

# **MÓDULO DE CONTROL DE TEMPERATURA (PID)**

Luis Fernando Santa Ospina

Laura Tirado Arrubla

Director de trabajo de grado:

Juan Fernando Madrigal Mesa

**INSTITUTO TECNOLOGICO METROPOLITANO**

**30 de noviembre de 2017**

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

## RESUMEN

---

En este trabajo de grado se muestran los resultados de la implementación de un módulo de control de temperatura (PID) para un horno fabricado de forma robusta y con elementos industriales de alta durabilidad, por lo tanto, es un proceso netamente experimental. El control PID implementado se diseñó con base a los datos adquiridos por medio del software PLX-DAQ, el cual se encarga de sensar en tiempo real la respuesta de una entrada análoga, luego estos datos censados son almacenados en Excel y posteriormente graficados. Con los resultados gráficos se procedió a buscar la función de transferencia del sistema con el fin de conseguir las constantes del controlador con la ayuda del software MATLAB.

El trabajo de grado fue realizado bajo la modalidad de producto obtenido en talleres o laboratorios del ITM, este cuenta con su respectivo manual de usuario con una guía paso a paso para su adecuado funcionamiento, además cuenta con 3 guías de trabajo independiente (adquisición de datos, identificación de sistemas y ajuste de controladores) que permitirán el fácil desarrollo de prácticas experimentales para diferentes asignaturas de la Facultad de ingeniería en los programas que trabajen teoría de control o sistemas automáticos de control. Es de resaltar que este proyecto fue principalmente desarrollado para la materia de Sistemas Automáticos de Control, no obstante, se pretende que dicho proyecto sea de libre uso para cualquier estudiante inscrito al ITM.

*Palabras clave:* Control PID, MATLAB, Control de temperatura.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

## RECONOCIMIENTOS

---

Agradecemos al instituto tecnológico metropolitano por formarnos con fundamentos morales, educativos y comunitarios, de igual forma agradecemos a cada docente que estuvo presente en nuestro proceso de formación, cada uno de ellos fue vital para el buen cumplimiento de nuestro proceso académico.

Agradecemos a nuestras familias por el esfuerzo y el apoyo incondicional; gracias a ellos logramos superar momentos de dificultad que marcaron nuestro proceso formativo.

Agradecemos a nuestros compañeros de estudio, gracias a ellos aprendimos a trabajar en equipo, de igual forma agradecemos los momentos compartidos y hoy podemos decir que dejaron de ser compañeros para convertirse en amigos únicos que sin duda perduraran en el tiempo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

# ACRÓNIMOS

---

**PID:** Controlador Proporcional-Integral-Derivativo.

**FT:** función de transferencia

**SV:** set point

**AT:** auto tuning activado

**OUT:** salida encendida

**SEE:** salida en estado estable

**PLX-DAQ:** complemento del software Parallax Data Acquisition para Microsoft Excel

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

# TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN .....	6
2 OBJETIVO.....	7
<b>2.1 Objetivos específicos</b> .....	7
3 MARCO TEÓRICO .....	8
<b>3.1 Energía térmica</b> .....	8
<b>3.2 Temperatura</b> .....	8
<b>3.3 Calor y temperatura, relaciones y diferencias</b> .....	9
<b>3.4 Escalas de temperatura</b> .....	9
<b>3.5 Termopares</b> .....	10
<b>3.7 Controlador universal</b> .....	12
<b>3.9 Arduino UNO</b> .....	13
<b>3.10 Horno eléctrico</b> .....	13
<b>3.11 Extractor de aire</b> .....	14
<b>3.12 Controlador de temperatura universal o estándar (DELTA DTA4848V0)</b> .....	14
<b>3.13 Relé de estado solido</b> .....	14
<b>3.14 Modulo sd</b> .....	15
<b>3.15 Módulo MAX6675</b> .....	15
<b>3.16 Descripción detallada de elementos usados</b> .....	15
<b>3.17 Control Continuo Regulado</b> .....	16
<b>3.18 Identificación de sistemas por curva de reacción</b> .....	22
<b>3.19 Técnica de sintonización de controladores PID</b> .....	25
4 METODOLOGÍA.....	28
<b>4.1 conexión de componentes</b> .....	28
<b>4.2 Método de construcción del sistema</b> .....	29
<b>4.3 Adquisición de datos</b> .....	29
<b>4.3.1 Control PID</b> .....	32
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
6 CONCLUSIONES.....	37
7 RECOMENDACIONES.....	38
8 TRABAJOS FUTUROS .....	39
9 REFERENCIAS .....	40

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

# 1 INTRODUCCIÓN

El control PID, en sus distintas versiones constituye una de las soluciones más aceptadas y utilizadas en los problemas de control regulado de variables en la industria, este calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado. Se calcula que el 80% de controladores industriales analógicos o digitales, están constituidos por algoritmos PID.

Con el paso de los años la temperatura se ha convertido en una de las variables más importantes a considerar en el sector industrial, por esta razón el uso de controladores de temperatura se ha visto incrementado en el tiempo.

El uso de alternativas en el modelo de enseñanza en la actualidad impulsó el desarrollo de un módulo de control de temperatura (PID) que permite el fácil aprendizaje de conceptos relevantes en el control automático de sistemas continuos, este módulo cuenta con un manual que guía a los estudiantes paso a paso para la correcta utilización, de igual forma se entregan 3 guías que harán que tanto el estudiante como los docentes aprovechen al máximo dicho modulo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

## 2 OBJETIVO

Diseñar y construir un módulo interactivo de control de temperatura (PID) que permita complementar los estudios adquiridos en sistemas automáticos de control.

### 2.1 Objetivos específicos

- Permitir la modificación de los diferentes parámetros que controlan la planta, generando criterio propio a los estudiantes.
- Proponer tres guías de trabajo independiente que permitan la fácil interacción con el módulo de temperatura (PID).
- Implementar un manual de usuario que brinde información clara y concisa de cómo utilizar el módulo didáctico de temperatura, tanto en hardware como en software.
- Facilitar el proceso de formación de los estudiantes acercándolos al ámbito industrial.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

## 3 MARCO TEÓRICO

### 3.1 Energía térmica

El fuego se conoce desde los inicios de la civilización humana, y no fue sino hasta el siglo XVIII que los científicos comenzaron a entender la diferencia entre los cuerpos calientes y los fríos.

Se creía que cuando un cuerpo se calentaba, un fluido invisible llamado calórico se unía al cuerpo. Así los cuerpos fríos contenían menos calórico que los cuerpos calientes. También la teoría del calórico podía explicar el aumento de tamaño de los cuerpos al calentarse, pero no podía explicar el por qué las manos se calentaban al frotarse entre sí.

A la mitad del siglo XIX, los científicos desarrollaron una nueva teoría para sustituir la del calórico. La nueva teoría suponía que la materia está compuesta por partículas muy pequeñas (átomos, moléculas) que se mueven muy rápido y, por lo tanto, tienen mayor energía que las partículas de un cuerpo frío. Esta teoría recibió el nombre de teoría cinética molecular. A la suma de la energía cinética y la energía potencial del movimiento interno de las partículas de un cuerpo se le llama energía interna o energía térmica del cuerpo.

La energía térmica se transmite de 3 formas distintas: la conducción, la convección y la radiación.

- La conducción es la manera más común en los cuerpos sólidos, ésta es la transferencia de energía cinética entre las partículas del cuerpo cuando ellas chocan, transfiriendo energía cinética las moléculas con mayor temperatura las moléculas con menos temperatura o, lo que es lo mismo, menos energía cinética. Ejemplo de conducción es una sartén con sopa, colocada sobre la estufa. El calor es conducido al material del que está hecha la sartén, lo que provoca que ésta se caliente.
- El movimiento de los fluidos (líquidos o gases) provocados por la diferencia de temperaturas y de densidades transfiere calor por convección. Las corrientes de convección de la atmósfera son las responsables del estado atmosférico de nuestro planeta. Por ejemplo, en nuestras casas hay cuartos más calientes que otros, esto es por el movimiento de las corrientes de aire dentro de ella. No tienen la misma temperatura la cocina y la sala, ni la recámara y el baño.
- La radiación es el proceso por el cual el calor se transfiere mediante ondas electromagnéticas. El calor radiante se puede reflejar o refractar, es decir, parte de él se absorbe y otra parte se refleja. Por eso los cuerpos de color oscuro absorben más rápido el calor que los objetos de color claro. Un ejemplo común de esta transferencia de energía térmica es la energía solar.

### 3.2 Temperatura

Comprendido lo anterior, se puede llegar a la conclusión de que un cuerpo caliente tiene más energía térmica que un cuerpo “frío” semejante. Esto significa que, las partículas del cuerpo

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

con mayor temperatura tienen más energía cinética y potencial que las partículas del cuerpo “frío”.

Ahora bien, ¿cómo se mide la “cantidad de calor” de un cuerpo? La cantidad de calor o el grado de calor se mide sobre una escala específica, es una propiedad de un cuerpo llamada temperatura, así que la temperatura es una medida de la energía total promedio que tiene cada partícula del objeto en estudio. En un cuerpo más caliente las partículas se mueven más rápido, debido a que tienen mayor energía cinética. Para los gases, la temperatura es proporcional a la energía cinética media o promedio de las partículas. La temperatura no depende del número de partículas que posea un objeto. La energía térmica de un objeto es proporcional al número de sus partículas, mientras que su temperatura no lo es.

La temperatura es un estado relativo del ambiente, de un fluido o de un material referido a un valor patrón definido por el hombre, un valor comparativo de uno de los estados de la materia. Por otra parte, si, positivamente, podremos definir los efectos que los cambios de temperatura producen sobre la materia, tales como los aumentos o disminución de la velocidad de las moléculas de ella, con consecuencia palpable, tales como el aumento o disminución del volumen de esa porción de materia o posibles cambios de estado.

### **3.3 Calor y temperatura, relaciones y diferencias.**

Como se ha indicado el calor y la temperatura son diferentes. La relación entre ellas es causal ya que la temperatura viene siendo un efecto de la transferencia del calor.

La temperatura nos indica hacia dónde va a fluir el calor cuando se ponen dos cuerpos en interacción; el calor pasa del cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura, hasta que ambos llegan a una temperatura estable. No es necesario que exista contacto entre dos cuerpos para que haya transferencia de calor.

Por costumbre se utiliza indistintamente el término calor o temperatura para comunicar sensaciones de calor o de frío percibidas mediante nuestro sentido del tacto. Sin embargo, el calor y la temperatura son distintos, ya que cada uno representa conceptos diferentes y tiene sus propias unidades de medición. Toda la materia, sin importar su estado físico (sólido, líquido o gaseoso), se compone de átomos y moléculas en agitación continua y, pesar de su movimiento, los átomos y moléculas pueden unirse para formar una gran cantidad de elementos y compuestos químicos, los que a su vez se combinan para formar los cuerpos. A las fuerzas que permiten estas uniones se les conoce como fuerzas de cohesión. Como estas partículas se mueven, automáticamente poseen energía cinética y el incremento en la energía interna causa un efecto en la materia que podemos percibir: el calor.

En definitiva, el calor es la energía que fluye como resultado de una diferencia de temperatura y, la temperatura es una medida de la energía cinética promedio de un determinado cuerpo.

### **3.4 Escalas de temperatura**

Anders Celsius, físico y astrónomo sueco, se basó en las propiedades del agua pura para desarrollar una escala de temperatura, conocida bajo el nombre de escala Celsius. Las

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

propiedades que utilizó Celsius fueron: el punto de congelación del agua, a la cual le asignó el valor de cero grados ( $0^{\circ}\text{C}$ ) y, el punto de ebullición del agua al nivel del mar, a la cual se asignó el valor de cien grados ( $100^{\circ}\text{C}$ ). La temperatura de nuestro cuerpo en esta escala es de  $37^{\circ}\text{C}$ .

La temperatura no tiene un límite superior, por ejemplo, la superficie del sol tiene una temperatura alrededor de  $10^4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pero sí un límite inferior. Al tomar un gas “ideal” (el cual se considera que sus partículas no tienen volumen y no interactúan entre sí) y se enfría, se puede contraer hasta tener un volumen cero a la temperatura de  $-273.15^{\circ}\text{C}$ . En este valor de la temperatura en la escala Celsius, la energía térmica del gas se suprime y es imposible reducir más su energía térmica. Lo que trae como consecuencia que no pueda existir una temperatura menor a  $-273.15^{\circ}\text{C}$ . Esta temperatura recibe el nombre de Cero Absoluto.

La escala de temperaturas que se basa en el cero absoluto se conoce como Kelvin, en esta escala el punto cero (0 K) es el cero absoluto, el punto de congelación del agua ( $0^{\circ}\text{C}$ ) es 273.15 K, y el punto de ebullición del agua ( $100^{\circ}\text{C}$ ) es 373.15 K. Esta escala debe su nombre al científico escocés Lord Kelvin, que realizó muchas contribuciones al estudio de la termodinámica.

Existe otra escala de temperaturas llamada Fahrenheit. Debe su nombre a Gabriel Daniel Fahrenheit, quien utilizó mercurio para medir la temperatura y señaló el punto de fusión o congelación del agua a  $32^{\circ}\text{F}$  y el punto de ebullición en  $212^{\circ}\text{F}$

Existen dos escalas de temperatura o dos formas de expresar el estado relativo de la materia, estas son, temperaturas absolutas y temperaturas relativas

Las escalas absolutas expresan la temperatura de tal forma que su valor cero, es equivalente al estado ideal de las moléculas de esa porción de materia en estado estático o con energía cinética nula.

Las escalas relativas, son aquellas que se refieren a valores preestablecidos o patrones en base los cuales fue establecida una escala de uso común.

En Sistema Métrico Decimal, las escalas relativas y absolutas son: la Escala Celsius o de grados Centígrados (relativa) y la Escala Kelvin (absoluta), la equivalencia entre las dos escalas es:  $\text{Grados Kelvin} = \text{Grados Centígrados} + 273$

### 3.5 Termopares

El termopar se basa en el principio, del efecto que fuera descubierto en 1821 por Seebeck, que establece que cuando la unión de dos materiales diferentes se encuentra a una temperatura diferente que la del medio ambiente, a través de esos materiales circulará una corriente. Consiste de un par de conductores de diferentes metales o aleaciones Figura 1. Uno de los extremos, la junta de medición, está colocado en el lugar donde se ha de medir la temperatura. Los dos conductores salen del área de medición y terminan en el otro extremo, la junta de referencia que se mantiene a temperatura constante. Se produce entonces una fuerza electromotriz (fem) que es función de la diferencia de temperatura entre las dos juntas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

**Figura1. Termopar industrial**



Tomada de: <https://hetpro-store.com/termopar-tipo-k-max6675/>

Puesto que la fem neta generada es función de las temperaturas de ambas juntas, se requiere el control o la compensación de la temperatura de la junta de referencia (o junta fría), lo cual se puede lograr de tres maneras distintas.

- El método básico y más exacto es el de controlar la temperatura de la junta de referencia, normalmente colocando la junta en un baño de hielo (0°C).
- Otro método consiste en medir la temperatura en la junta de referencia utilizando cualquier tipo de dispositivo de medición de temperatura, y luego, en base a esa temperatura y a la salida eléctrica de la junta de medición compensar la lectura de la temperatura de la junta de medición.
- El tercer método es una compensación eléctrica. que también implica la utilización de un dispositivo sensor de temperatura para medir la temperatura de la junta de referencia; sin embargo, en lugar de calcular la compensación a ser aplicada a la salida de la junta de medición, el sensor de temperatura de la junta de referencia se halla incorporado dentro del circuito eléctrico de la termocupla, donde agrega o quita los milivolts necesarios en la junta de referencia a fin de corregir automáticamente la salida de la termocupla.

El uso de termopares en la industria se ha popularizado, ya que son altamente precisos y muchos más económicos que las termo resistencias, estas constituyen hoy en día el sistema de medición de temperatura más usado y de mejor acceso. Esta forma de medición abarca el rango de temperaturas requerido para la mayoría de las mediciones exigidas, teniendo rangos entre -250°C hasta 2000°C y más si fuera necesario ver como ejemplo la tabla 1, para un termopar tipo K.

**Tabla1. Termopar tipo k**

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

Termocupla tipo K - Equivalencias: grados celsius - milivoltios													
°C	mV	°C	mV	°C	mV	°C	mV	°C	mV	°C	mV	°C	mV
0	0,00	200	8,13	400	16,40	600	24,91	800	33,30	1000	41,31	1200	48,89
10	0,40	210	8,54	410	16,82	610	25,34	810	33,71	1010	41,70	1210	49,25
20	0,80	220	8,94	420	17,24	620	25,76	820	34,12	1020	42,09	1220	49,62
30	1,20	230	9,34	430	17,67	630	26,19	830	34,53	1030	42,48	1230	49,98
40	1,61	240	9,75	440	18,09	640	26,61	840	34,93	1040	42,87	1240	50,34
50	2,02	250	10,16	450	18,51	650	27,03	850	35,34	1050	43,25	1250	50,69
60	2,43	260	10,57	460	18,94	660	27,45	860	35,75	1060	43,64	1260	51,05
70	2,85	270	10,98	470	19,37	670	27,87	870	36,15	1070	44,02	1270	51,41
80	3,26	280	11,39	480	19,79	680	28,30	880	36,55	1080	44,40	1280	51,76
90	3,68	290	11,80	490	20,22	690	28,72	890	36,96	1090	44,78	1290	52,11
100	4,10	300	12,21	500	20,65	700	29,14	900	37,36	1100	45,16	1300	52,46
110	4,51	310	12,63	510	21,07	710	29,56	910	37,76	1110	45,54	1310	52,81
120	4,93	320	13,04	520	21,50	720	29,98	920	38,16	1120	45,92	1320	53,16
130	5,33	330	13,46	530	21,92	730	30,39	930	38,56	1130	46,29	1330	53,51
140	5,73	340	13,88	540	22,35	740	30,81	940	38,96	1140	46,67	1340	53,85
150	6,14	350	14,29	550	22,78	750	31,23	950	39,35	1150	47,04	1350	54,20
160	6,54	360	14,71	560	23,20	760	31,65	960	39,75	1160	47,41	1360	54,54
170	6,93	370	15,13	570	23,63	770	32,06	970	40,14	1170	47,78	1370	54,88
180	7,33	380	15,55	580	24,06	780	32,48	980	40,53	1180	48,15		
190	7,73	390	15,98	590	24,48	790	32,89	990	40,92	1190	48,52		

Tomada de: [http://www.manises.com/forum/topic.asp?TOPIC\\_ID=1105](http://www.manises.com/forum/topic.asp?TOPIC_ID=1105)

### 3.7 Controlador universal

Los controladores universales aparecen como respuesta a las necesidades de minimizar las variaciones presentadas en la operación de los sistemas, estos controladores permiten la implementación de técnicas convencionales de suicheo (control ON-OFF), de regulación (control PID) o una combinación de ambos

El control PID permite regular el comportamiento del sistema basado en tres parámetros básicos de control, representados en una acción proporcional, una acción derivativa y una acción integral. Es necesario sintonizar cada una de estas acciones con el fin de garantizar un control que cumpla con las especificaciones. Las acciones de control de forma individual aportan determinadas características que pueden ser utilizadas independientes o combinadas, cada una tiene un parámetro definido.

- On-off: (banda diferencial).
- Proporcional: P (Kp o BAPO).
- Integral: I (ti o Ki).
- Derivativo: D (td o Kd).

Ejemplo de usos a nivel industrial

- Control de temperatura en incubadoras de recién nacidos; En este tipo de aplicaciones se requiere una precisión de +/- 1°C. No se admiten sobre impulsos de más del 5%.
- Control de temperatura en incubadoras para aves comerciales. Es utilizado para finalizar la gestación del ave dentro del huevo. No requiere de un control muy preciso, Comúnmente se debe regular la temperatura a 37°C.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

- Control de temperatura para estudios del plasma de la sangre. En este, la temperatura debe permanecer constante a 37°C sin sufrir variación alguna.

### 3.9 Arduino UNO.

Las placas Arduino son una plataforma de desarrollo de micro controlador que es compatible con una serie de dispositivos electrónicos e interfaces de interacción con los cuales se pueden desarrollar múltiples proyectos.

Anatomía de Arduino Uno.

Pines digitales, pueden utilizarse con `digitalRead ()`, `digitalWrite ()` y `analogWrite ()`. `analogWrite ()` funciona solo en los pines con el símbolo PWM. Pin 13 LED El único actuador incorporado a su placa. Además de ser un objetivo práctico para su primer boceto de parpadeo, este LED es muy útil para la depuración. Anatomía de un Micro controlador ATmega. LED de encendido Indica que está recibiendo energía. Útil para la depuración. Con Entrada analógica, estos pines son usados con `analogRead ()`. Pines GND y 5V Utilice estos pines para proporcionar una potencia de + 5V y tierra a sus circuitos. Conector de alimentación. Puede aceptar voltajes entre 7-12V. Los LEDs TX y RX, indican la comunicación entre su el micro y su computadora. Espere que parpadeen rápidamente durante la carga del boceto, así como durante la comunicación serial. Es útil para la depuración. El puerto USB es usado para alimentar su micro, cargar sus bocetos y para comunicación a través de Serial.

Botón Restablecer Restablece el micro controlador ATmega.

**Figura 2. Arduino UNO.**



Tomada de: <https://www.ardobot.com/arduinouno.html>

### 3.10 Horno eléctrico.

Elemento que Trabaja a una temperatura superior a la que está el ambiente y que, por lo tanto, transmite de manera directa algo de calor a un material específico, para causar algún efecto en él, ya sea fundirlo, ablandarlo o recubrirlo con otro material que a temperatura ambiente no se presta para este proceso

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

### 3.11 Extractor de aire.

Un extractor de aire es un aparato destinado a aspirar y renovar el aire de una estancia. Está compuesto por un ventilador conectado a un motor que le transfiere el movimiento.

### 3.12 Controlador de temperatura universal o estándar (DELTA DTA4848V0)

Los controladores industriales universales, son útiles porque se acomodan fácilmente a las necesidades del usuario, esto es: número de estradas, número de salidas, variables del mismo tipo, variables de diferente tipo, visualización numérica, o por pantalla de variación de la variable en tiempo real, tamaño, entre otras.

El controlador universal utilizado en el proyecto tiene las siguientes características según el serial con que lo identifica el fabricante

**Tabla2. Características del controlador DTA4848V0**

DTA □□□□ □ □-□ ①      ②      ③      ④      ⑤		DTA4848V0	
1	DTA: controlador de temperatura delta serie A	<b>Figura 3.</b> <b>Controlador universal</b> 	PV: temperatura actual
2	4848: tamaño del panel Alto 48mm, Ancho 48mm		SV: set point
3	Tipo de salida R: Relay 250VAC, 5A V: pulso de voltaje 14V+10% a 20% (max 20mA) C: corriente 4 a 20 mA		AT: auto tuning activado
4	Comunicación opcional 0: sin interface 1:RS-485		OUT: salida encendida
5	Transferomador de corriente(CT) None: sin funcion CT T: incluye transformador de corriente		 Tecla arriba  Tecla abajo  Tecla de funciones  Tecla de modo

### 3.13 Relé de estado solido

El relé de estado sólido (SSR, por sus siglas en inglés) es un elemento que permite aislar eléctricamente el circuito de entrada o mando y el circuito de salida.

Las diferentes partes que forman un SSR son:

- Circuito de entrada
- Aislamiento, está asegurado generalmente por un acoplamiento óptico con semiconductor (Fotoacoplador, fototriac, entre otros)

Un relé de estado sólido con función de paso por cero opera cuando la tensión de la carga (tensión alterna) se acerca o alcanza el punto cero. Los relés con esta función tienen una buena inmunidad a los parásitos de entrada y producen unas bajas radiaciones parásitas al conmutar tensiones bajas. Los relés de estado sólido con la función de detección de paso por cero son adecuados para cargas resistivas, capacitivas y cargas inductivas con un factor de potencia entre 0.7 y 1

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

- Circuito de salida, Salida CA con tiristores anti paralelos o triacs, salida CC con transistor bipolar o MOS FET, salida CA-CC con transistor MOS FET (ya que tiene igual ganancia en directo que en inverso)

**Figura 4. Relé de estado sólido.**



Tomada de: <http://www.electrical-relay.es/4-solid-state-relay-13.html>

### 3.14 Modulo sd.

Permite insertar una memoria Micro SD que son las más comunes en el mercado, el modulo se puede alimentar con 3.3V o 5V usando los pines respectivos	<b>Figura 5. Módulo SD.</b>
	
Tomada de: <a href="http://www.naylampmechatronics.com/blog/38_Tutorial-Arduino-y-memoria-SD-y-micro-SD-.html">http://www.naylampmechatronics.com/blog/38_Tutorial-Arduino-y-memoria-SD-y-micro-SD-.html</a>	

### 3.15 Módulo MAX6675.

Escala la compensación y liberalización de la respuesta del sensor con un ADC. La resolución es de 0.25° y el rango de uso de la tarjeta es de 3.0V a 5.5V, por lo que la puedes utilizar con cualquier micro controlador o tarjeta de desarrollo. La temperatura de operación de la tarjeta es de -20°C a 80°C	<b>Figura 6. Módulo MAX6675</b>
	
Tomada de: <a href="http://henrysbench.capnfatz.com/henrysbench/arduino-temperature-measurements/max6675-temp-module-arduino-manual-and-tutorial">http://henrysbench.capnfatz.com/henrysbench/arduino-temperature-measurements/max6675-temp-module-arduino-manual-and-tutorial</a>	

### 3.16 Descripción detallada de elementos usados.

**Tabla 3. Componentes del módulo de control de temperatura**

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
----------	-------------

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

Sensor de temperatura (termopar tipo K):	Salida Digital Temperatura entre -200 y 1200 Alta resolución de trabajo
Arduino UNO	Alimentación de + 5V Acepta voltajes entre 7-12V. Puerto USB
Controlador (DELTA DTA4848V0)	Entrada de voltaje: 100 – 240 VAC 50/60 HZ Consumo de potencia: 5VA máximo Display de 7 segmentos Tipo de sensor Termocupla K, J, T, E, N, R, S, B, U, L y TXK Modo de control: PID / ON-OFF Salida de control: 14 VDC máximo
Horno eléctrico (Tecnecilindros)	Temperatura ambiente hasta 250 Alimentación a de 100 a 120v Cuenta con 2 resistencias parte superior he inferior Funcionamiento en paralelo Material Acero inoxidable
Extractor de aire (OGIHARA MPG)	Alimentación de 100 a 120v Trabaja a 50 o 60 HZ Potencia 9.3-10.3 W
Modulo sd	Alimentación con 3.3V o 5V
Relé de estado solido	Alimentación 432v DC Salida 25 max 24 a 575V AC
Módulo MAX6675	La resolución es de 0.25° Alimentación con 3.3V o 5V Rango de temperatura 20°C a 80°C

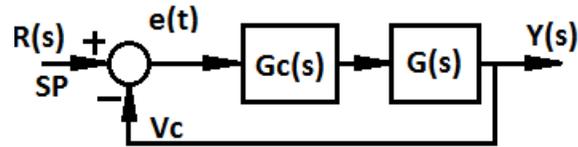
### 3.17 Control Continuo Regulado.

El control automático de procesos aparece de la necesidad de modificar el comportamiento de un sistema, debido a que no siempre trabajan bajo los parámetros requeridos para su óptima operación.

Una de las formas usadas para controlar un sistema consiste en que, al lazo abierto  $G(s)$ , se le adicione un bloque de control universal  $G_c(s)$ , anterior a este y cerrar el lazo con una realimentación negativa como en la Figura 1, con el fin de modificar la dinámica del sistema, minimizando así posibles errores ocasionados por las perturbaciones internas y externas al proceso.

**Figura 7. Sistema de control realimentado.**

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27



El error generado o error actuante  $e(t)$  se calcula a partir de la comparación entre la variable controlada o salida del proceso  $V_c$  y una señal de entrada de referencia o set-point  $R(s)$ , quedando así:  $e(t) = SP - V_C$

Con esta arquitectura se busca principalmente minimizar el error, lo que se ve reflejado en:

- Los tiempos de operación del sistema
- Los reprocesos y pérdida de producto por mala manipulación de las variables
- Los consumos energéticos excesivos
- El sobreesfuerzo de los actuadores (E.F.C) para incrementar su tiempo de vida útil
- Los riesgos de operación tanto para los sistemas como para el personal operativo
- Los cambios anticipados de los equipos por reducción de su vida útil debido a una mala operación

La implementación de técnicas de control clásico fueron propuestas en su momento por grandes matemáticos como J.C. Maxwell que en 1868 implementó ecuaciones diferenciales para determinar el modelo matemático del regulador a bolas de Watt, logrando con este estudio el análisis de la estabilidad a partir del comportamiento de las raíces reales negativas de la ecuación característica del sistema y después se mejora con el criterio de estabilidad algebraico propuesto por Routh y Hurwitz entre los años 1884 y 1895.

Estos tratamientos matemáticos fueron mejorados al utilizar las transformadas de Laplace y de Fourier abriendo grandes posibilidades a la Ingeniería para aplicar estas técnicas a problemas de control industrial. Los controladores universales o genéricos aparecen como respuesta a las necesidades de minimizar las variaciones presentadas en la operación de los sistemas, estos controladores permiten la implementación de técnicas convencionales de suicheo (control ON-OFF), de regulación (control PID) o una combinación de ambos.

### Principales características del PID

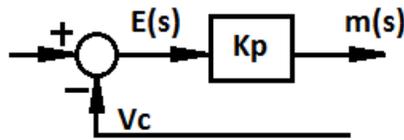
- **Acción P:**

También conocida como gradual o modulante, es la base de los diferentes modos de configuración del controlador PID. Esta acción representa un cambio en la salida del controlador multiplicada por un valor del cambio en la señal medida o variable de control llamado ganancia del controlador  $K_p$  o  $K_c$  (dependiendo del referente) para lograr que el error del sistema se reduzca lo más cercano a cero. genera cambios proporcionales de la salida con respecto los cambios del sistema ya sean de la entrada o por perturbaciones.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

Según la Figura 6 se tiene la siguiente relación:  $m(s)=K_p \cdot E(s)+b$

**Figura 8. Acción de control proporcional**



Es así como la respuesta de un controlador P es igual a la ecuación de una línea recta, , donde: la pendiente representada en función del error es la ganancia proporcional y el intercepto con el eje representa el BIAS que equivale al valor de la señal de salida cuando el SP y la VC sean iguales.

Existe por lo tanto una relación de linealidad entre la acción de control  $m(s)$  y la señal de error  $E(s)$ , determinada por el parámetro  $K_p$  o ganancia proporcional, que de forma genérica es un amplificador con ganancia variable.

De forma genérica del controlador P se representa por:  $K_p=(m(s)) / (E(s))$  o incluyendo el Bias  $K_p=(m(s)-b) / (E(s))$

Según el fabricante del controlador se puede trabajar con el parámetro  $K_p$  o con BAPO (banda proporcional), este último expresa el intervalo de error en el que, el controlador se puede saturar, ( $1 \leq \text{BAPO} \leq 500$ ), a medida que crece BAPO disminuye  $K_p$  y la sensibilidad al cambio del sistema ante una perturbación, según la relación:  $K_p=(100\%)/\text{BAPO}$  (7)

Con el control P se define la sensibilidad de la respuesta del sistema controlado. Teniendo en cuenta lo anterior si el rango de trabajo de un controlador P se define entre valores infinito y cero se estaría programando el equivalente a un controlador on-off.

Además, es importante entender que ocurre cuando se fijan valores extremos en un controlador P:

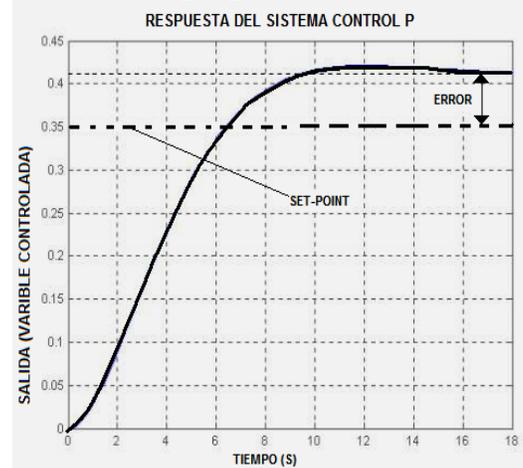
Si se fija un valor de ganancia muy alto, el sistema tiende a oscilar ante cambios en la referencia o debido a perturbaciones del sistema.

Cuando se fija un valor de ganancia muy bajo, la respuesta del sistema tiende a ser estable en condiciones de estado estable, pero al tener estímulos por cambio en el SP o por perturbaciones, la respuesta del sistema tendría retardo o sería muy lenta perjudicando la respuesta general del sistema.

#### **Principales características del P**

- Trabaja en función del error y tiene una relación lineal entre la VC y posición del EFC.
- Parámetro principal Kp va desde 0 a ∞, o Bapo en un rango entre 0% y 500% (teniendo en cuenta las consecuencias de usar valores extremos), pueden cambiar según el fabricante.
- Ante perturbaciones prolongadas no tiene la capacidad para regresar la VC al punto de trabajo inicial, siempre deja un error de OFFSET entre la variable de control y el set-point,
- Para compensar la poca exactitud se necesita el complemento de una acción integral.
- Se utiliza en control de iluminación para que al encender las luminarias se haga con un valor proporcional a la iluminación del ambiente.
- Es útil en la regulación de presión de gases ajustando un Kp grande. Debido a la estabilidad propia de la presión.

**Figura 9. Respuesta de un control proporcional**



- **Acción Integral (I)**

Matemáticamente al integrar una variable con respecto al tiempo se está acumulando el valor de esa variable mientras avanza el tiempo referenciado en un SP.

En nuestro caso de un controlador genérico, se obtiene una salida proporcional a la integral acumulada del error actuante, lo cual sirve para determinar el error de OFFSET dejado por la acción proporcional para así poder eliminarlo.

Una acción de control P sólo regula que tan lejos debe moverse proporcionalmente la salida ante los cambios del proceso, lo que deja un vacío en la regulación del sistema que debe cubrir la acción integral, esta entonces se encarga de mover constantemente la salida hasta eliminar el OFFSET dentro de un rango de error permisible, dejando de generar cambios en la salida del controlador. Como efecto colateral genera lentitud en la estabilización del sistema ante estímulos debidos a cambios en el SP o a perturbaciones propias o externas al proceso controlado. Otro de los efectos de este algoritmo es que se incrementa la frecuencia de oscilación del sistema en comparación a la provocada por el control P.

Su parámetro principal es Ki (Ganancia Integral) y puede estar representado en RPM o RPS.



$$m(t) = Ki \int e(t)dt + b \qquad \frac{m(s)}{E(s)} = \frac{Ki}{S}$$

- **Control Proporcional Integral (PI)**

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

Como respuesta a los errores estacionarios, el controlador del sistema utiliza la suma de las acciones proporcional e integral.  $C_{PI} = K_p * e(t) + (K_p / t_i \int e(t)dt)$

Parámetros del control PI:  $K_p$ , y  $T_i$  o  $K_i$ , donde:

$K_p$ : el mismo de la acción proporcional.

$T_i$  [min] o constante de tiempo integral: es el tiempo que se demora la acción integral trabajando sola para entregar una salida igual a la que dio inicialmente la parte proporcional.

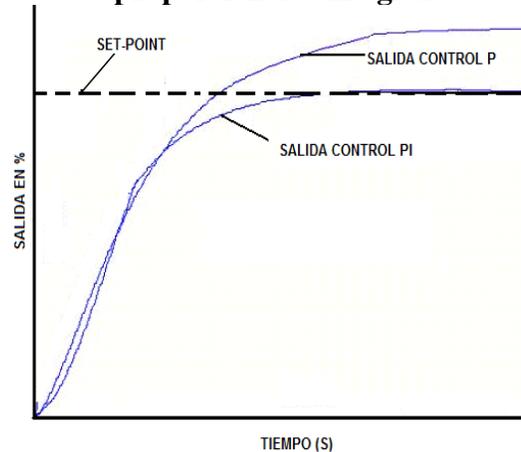
$K_i$  Es otra forma de trabajar el parámetro de la acción integral, esta es en función del tiempo integral  $T_i$ , donde:  $K_i = K_p / t_i$

Luego la función del controlador sería:  $(m(s))/(E(s)) = ((K_p * t_i * S + K_p) / (t_i * S))$

### Principales características del PI

- Trabaja en función del error y del tiempo.
- Principalmente corrige el error de la acción proporcional.
- Es utilizado en la mayoría de procesos industriales, especialmente en los que tienen constantes de tiempo elevadas y retardos desde moderados hasta altos.
- Con este algoritmo se logra muy buena exactitud, estabilidad y algo de velocidad de respuesta.
- Puede sobrecorregir el error, por lo tanto, puede presentar inestabilidad en el sistema.
- Es usado para el control de la velocidad en sistemas de control numérico, también en la regulación del caudal y presión en líquidos utilizando un  $t_i$  elevado, para la regulación de nivel ocurre lo mismo, aunque puede prescindirse de la acción integral si el error es aceptable.
- Se usa en la regulación de temperatura y presión de vapor, siempre y cuando la inercia del sistema no sea demasiado pequeña.

**Figura 10. Respuesta de un control proporcional + integral**



- **Acción Derivativa o rate (D)**

Matemáticamente es un cálculo similar a la integral, la derivada expresa la tasa de cambio de una variable respecto a otra, en nuestro caso define que tan rápido debe cambiar la VC en el tiempo, por ejemplo, cuando la VC cambia a una velocidad alta, la acción derivativa hace que el EFC trabaje en la dirección contraria para compensar la salida no deseada.

Para este algoritmo se tiene que la salida es proporcional a la derivada del error o entrada.



 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

$$m(t) = K_d \frac{dE(t)}{dt} \qquad \frac{m(s)}{E(s)} = K_d * S$$

- El factor de la acción derivativa está dado en minutos o segundos.
- Trabaja en función de la velocidad de cambio de la variable de control, aportando rapidez a la respuesta del sistema.
- La acción actuando en forma individual no tiene un uso práctico.

### Control PID

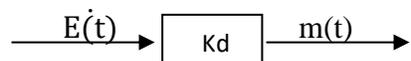
Reúne las características de los algoritmos P+I+D, trabajando en función del tiempo, el error y la velocidad de cambio de la VC de la planta. Trabaja con la siguiente ecuación diferencial:

$$C_{PID} = K_p * e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

**Kp:** constante de sintonización proporcional, reacciona sobre el error, pero cuando no logra corregirlo completamente debido a fuertes ruidos en el sistema es insuficiente para controlarlo totalmente y se apoya en la acción integral.

**Ki:** constante de sintonización integral que al integrar el error actuante lo disminuye al mínimo, sin embargo, por su efecto integral puede aumentar el error por los valores antes corregidos.

**Kd:** constante derivativa, actúa inmediatamente cuando se le introduce una perturbación al sistema, disminuyendo el tiempo necesario para eliminarlo. la función de transferencia del controlador Kd será:



En la implementación se tiene que el trabajo de las tres constantes es aditivo y su acción individual no depende de las demás; sin embargo, algunos fabricantes trabajan con la fórmula que está variando la acción del controlador en función del valor que le sea asignado a la constante proporcional ya que es un factor multiplicativo de sus tres constantes.

$$C_{PID} = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

Luego

$$\frac{m(s)}{E(s)} = \left( \frac{K_p * T_i * T_d * S^2 + K_p * T_i * S + K_p}{T_i * S} \right),$$

tenga en cuenta que

- $T_i = \frac{K_p}{K_i}$ , define el tiempo que tarda la acción integral en igualar a la proporcional si el error fuera cero.

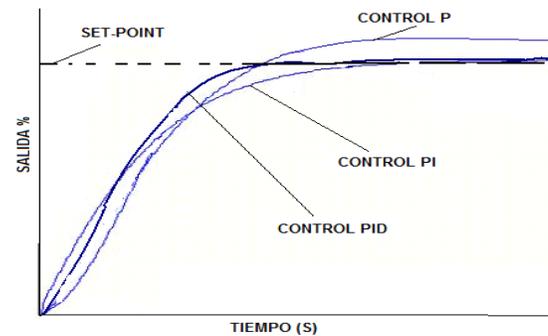
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

- $Td = \frac{Kd}{Kp}$ , que necesita tener un valor de Kd no muy alto para evitar que la acción del actuador sea muy violenta.

### Principales características del PID

- **Acción P:** genera cambios proporcionales de la salida con respecto los cambios del sistema ya sean de la entrada o por perturbaciones.
- **Acción I:** genera un cambio en el tiempo de la señal de salida con respecto del error del sistema, busca eliminar el error acumulado en el tiempo, modificando señal de salida hasta eliminar completamente este error.
- **Acción D:** en función de la rapidez en el cambio de la entrada con respecto al tiempo, se modifica proporcionalmente la señal de salida. Esta acción anticipa los posibles sobreimpulsos del sistema.
- En este sistema se espera que las oscilaciones en la salida sean mínimas, la exactitud tenga un rango de desvío muy bajo y la velocidad de respuesta sea rápida

**Figura 11. Respuesta de un control proporcional + integral + derivativo**



### Usos del PID

- Cuando los sistemas tengan dinámicas de primer y segundo orden.
- En sistemas que requieran incrementar la velocidad de respuesta del sistema.
- Cuando se requiera disminuir los sobre impulsos del sistema, se hace, con la acción derivativa, incrementando la acción proporcional y elevando la velocidad de respuesta.
- Más del 70% de los lazos de control industrial utilizan PID, siendo específicamente el PI el más utilizado de ellos.
- Procesos en los cuales se utiliza el control PID:
  - Servicios industriales, como:
    - Generación y distribución de vapor.
    - Aire acondicionado.
    - Distribución y transporte de energía.
    - Refrigeración.
  - En los que se manejen variables como:
    - Temperatura.
    - Velocidad.
    - Mecanizado, sistemas CNC.
    - Procesos de reacciones Químicas.
    - Nivel.
    - Presión.
    - Flujo.
    - Dosificación

### 3.18 Identificación de sistemas por curva de reacción.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

- **Identificación de Sistemas**

Con la automatización de procesos industriales, se busca garantizar las condiciones de operación óptimas de sus variables, lo que implica hacer un análisis del funcionamiento de los sistemas y determinar los puntos de operación con sus respectivos rangos de error permisible; este tipo de análisis se puede hacer a nivel práctico a partir de una identificación experimental, esta es una las técnicas más usadas en el control de procesos industriales, interactuando directamente con el proceso, lo que implica pérdida de producción, sobrecarga en los componentes del proceso mismo y de los instrumentos del lazo de control, entre otros.

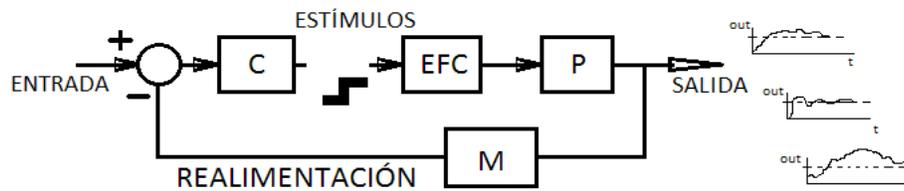
Po lo anterior, se hace necesario tener experiencia en los procedimientos utilizados para tal fin, que minimicen las consecuencias de la manipulación de los componentes para obtener los resultados que permitirán al análisis y posterior identificación del sistema, uno de los métodos con que se logra lo anterior es el de la curva de reacción este sistematiza una serie de procedimientos fundamentados en la estadística aplicada y la teoría de control clásica.

- **Curva de reacción**

Es un método de identificación no paramétrico planteado en 1942 por Ziegler y Nichols que hace un análisis transitorio de un sistema ante diferentes estímulos tipo escalón. Se utiliza para aproximar una respuesta a un sistema de primer o segundo orden ya sean críticamente amortiguados o sobreamortiguados Esta técnica es utilizada cuando no es posible modelar un sistema desde el concepto teórico o se hace muy complejo hacerlo. Es relevante cuando se pueden tomar datos experimentales del comportamiento dinámico de las variables de un sistema al ser excitado con estímulos conocidos en presencia de perturbaciones, para esto es indispensable tener bien definidas las entradas y las salidas.

El método consiste en realizar una serie de pruebas para conocer el comportamiento de la o las variables a controlar de un sistema que debe estar en funcionamiento manual (configuración de lazo abierto), esto se logra generando variaciones definidas del actuador o elemento final de control.

**Figura 12. Sistema de lazo abierto para curva de reacción**



- **Procedimiento método de Curva de reacción**

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

- **Conocimiento del sistema:** requiere que el automatizador conozca muy bien el proceso y sus componentes, debe conocer las variables que lo rigen y entender su dinámica, de igual forma, se debe conocer el o los puntos de operación y las posibles perturbaciones tanto internas como externas que lo afectan, entre otros.
- **Recolección de bases de datos:** lo primero es diseñar un experimento que permita leer las variaciones del sistema ante los estímulos generados, los resultados se deben guardar en una base de datos, ya sea física o digital, se requiere que sea lo suficientemente grande para lograr conocer su dinámica. Para obtener buenos resultados, los estímulos se hacen tanto de forma creciente como decreciente, además, deberían tener diferentes magnitudes, en lo posible se trabaja alrededor del punto de operación de la planta
- **Obtención y selección del modelo:** con la información antes obtenida se aplican los siguientes pasos.
  - Sistema de primer orden (POR):

$$FT = \frac{Ke^{-\theta' s}}{\tau s + 1}, \text{ donde}$$

- K: ganancia del sistema
- $\theta'$ : retardo o tiempo muerto
- $\tau$ : constante de estabilización

**Figura 13. Curva de reacción sistema POR**



- Determinar la salida en estado estable del sistema (See).
- Calcular  $K = \text{See} / \text{Escalón}$ .
- Calcular el 28.3% de la See (P1).
- A partir de P1, trace una línea perpendicular a la salida (eje y) hasta cortar la línea de la respuesta, luego trazar una línea perpendicular desde este punto hasta cortar la línea del tiempo (eje x), este nuevo punto será t1.
- Calcular el 63.2% de la See (P2).
- A partir de P2, trace una línea perpendicular a la salida (eje y) hasta cortar la línea de la respuesta, luego trazar una línea perpendicular desde este punto hasta cortar la línea del tiempo (eje x), este nuevo punto será t2.
- Calcular  $\theta'$  y  $\tau$  a partir del siguiente sistema de ecuaciones simultáneas:

$$\theta' + \frac{\tau}{3} = t1 \quad \text{y} \quad \theta' + \tau = t2$$

- El sistema no tiene retardo si  $\theta' < \frac{\tau}{10}$ , luego la FT resultante es:

$$FT = \frac{K}{\tau s + 1}$$

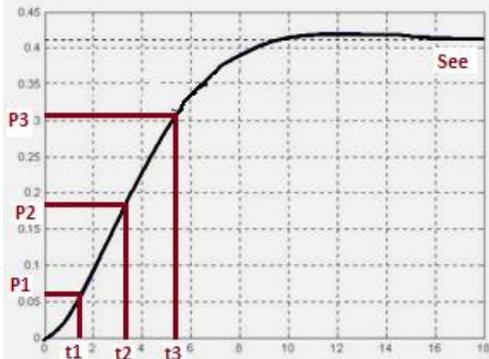
- Sistema de segundo orden (SOR)

$$FT = \frac{K\omega n^2 e^{-\theta' s}}{s^2 + 2\xi\omega n s + \omega n^2}, \text{ donde}$$

- K: ganancia del sistema
- $\theta'$ : retardo o tiempo muerto
- $\omega n$ : frecuencia de oscilación del sistema
- $\xi$ : coeficiente de amortiguación del sistema, dependiendo del valor puede ser:
  - Sobreamortiguados  $\xi > 1$
  - Críticamente amortiguados  $\xi = 1$
  - Subamortiguados  $0 < \xi < 1$
  - Oscilatorios  $\xi = 0$ .

- Determinar la salida en estado estable del sistema (See).
- Calcular  $K = \text{See} / \text{Escalón}$ .
- Calcular el 15% de la See (P1).
- A partir de P1, trace una línea perpendicular a la salida (eje y) hasta cortar la línea de la respuesta, luego trazar una línea perpendicular desde este punto hasta cortar la línea del tiempo (eje x), este nuevo punto será  $t_1$
- Calcular el 45% de la See (P2).
- A partir de P2, trace una línea perpendicular a la salida (eje y) hasta cortar la línea de la respuesta, luego trazar una línea perpendicular desde este punto hasta cortar la línea del tiempo (eje x), este nuevo punto será  $t_2$ .
- Calcular el 75% de la See (P3).
- A partir de P3, trace una línea perpendicular a la salida (eje y) hasta cortar la línea de la respuesta, luego trazar una línea perpendicular desde este punto hasta cortar la línea del tiempo (eje x), este nuevo punto será  $t_3$ .
- Calcular  $\theta'$ ,  $\omega n$  y  $\xi$  del siguiente sistema de ecuaciones.

Figura 14. Curva de reacción sistema SOR



$$x = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} \quad \xi = \frac{0.0805 - 5.547(0.475 - x)^2}{x - 0.356}$$

$$F_2(\xi) = \begin{cases} 2.6\xi - 0.6 & \xi \geq 1 \\ 0.708(2.811)^\xi & \xi < 1 \end{cases}$$

$$\omega n = \frac{F_2(\xi)}{t_3 - t_1} \quad F_3(\xi) = 0.922(1.66)^\xi \quad \theta' = t_2 - \frac{F_3(\xi)}{\omega n}$$

El sistema no tiene retardo si  $\theta' < 0$ , luego la FT es:

$$FT = \frac{K\omega n^2}{s^2 + 2\xi\omega n s + \omega n^2}$$

- **Validación del modelo:** consiste en evaluar el comportamiento de cada modelo obtenido ante un estímulo igual al usado para la toma de la base de datos, esto se hace comparando el modelo resultante con la base de datos original (se hace tanto para primer orden como para segundo orden), es importante resaltar que no es común tener errores cercanos a cero en la identificación realizada, siempre quedará un margen de error. La experticia y criterio del automatizador permitirán seleccionar el modelo más adecuado y representativo del sistema.

### 3.19 Técnica de sintonización de controladores PID

El diseño de un controlador puede hacerse utilizando diferentes técnicas que exigen de conocimientos técnicos específicos del sistema para atender las características y perturbaciones propias de los procesos, por esto se debe elegir la combinación de algoritmos y los valores cada una de las constantes respectivas, para lograr esto se han desarrollado varias técnicas, como: sintonización por ensayo y error o tanteo, método de curva de reacción de Ziegler y Nicholls, Lugar Geométrico de las Raíces, Ganancia límite, entre otros.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

- **Ensayo y error (tanteo):** Requiere que el proceso y el controlador estén trabajando en conjunto (lazo cerrado). Consiste en poner en marcha el proceso con bandas anchas en todas las acciones de control (ganancias pequeñas) e ir las estrechando poco a poco e individualmente hasta encontrar la estabilidad deseada, siguiendo el siguiente procedimiento:
  - A. Crear cambios en el proceso realizando variaciones en el set-point del sistema (perturbaciones) crecientes y decrecientes, dando intervalos de tiempo en los que el sistema responda adecuadamente a cada variación y se pueda observar el efecto total del de cada ajuste.
  - B. Ajuste del control proporcional (P) la sintonización comienza colocando una banda proporcional muy alta y paulatinamente se va disminuyendo, a la vez que se observa el comportamiento del sistema, esto se realiza hasta obtener la estabilidad requerida.
  - C. Se debe tener en cuenta que al estrechar la banda proporcional se incrementa la inestabilidad y al ampliarla se incrementa el error de estado estable.
  - D. Ajuste del Control PI para este se comienza con un tiempo integral cero o en su valor más bajo, se realiza el procedimiento anterior hasta lograr una relación de amortiguamiento de 0.25, para evitar que la acción integral puede desestabilizar el sistema se trabaja con una ganancia ( $K_p$ ) pequeña y se incrementa en pasos pequeños el tiempo integral hasta que se creen oscilaciones constantes, creando siempre perturbaciones controladas para observar el funcionamiento del sistema ante los parámetros colocados, el último tiempo ensayado se reduce un poco.
  - E. Ajuste del control PID con el tiempo integral y el derivativo en su valor mínimo, se realiza el procedimiento anterior, pero al final se trabaja con el tiempo derivativo realizando incrementos pequeños, acompañados de cambios en el set-point hasta obtener un comportamiento cíclico, se disminuye un poco la última variación del tiempo derivativo. Por último, se aumenta un poco la ganancia proporcional para obtener mejores resultados.

Esta técnica requiere de mucho tiempo de dedicación y utilizar el sistema, lo que incluye gastos energéticos y retardos en la producción, pero permite trabajar ON LINE o hacer ajustes a controladores previamente parametrizados o autozintonizados

- **Sintonía por el Método de curva de reacción (Ziegler- Nicholls):** Esta técnica presentada en 1942, se basa en la suposición de que la función de transferencia de lazo abierto de un sistema se pueda aproximar a la de un sistema de primer orden con retardo.  $FT = \frac{K e^{-\theta'}}{\tau s + 1}$ , Para esto debe tener en cuenta que:

$\theta = \theta' + \tau/2$ ,  $K_d = T_d * K_p$  y  $K_i = K_p / T_i$ . Los parámetros de ajuste del controlador se obtienen a partir de una de las tablas propuestas por Z-N que se dan a continuación

**Tabla 4. Algoritmos para controladores PID por Ziegler y Nichols**

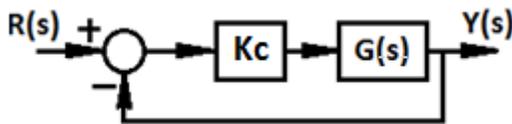
TABLA 1. Z-N	TABLA 2. Z-N	TABLA 3. Z-N
--------------	--------------	--------------

ACCION DE CONTROL	PARÁMETROS DEL CONTROLADOR			ACCION DE CONTROL	PARÁMETROS DEL CONTROLADOR			ACCION DE CONTROL	PARÁMETROS DEL CONTROLADOR		
	Kp	Ti	Td		Kp	Ti	Td		Kp	Ti	Td
P	$\frac{\tau}{K\theta}$	-----	-----	P	$\frac{\tau}{\theta}$	$\infty$	0	P	$\frac{\tau}{K\theta} \left(1 + \frac{\theta}{3\tau}\right)$	-----	-----
PI	$\frac{0.9\tau}{K\theta}$	3.33 $\theta$	-----	PI	$\frac{0.9\tau}{\theta}$	$\frac{\theta}{0.3}$	0	PI	$\frac{\tau}{K\theta} \left(\frac{9}{10} + \frac{\theta}{12\tau}\right)$	$\theta \left(\frac{30 + \left(\frac{3\theta}{\tau}\right)}{9 + \left(\frac{20\theta}{\tau}\right)}\right)$	-----
PID	$\frac{1.2\tau}{K\theta}$	2 $\theta$	0.5 $\theta$	PID	$\frac{1.2\tau}{\theta}$	2 $\theta$	0.5 $\theta$	PID	$\frac{\tau}{K\theta} \left(\frac{4}{3} + \frac{\theta}{4\tau}\right)$	$\theta \left(\frac{32 + \left(\frac{6\theta}{\tau}\right)}{13 + \left(\frac{8\theta}{\tau}\right)}\right)$	$\left(\frac{4\theta}{11 + \left(\frac{2\theta}{\tau}\right)}\right)$

- **Lugar geométrico de las Raíces**

Se fundamenta en el análisis gráfico de polos y ceros de la FT de un sistema para un determinado valor de Kc y poder determinar un rango de valores en el que el sistema es estable. Es una herramienta utilizada para hacer el análisis del comportamiento de un sistema trabajando en lazo cerrado, esto consiste en agregarle a un sistema G(s) un parámetro Kc, cerrar el lazo con una realimentación unitaria negativa y a partir de la ecuación característica, obtener los valores que hacen estable el sistema, para esto se debe usar criterio de Roth.

Figura 15. Lazo cerrado para generar LGR



Los polos resultantes, se grafican por ejemplo con las herramientas de Matlab (RTOOL, RLOCUS O SISOTOOL) y en esta se puede analizar lo siguiente

- En el plano S, cuanto más cerca esté un polo del eje imaginario se dice que es más dominante, además se puede decir que el sistema tiene un tiempo de estabilización muy alto.
- Mientras más alejados estén los polos dominantes del eje imaginario el sistema es más estable.
- Cuando todas las ramas del sistema estén en el semiplano S izquierdo, se garantiza que el sistema es estable sin importar el valor que tome Kc.
- Si al menos una rama está completamente en el semiplano S derecho, se garantiza que el sistema es inestable para cualquier valor que tome Kc.
- Utilizando MATLAB se puede hacer el análisis del LGR utilizando herramientas como RTOOL, RLOCUS O SISOTOOL.

## 4 METODOLOGÍA

El módulo de control de temperatura (PID) se construyó de forma robusta con materiales de alta calidad, permitiendo el funcionamiento de forma industrial, además los elementos sensoriales y electrónicos son de uso profesional por tanto son de alta exactitud y durabilidad.

**Figura 16. Módulo de Control de temperatura.**



### 4.1 conexión de componentes

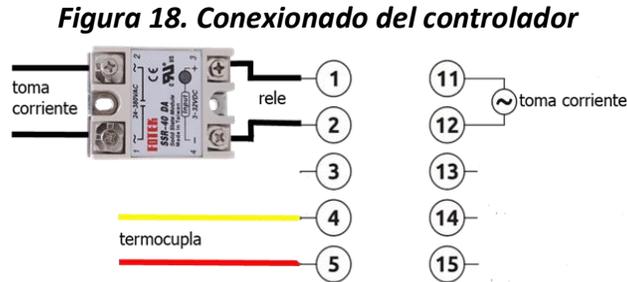
Para el funcionamiento del módulo se requiere conectar el cable **123: Controlador** y el cable **463: Horno**, ambos a 110 VAC (tomacorriente común); Si se desea utilizar el extractor como perturbación se debe conectar a 110 VAC el cable **702: Extractor**.

**Figura 17. Conexiones del módulo**



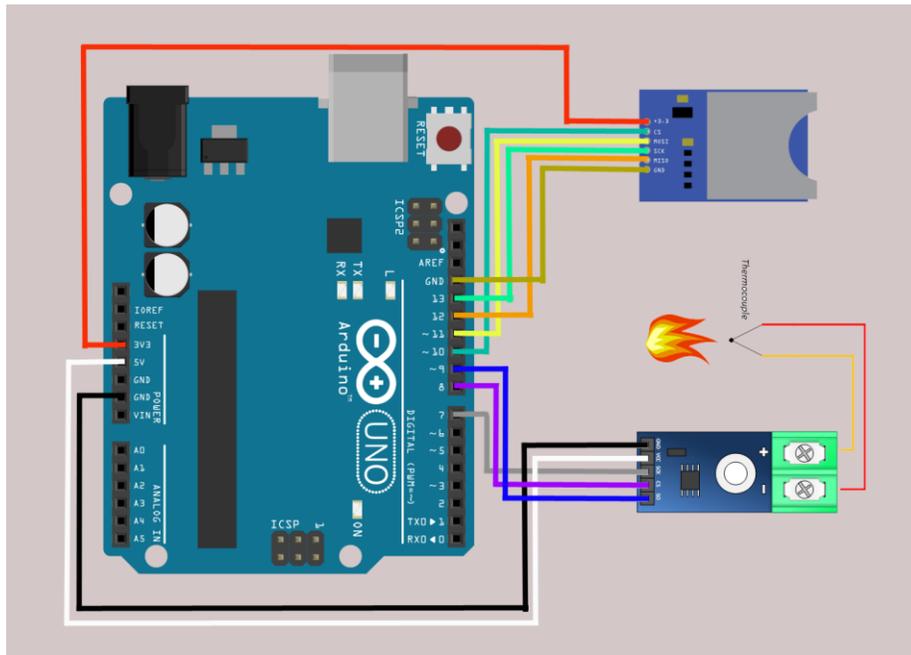
En caso de modificación de hardware se anexa el esquema **Figura 19. Conexión del Arduino**, este esquema contiene las conexiones del módulo SD para Arduino y el módulo

max6675 para el acoplamiento de la termocupla tipo k; es importante resaltar que el código de colores del esquema es exactamente igual a los utilizados físicamente.



En caso de modificación de hardware se anexa el esquema **Figura 18. Conexión del controlador** en el cual se observa claramente las conexiones por defecto

**Figura 19. Conexión del Arduino**



#### 4.2 Método de construcción del sistema

Se realiza un diseño previo que permitiera la fácil manipulación de todos los elementos que componen el sistema, de igual forma se buscó evitar a toda costa que dichos elementos estuvieran en contacto directo con el horno debido a que este produce temperaturas de hasta 400°C.

#### 4.3 Adquisición de datos

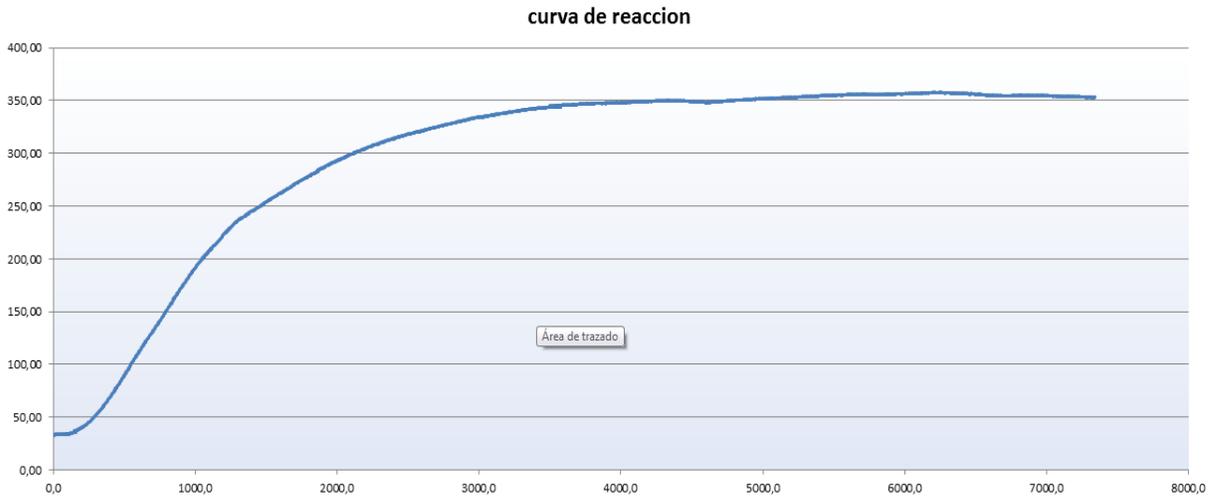
La obtención de los datos se realizó con ayuda del hardware Arduino UNO y software PLX DAQ, el cual se encarga de adquirir datos de cualquier tipo de sensor en tiempo real, este software también se encarga de almacenar estos datos en el software Microsoft Excel 2010.

Como la base de datos de la Tabla 3 y posteriormente graficarlos como en la figura 8. Curva de reacción.

**Tabla 5. Base de datos**

temperatura(°c)	tiempo(seg)
34,00	0,0
34,00	0,5
34,00	1,0
34,00	1,5
34,00	2,0
34,00	2,5
34,00	3,0
34,00	3,5
34,00	4,0
34,00	4,5
34,00	5,0
34,00	5,5
34,00	6,0
34,00	6,5
34,00	7,0

**Figura 20. Curva de reacción.**



Con respecto a la gráfica y a la base de datos realizamos los cálculos pertinentes para realizar la función de transferencia

$$G(S) = \frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{K e^{-\theta' s}}{\tau S + 1}$$

El procedimiento para obtener el modelo de forma experimental según el método de curva de reacción de Ziegler y Nichols es el siguiente:

1. Generar diferentes escalones de forma creciente y decreciente para obtener respuestas del sistema. De todas las respuestas se debe escoger la gráfica que mejor siga un modelo de primer orden (como la figura 2), esta servirá para hacer cálculos de forma directa. Si desea

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

desarrollar un software para determinar la función de transferencia, debe adquirir la base de datos (BDD) correspondiente a la gráfica seleccionada,

- De la gráfica o la base de datos, se determina la salida en estado estable (See)

$$See = 353^{\circ}\text{C}$$

- Calcular P1 como el 28.3% de la See

$$P1 = 28.3\% * See \rightarrow P1 = 28.3\% * 353^{\circ}\text{C} \rightarrow P1 = 99.899^{\circ}\text{C}$$

- Interpolando P1 entre el vector de salida y el de tiempo de la respuesta obtenida (gráfica o por BDD) se encuentra t1

$$t1 = 545.5 \text{ segundos}$$

- Calcular P2 como el 63.2% de la See

$$P2 = 63.2\% * See \rightarrow P2 = 63.2\% * 353^{\circ}\text{C} \rightarrow P2 = 223.096^{\circ}\text{C}$$

- Interpolando P2 entre el vector de salida y el de tiempo de la respuesta obtenida (gráfica o por BDD) se encuentra t2

$$t2 = 1199 \text{ segundos}$$

- Luego calcula la ganancia del sistema K que viene de la relación entre la See y el escalón con que se obtuvo la respuesta que se está analizando  $K = \frac{See}{\%escalon}$

$$K = \frac{353^{\circ}\text{C}}{100\%} \rightarrow K = 3.53$$

- Para el cálculo de los parámetros de retardo del sistema (theta prima) y la constante de tiempo de estabilización (tao) se utiliza el siguiente arreglo de ecuaciones simultáneas

$$\theta' + \tau/3 = t1, \quad \theta' + \tau = t2,$$

Este arreglo se representa en forma matricial de la siguiente manera

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} \text{theta prima} \\ \text{tao} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} t1 \\ t2 \end{bmatrix}$$

Y se resuelve para X de tal forma que:  $X = inv(A) * B$

El primero de los resultados será el retardo y el segundo la constante de tiempo, obteniendo:

$$Tao=980.25$$

$$\text{Theta prima}=218.75$$

- Se evalúa si el sistema tiene o no retardo, verificando la condición:

si “theta prima > tao/10”  $\rightarrow$  el sistema tiene retardo

$$218.75 > \frac{980.25}{10}$$

$$218.75 > 98,025$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

Con los cálculos realizados se determina la Función de Transferencia del sistema, para nuestro caso, el sistema tiene retardo, por tanto, la función de transferencia está dada de la siguiente manera  $FT = \frac{Ke^{-\theta t}}{TS+1}$ , En nuestro caso FT es:

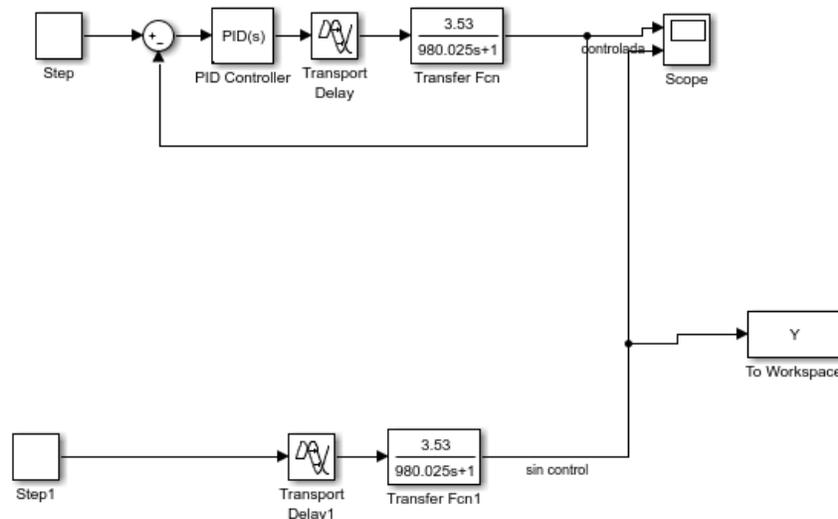
$$FT = \frac{3.53e^{-218.75}}{98.025s + 1}$$

#### 4.3.1 Control PID

El procedimiento a seguir en esta etapa se basó en el uso de MATLAB y SIMULINK, fueron usados para encontrar de una manera más fácil y precisa las constantes  $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$ , necesarias para parametrizar el controlador a implementar.

Se procedió a montar la planta en SIMULINK, como en la siguiente figura, el esquema se realizó en dos etapas, la primera contiene los parámetros halladas de la planta en la identificación enlazada con el controlador y la segunda parte es la planta identificada sin control.

**Figura 21. Planta en SIMULINK**

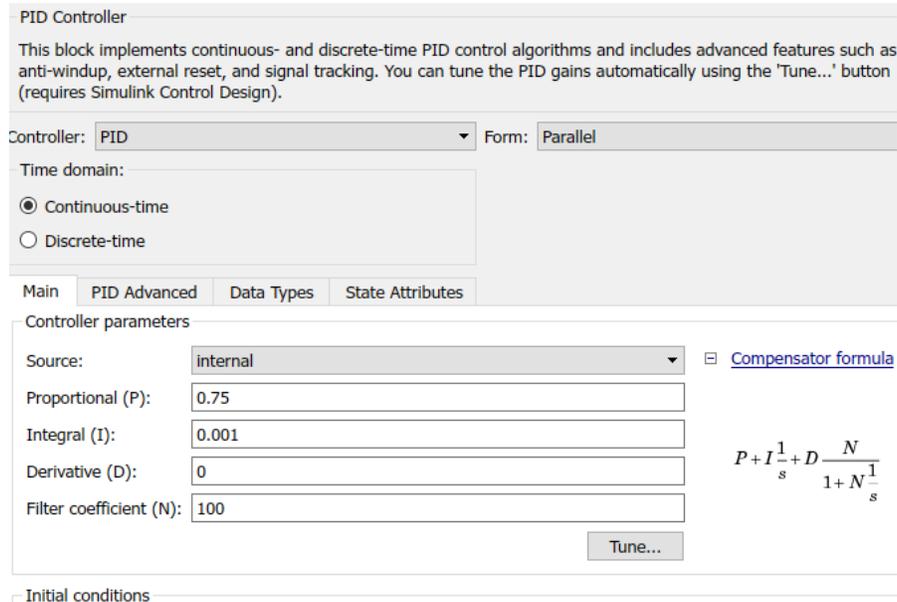


Para definir los valores de los parámetros del sistema, se determina trabajar por técnicas comúnmente utilizadas a nivel industrial, para el caso concreto del módulo de temperatura se trabajó únicamente con la técnica de tanteo siguiendo el procedimiento antes explicado en este documento, pero de forma simulada, la idea con esto es aprovechar al máximo los recursos que actualmente se tienen como soporte al ajuste de los parámetros.

En importante el uso del toolbox Simulink de Matlab, debido a que a nivel experimental, se puede perder mucha energía, producción, invertir tiempo y recursos o desajustar los componentes del sistema en especial los elementos finales de control o actuadores, de este trabajo se obtuvieron las constantes  $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$ , las cuales se pueden observar en la siguiente figura

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

**Figura 22. Sintonización del controlador usando la técnica de tanteo**



PID Controller

This block implements continuous- and discrete-time PID control algorithms and includes advanced features such as anti-windup, external reset, and signal tracking. You can tune the PID gains automatically using the 'Tune...' button (requires Simulink Control Design).

Controller: PID Form: Parallel

Time domain:

Continuous-time  
 Discrete-time

Main PID Advanced Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal [Compensator formula](#)

Proportional (P): 0.75

Integral (I): 0.001

Derivative (D): 0

Filter coefficient (N): 100

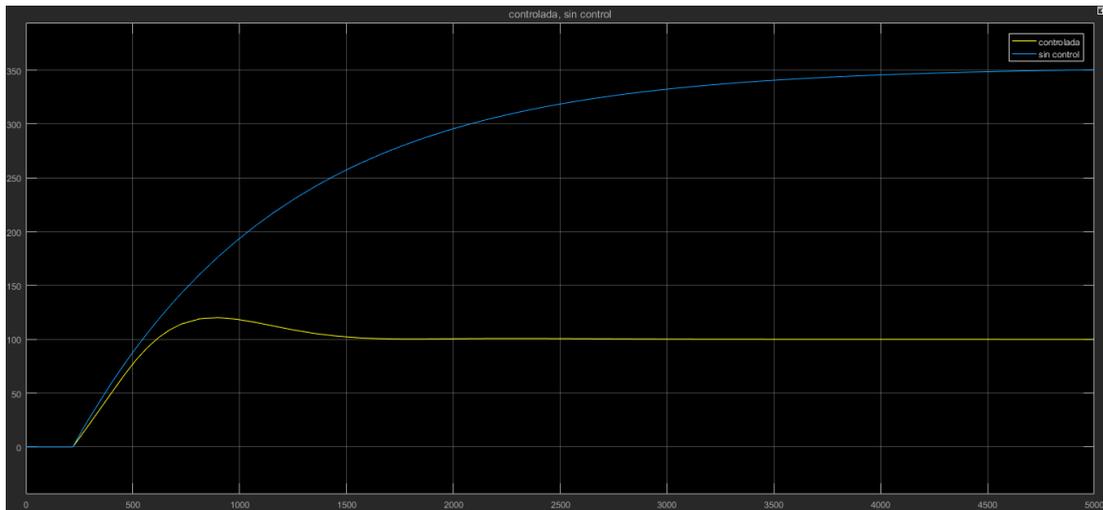
Tune...

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Initial conditions

En la **Figura 23. Curva resultante**. Se observa los resultados de nuestra planta, en amarillo se puede observar la planta con control y en azul se observa la planta trabajando en lazo cerrado con un controlador PI, pues con esto fue suficiente para que la temperatura del horno se estabilizara más rápido (1500 segundos) que trabajando en lazo abierto (entre 4000 y 4900 segundos que equivalen a  $5T$ ), además, se probaron diferentes puntos de trabajo (SP) y en todos los casos se logra que la temperatura se estabilice con un margen de error menor al 5% de la salida en estado estable, para el caso que se presenta como ejemplo, se logra que el horno llegue a una temperatura de referencia de  $100^{\circ}\text{C}$  en menos de 1600 segundos, .

**Figura 23. Curva resultante**



Es de suma importancia conocer el funcionamiento del controlador DELTA DT4848V0 pues esto determina la forma como se ingresan los parámetros del controlador, es decir:

- Proporcional, Kp o BAPO
- Integral, Ki o ti
- Derivativo, Kd o td

Además, también se deben conocer los rangos de los parámetros y las cifras decimales que admite, teniendo en cuenta esto, el controlador DELTA DT4848V0 que se utiliza en el módulo, no recibe valores menores a 0 y solo recibe un decimal.

Para nuestro PID los valores a ingresar en el controlador son:

$$Bapo = \frac{100\%}{kp} \quad Bapo = \frac{100\%}{0.75} \quad Bapo = 1,33$$

$$TI = \frac{kp}{ki} \quad TI = \frac{0.75}{0,001} \quad TI = 750$$

$$Td = \frac{kd}{kp} \quad Td = \frac{0}{0.75} \quad Td = 0$$

Los valores de los parámetros del PI sintonizado por tanteo fueron ingresados al controlador universal DELTA DT4848V0 siguiendo las indicaciones del manual de usuario, parametrizando cada uno de los valores requeridos.

Se hicieron una serie de pruebas al controlador trabajando en lazo cerrado, y se obtuvieron respuestas similares a las de la simulación en Simulink, conservando las proporciones con respecto a los diferentes SP propuestos, no se incluyen fotografías de esto pues la visualización del display es numérica y no permite ver resultados fijos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

## 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- El módulo didáctico de control de temperatura (PID) se realiza con la finalidad de que los estudiantes de las áreas de automatización puedan tener una opción práctica en la cual probar las diferentes teorías de identificación de sistemas y diseño y ajuste de controladores
- Como el módulo está construido de forma robusta, adquiere las características propias de un horno industrial, tiene una dinámica lenta debido a la alta inercia que debe vencer en el proceso de variación de temperatura tanto para calentamiento como para enfriamiento, siendo particularmente más lento en la disminución de esta. Pero que puede ser acelerado con el extractor adjunto en la parte posterior.
- El trabajo con dispositivos de control universales permiten probar diferentes técnicas de diseño y cálculo de los parámetros de los controladores y además interactuar con dispositivos reales que deben ser estudiados antes durante y después de su uso.
  1. Antes: pues debe buscarse el equipo que permita cumplir con los requerimientos del proceso, es decir, que sirva para la variable de trabajo, que admita los rangos de operación, que sea robusto, que las salidas estén en coherencia con los elementos finales de control, entre otros más.
  2. Durante: pues una mala manipulación del equipo podría generar daños, des configuraciones o bloqueos que impiden su normal funcionamiento.
  3. Después: verificar las condiciones de operación y que los valores y señales arrojadas sean las esperadas.
- El sistema se identifica como de primer orden con retardo, sin embargo, puede ser trabajado como una aproximación de segundo orden y probarle diferentes tipos de controladores.
- El módulo de temperatura se deja trabajando con un controlador PI, con el que se da cumplimiento a los objetivos planteados en cuanto a control y manejo del equipo dentro de rangos de operación preestablecidos, por esta razón se decide no implementar un algoritmo derivativo (td), sin embargo, se pueden definir requerimientos de operación diferentes (tiempo de establecimiento, set point, error en estado estable, máximo sobre impulso)
- En las diferentes pruebas realizadas al sistema controlado, se obtuvo un sobre impulso en la respuesta del sistema (curva de reacción), que variaba dependiendo del punto inicial de la temperatura, por ejemplo, para un escalón que iniciara de un estado estable a temperatura ambiente, el sobre impulso (Mp) fue aproximadamente de 25% de la See, pero si el valor inicial del escalón estaba por encima de los 80 °C el MP no superaba el 10%; en ambos casos el rango del error en estado estable fuera aproximadamente de  $\pm 8\%$  SP configurado.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

- Para el trabajo del módulo se entregan 3 guías, la primera de adquisición de datos, la segunda de identificación por curva de reacción y la tercera de ajuste de controladores, además, se entrega un manual de usuario que guía paso a paso a los estudiantes en el correcto uso del mismo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

## 6 CONCLUSIONES

---

- El módulo es completamente funcional y en él se pueden realizar prácticas de acondicionamiento de señales, adquisición de datos, implementación de controladores ON-OFF, P, PI y PID.
- Que el ITM tenga equipos de tipo industrial para sus prácticas, es un valor agregado para las competencias del hacer y procedimentales planteadas en los microcurrículos de las asignaturas y va en coherencia con el Modelo Pedagógico Institucional y declarada Formación Tecnológica. Además, garantiza que el estudiante no llegue a la industria solo con conocimientos teóricos probados únicamente en simuladores, confrontándolo con la realidad del trabajo aplicado.
- Enfrentarse a un proyecto de automatización, es muy importante para un estudiante, debido a que lo saca de la zona de confort de trabajar con condiciones ideales o simulación de perturbaciones y lo enfrenta a problemas reales que tienen que ver con el manejo de variables, equipos y aún más importantes con la gestión de proyectos, pues se encuentra con inconvenientes que de otra manera solo podrá tener cuando esté trabajando en su área de formación.
- El combinar estrategias de simulación y aplicaciones reales es un buen complemento, esto permite que el estudiante y futuro ingeniero maximice los recursos (tiempo, financieros, inventarios, conocimientos, entre otros) para el logro de los objetivos que le sean planteados en los proyectos que desarrolle
- No todos los métodos de diseño de controladores pueden ser aplicados a todas las plantas, esto porque las dinámicas propias de cada una de ellas necesariamente no son compatibles con los criterios de trabajo utilizados en el planteamiento de las técnicas o métodos ya sean teóricos o experimentales.
- Los sistemas térmicos son procesos de respuesta lenta debido a la alta inercia que presentan de la variable a controlar (temperatura) y a la robustez de las plantas en que se llevan a cabo los procesos.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

## 7 RECOMENDACIONES

---

- Antes del uso del módulo de control de temperatura (PID) es necesario:
  - Hacer una lectura consciente del manejo del equipo y sus componentes.
  - Conocer y entender los riesgos que se corren con la mala manipulación de los equipos, pues manejan temperaturas de hasta 350°C, Voltajes de 110V y corrientes de hasta 15 A.
- Para tener un funcionamiento óptimo del equipo es importante hacer un precalentamiento del horno debido a la alta inercia de la temperatura, al menos por encima de 60°C
- El módulo cuenta con un extractor que inicialmente está configurado para trabajar de forma independiente y puede ser utilizado como una posible perturbación del sistema o como un medio de acelerar el enfriamiento del horno (uso opcional).
- No deben alterarse las conexiones de los componentes del módulo sin dejar constancia en el manual del usuario y en las guías de trabajo independiente elaboradas para el trabajo con el equipo.
- En caso de que este módulo sea utilizado para un fin diferente, o le sean añadidos otros componentes, asegúrese de dejar un registro que permita hacer la trazabilidad de los cambios, pues todos estos pueden ser objeto de estudio por los usuarios en diferentes áreas de conocimiento

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

## 8 TRABAJOS FUTUROS

---

- El sistema inicialmente se diseñó para trabajar con un control regulado continuo, sin embargo, es viable que a futuro se le puedan implementar otros tipos de controles, como un control digital utilizando un PC, un control por medio de un PLC, entre otros.
- Se pueden generar prácticas para identificación del sistema si tiene integrado a su funcionamiento un extractor, esto puede llevar a trabajar estrategias de control diferentes al PID, por ejemplo, control robusto, control distribuido, control difuso, en los que se tenga más de un elemento final de control y por ende más variables manipuladas, esto implicaría adición de módulos que pueden ser desarrollados como trabajos de grado de tecnología o ingeniería.
- Diseñar guías de laboratorio más específicas para otras asignaturas relacionadas con la automatización de procesos, entre otras es viable por ejemplo en las áreas de Circuitos Eléctricos y Electrónicos, Acondicionamiento de Señales, Instrumentación Industrial, Identificación de Sistemas, PLC, Comunicaciones, Proyectos, entre otras.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2017-01-27

## 9 REFERENCIAS

---

- Agustín, F. (2013). Obtención de la función de transferencia del sistema mediante la identificación paramétrica a partir de los datos experimentales. Instituto Tecnológico de Mérida.
- Corripio, Armando, Principles and Practice of Automatic Process Control, segunda edición.
- Dorf, Richard, Sistemas de Control moderno, Prentice Hall.
- Egea Mejía, Luis A. y Sarmiento Galeano, Jaime E., *Modelo y controlador de temperatura para horno eléctrico doméstico*, Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, Trabajo de Grado TG0867, año 2009
- García Jaimes, Luis E. (2010). Control Digital teoría y práctica. Medellín. Colombia: Politécnico colombiano JIC
- Madrigal Mesa, Juan Fernando. (2016). Diseño y ajuste de controladores. Medellín, Colombia.
- Madrigal Mesa, Juan Fernando. (2017). Guías de trabajo independiente para identificación de sistemas y diseño y ajuste de controladores, ITM, Medellín, Colombia
- Nuñez Monenegro, Bernardo, *Control y Automatización de procesos: Funciones de Transferencia*. Escuela Superior de Ingeniería de Sistemas, Lambayeque.
- Ogata, Katsuhiko, Ingeniería de Control Moderna, Prentice Hall, tercera edición, 1997.
- Parallax.com. (2017) *PLX-DAQ | Parallax Inc.* [online] Available at: <https://www.parallax.com/downloads/plx-daq> [Accessed 24 Nov. 2017].
- VANCE J. VanDoren, Ziegler-Nichols Methods Facilitate Loop Control, August 1998 Control Engineering.