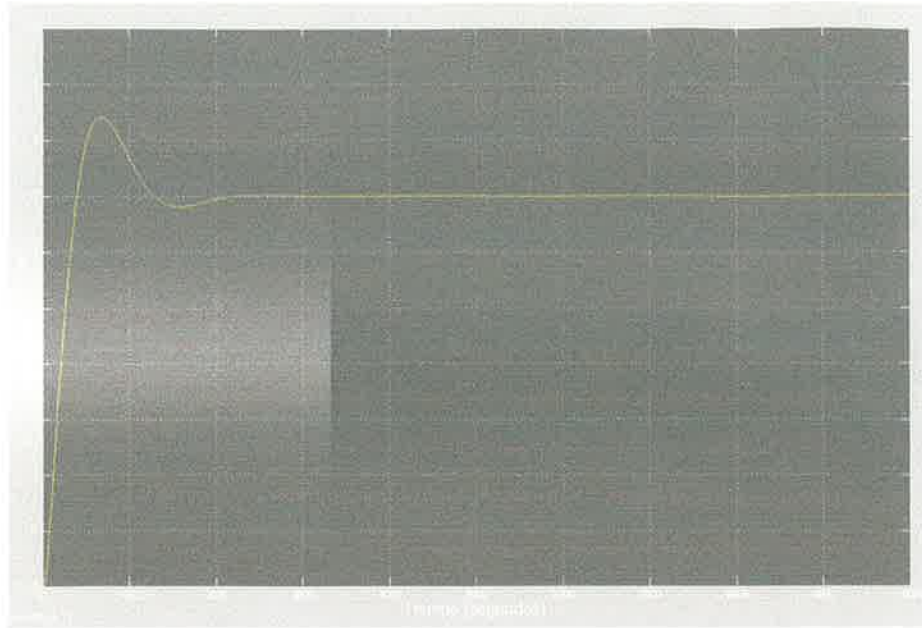
Para nuestra simulación los valores P, I, y D se multiplicaron por (1/60) para incluirse en la función de transferencia.

$$P = 24.48 \times \frac{1}{60} = .408$$

$$I = .1224 \times \frac{1}{60} = .00204$$

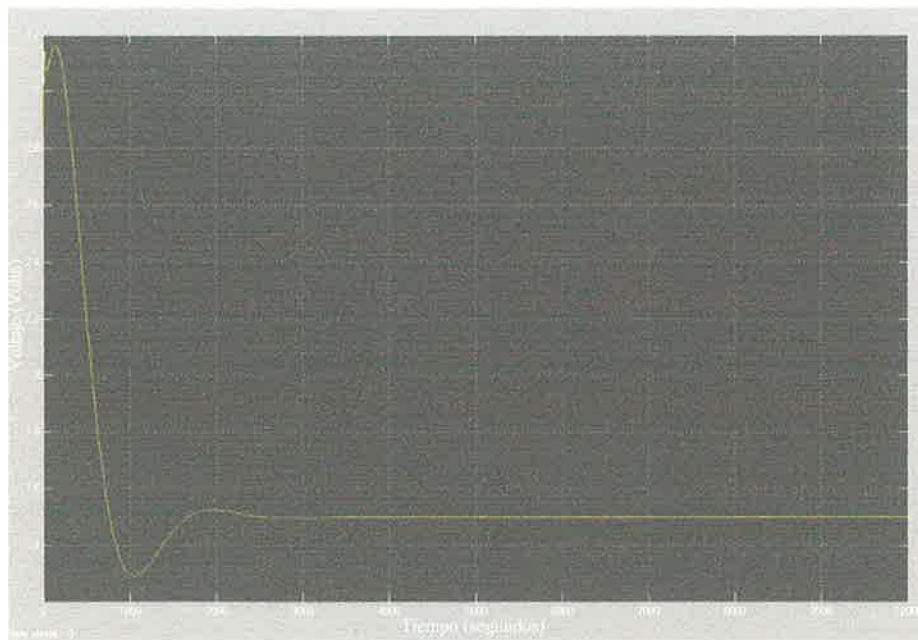
$$D = 1224 \times \frac{1}{60} = 20.4$$

Al simular nuevamente un valor de setpoint de 420 °C, el sistema se estabilizó en 7 Volts después de los 2000 segundos como se ve en la Fig. 17, este nuevo diseño funciona mejor que el anterior, por que tiene menos sobresaltos y su estabilización es más rápida, como se muestra en la Fig. 22.



*Fig. 22 Respuesta de nuestro sistema a un setpoint de 420°C. Utilizando el doble de los parámetros  $K_p$ ,  $T_i$ , y  $T_d$ .*

La respuesta del PID para estabilizar el nuevo sistema se muestra en la Fig. 23.



*Fig. 23. Respuesta del PID, al simular un setpoint de 420°C, Utilizando el doble de los parámetros  $K_p$ ,  $T_i$ , y  $T_d$ .*

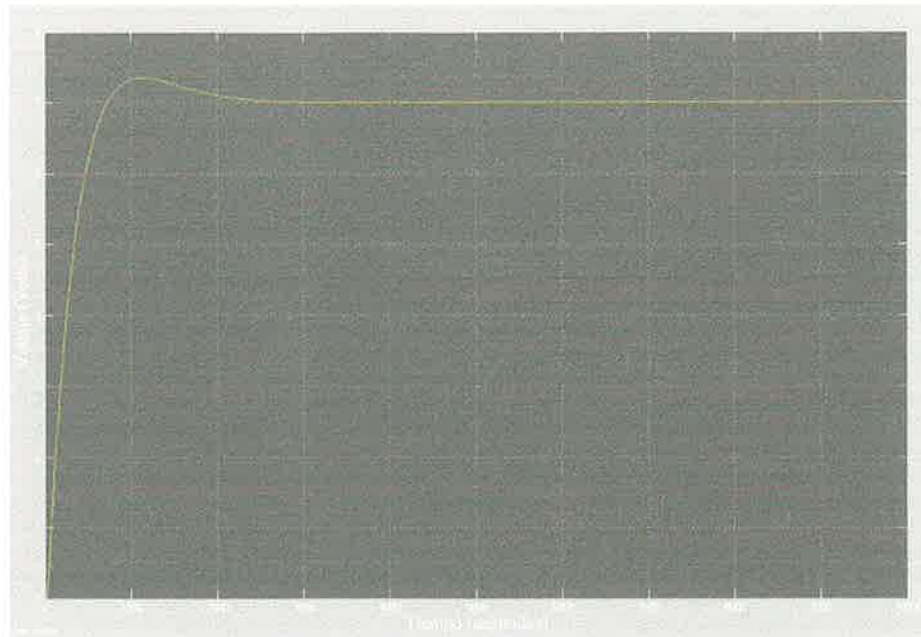
En las simulaciones anteriores, se observó que los parámetros  $P = .408, I = .00204, D = 20.4$  hacen que el sistema responda mas rápido y mejor, pero para una sintonía fina, se realizaron ajustes en los parámetros PID con el fin de tener una mejor respuesta, al variar éstos parámetros, se obtuvieron los valores con los cuales, se puede hacer una sintonización mas eficiente estos valores son:

$$P = 0.5$$

$$I = 0.001$$

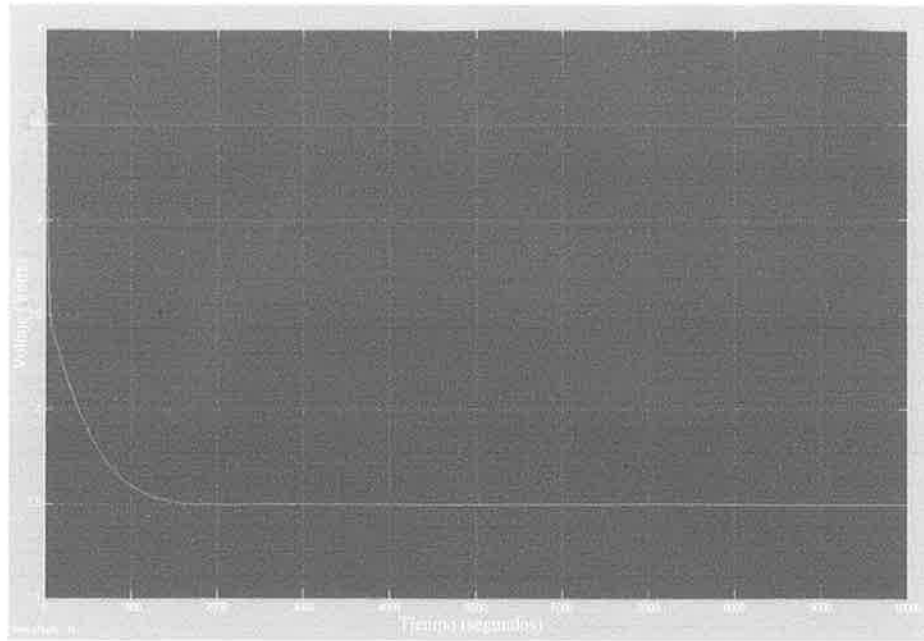
$$D = 50$$

Al simular un valor de setpoint de  $420\text{ }^{\circ}\text{C}$ , que equivalen a 7 volts, el sistema se hizo estable después de los 2000 segundos igual que en la simulación anterior, pero en ésta la respuesta tiene menos sobresaltos como se ve en la Fig. 24.



*Fig. 24. Respuesta de nuestro sistema a un setpoint de  $420^{\circ}\text{C}$ . Utilizando los valores de  $P = 0.5, I = 0.001, D = 50$*

En ésta simulación se observa como la respuesta del PID, es mas eficiente que en las opciones anteriores tal como se muestra en la Fig. 25.



*Fig. 25. Respuesta del PID, al simular un setpoint de 420°C, Utilizando los valores de  $P = 0.5, I = 0.001, D = 50$*

De esta forma se simuló satisfactoriamente el PID, al introducir estos parámetros en el programa de LabVIEW, se obtiene el control automático de lazo cerrado.

## PRUEBAS PRÁCTICAS DE FUNCIONAMIENTO EN LA MÁQUINA DE SINTERIZADO POR CHISPA.

Para realizar esta prueba primero se montó el equipo de medición como se muestra en la fig. 26. La cabeza del pirómetro se colocó en su lugar apuntando hacia la matriz de grafito, para medir la temperatura de ésta.



*Fig. 26. Equipo para la prueba del lazo de control con el PID.*

De los conectores de la tarjeta de adquisición de datos, se tomó la señal con la que se alimentó la tarjeta MP400 del panel de control, como se observa en la fig. 27, esta señal es la que controla el voltaje que hace variar la corriente para obtener la temperatura deseada.



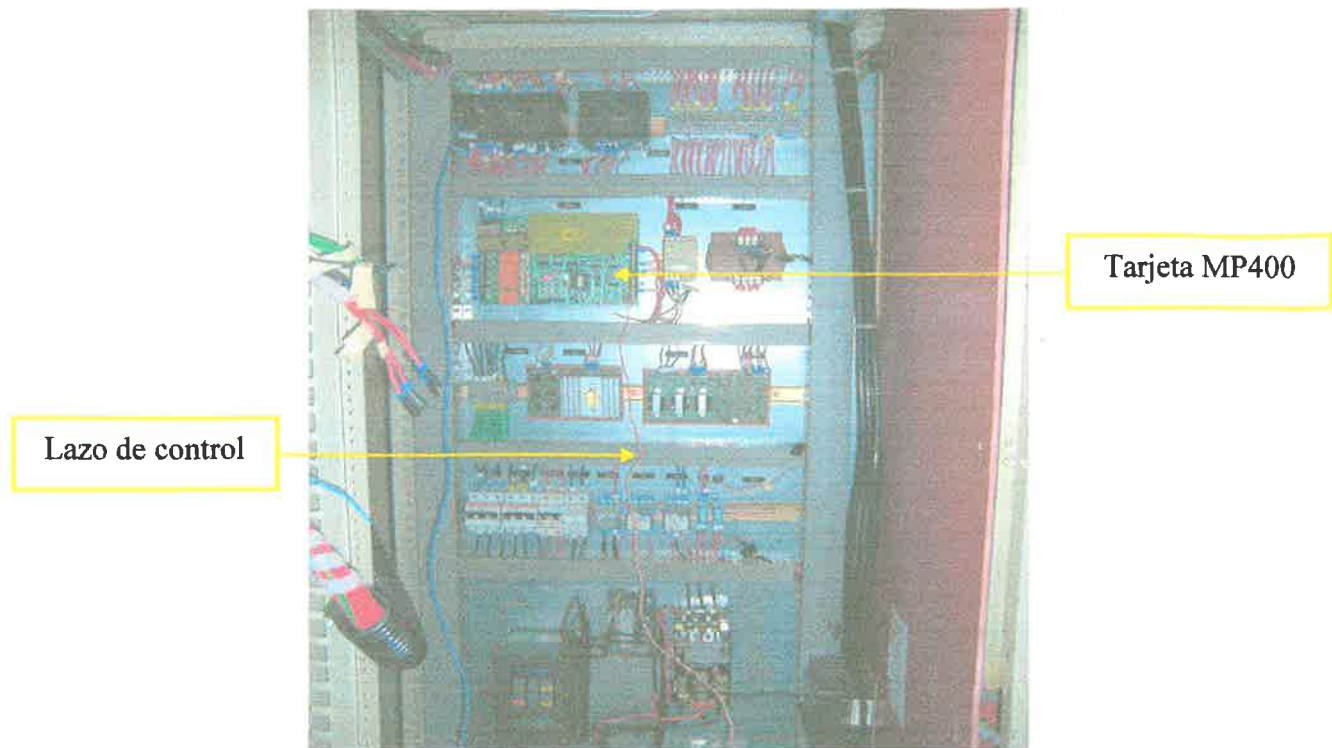


Fig. 27. Lazo de control del PID, alimentado el control de la MP400.

Al ejecutar el programa se obtuvo la respuesta del PID, Se estableció un setpoint de 400°C, este programa se ejecutó durante una aproximadamente una hora, el resultado se puede apreciar en la fig. 28.

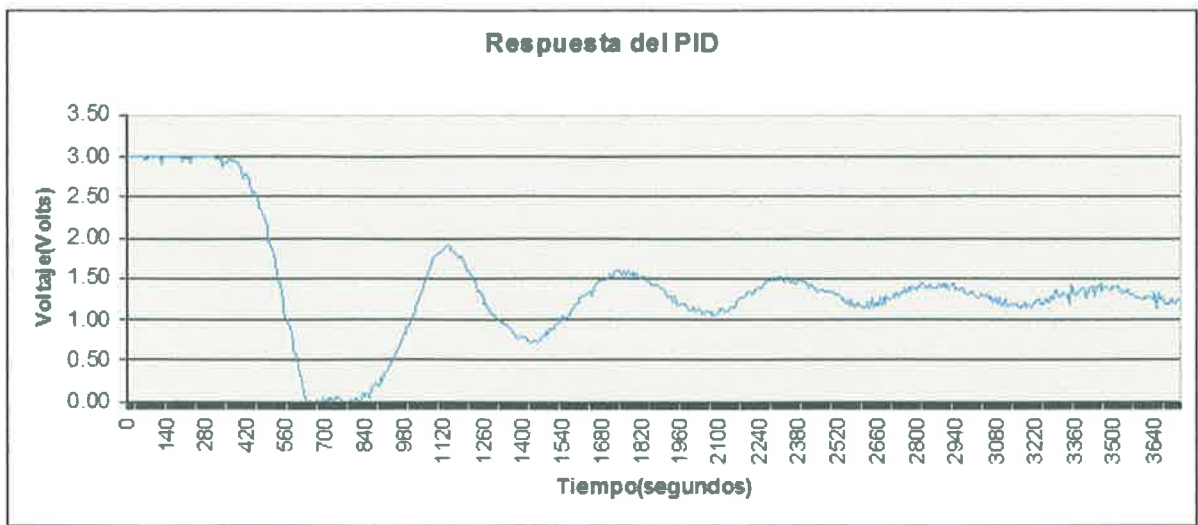


Fig. 28. Respuesta del PID, a un setpoint de 400°C



Al graficar la respuesta de la máquina se observó que alcanza la temperatura deseada a los 2100 segundos. Dicha respuesta tiene sobrepasos que no están contemplados en la simulación, pero el lazo de control automático del PID está operando como se muestra en la fig. 29 Para eliminar éstos se necesitan hacer mas pruebas para hallar los parámetros adecuados.

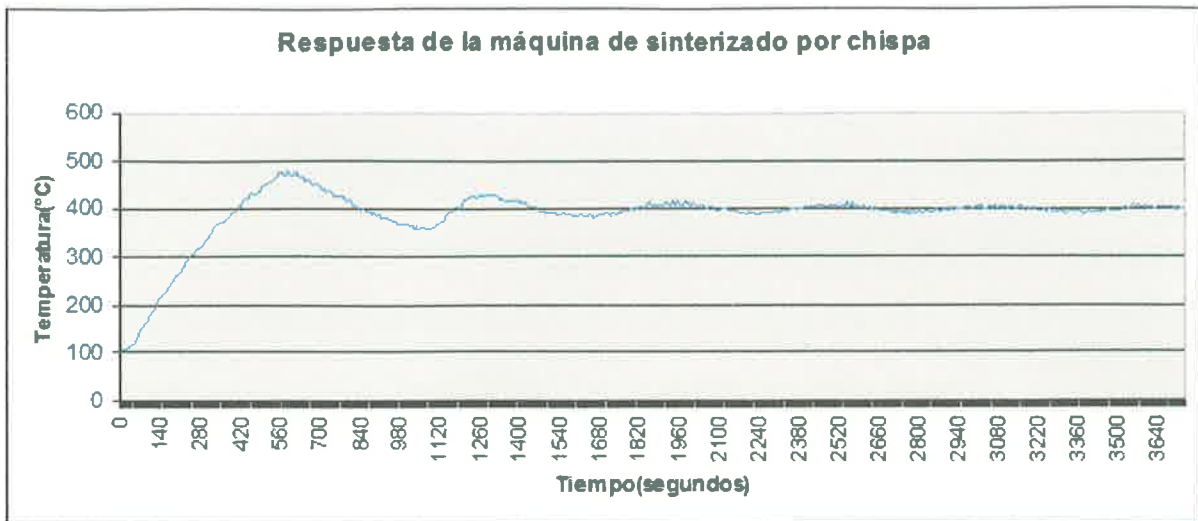


Fig. 29. Respuesta de la máquina a un setpoint de 400°C.

## **CONCLUSIONES.**

Al finalizar el desarrollo de este proyecto, todos los objetivos fueron cumplidos satisfactoriamente, el PID fue diseñado y se están realizando pruebas para obtener una mejor precisión del sistema de temperatura. El conocimiento adquirido durante la práctica, será de gran utilidad para el desarrollo de proyectos futuros, además que se logró el propósito de ser un tecnólogo en mecatrónica, que es combinar de manera sinérgica la mecánica, la electrónica, y el control para lograr un fin.

## BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Ronquillo Lomeli, Guillermo (2007). Manual del participante de ingeniería en control automático. CIDESI, Querétaro, México.
- [2] Mazonne, Virginia. (2002). Controladores PID. Universidad Nacional de Quilmes, Quilmes, Argentina
- [3] Alfaro, Víctor M. (2005). Método de identificación  $\frac{1}{4} - \frac{3}{4}$ . Universidad de Costa Rica, Asunción, Costa Rica.
- [4] National Instruments. (2005). PID Control toolset user manual. <http://www.ni.com>
- [5][http://www.sapiensman.com/medicion\\_de\\_temperatura/index.htm](http://www.sapiensman.com/medicion_de_temperatura/index.htm)
- [6]<http://www.ehu.es/acustica/espanol/electricidad/transes/transes.html>