

**BANCO DE LABORATORIO PARA LA REALIZACION DE
PRACTICAS DE CONTROL PID**

RONAL SALAS CONTRERAS

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA
MINOR EN AUTOMATIZACION INDUSTRIAL
CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C., JUNIO DE 2009**

**BANCO DE LABORATORIO PARA LA REALIZACION DE
PRACTICAS DE CONTROL PID**

RONAL SALAS CONTRERAS

Monografía elaborada para obtener el título de

INGENIERO ELECTRONICO

Director

EDUARDO GOMEZ VASQUEZ

Ingeniero Electricista

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA
MINOR EN AUTOMATIZACION INDUSTRIAL
CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C., JUNIO DE 2009**

Cartagena de Indias D.T. y C., 25 de Junio de 2009.

Señores
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
COMITÉ DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS
L. C.

De manera respetuosa me permito presentar ante ustedes la monografía de grado titulada "**BANCO DE LABORATORIO PARA LA REALIZACIÓN DE PRACTICAS DE CONTROL PID**", para su análisis y aprobación. Dicha monografía fue desarrollada por el estudiante **RONAL SALAS CONTRERAS**, en la cual participé como Director.

Cordialmente,

EDUARDO GOMEZ VASQUEZ

Ingeniero Electricista

Magíster en Ciencias Computacionales

Director del Programa de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad
Tecnológica de Bolívar

AUTORIZACION

Yo, **RONAL SALAS CONTRERAS**, identificado con cédula de ciudadanía 73.193.180 expedida en la ciudad de Cartagena de Indias D.T. y C., autorizo a la Universidad Tecnológica De Bolívar para hacer uso de la monografía de grado titulada “**BANCO DE LABORATORIO PARA LA REALIZACION DE PRACTICAS DE CONTROL PID**” , para publicarla en el catálogo On-line de la Biblioteca de ésta institución.

Atentamente,

RONAL SALAS CONTRERAS
C.C. # 73.193.180 de Cartagena.

NOTA DE ACEPTACION

FIRMA PRESIDENTE DEL JURADO

FIRMA JURADO

FIRMA JURADO

Cartagena de Indias D.T. y C., 25 de Junio de 2009.

AGRADECIMIENTOS

... A Dios, por haberme dado la vida, la salud, el bienestar físico y espiritual, para desarrollar mis virtudes y sobrellevar mis defectos.

... A mis padres, Edilberto y Ana Benita, por su paciencia, esfuerzo, amor y apoyo incondicional, durante mi formación personal y profesional.

... A mis hermanos, Selliny, Rhinney y Samir, por sus regaños y consejos a la hora de enfrentar los momentos más difíciles.

... A todos los docentes, quienes durante el curso de mi carrera me brindaron su guía y sabiduría para el desarrollo de mi aprendizaje y conocimiento.

... A Martha Castañeda, por enseñarme día a día a hacer las cosas con amor, esfuerzo y dedicación, sin importar las dificultades.

... A la Familia Alfonso Neira, especialmente a Carlos Guillermo (Q.E.P.D.), quienes me tendieron su mano desinteresadamente en el momento más difícil de mi carrera.

... A mis amigos, quienes de forma directa o indirecta influyeron en mi vida como estudiante, como amigo y como ser humano.

Especialmente dedico este triunfo a mi madre, por creer en mi, por su incansable lucha, por enseñarme a ser valiente frente al mundo, por darme la oportunidad de demostrar lo que soy, y porque esta meta es un tributo a su orgullo y satisfacción.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.	1
OBJETIVOS.	2
JUSTIFICACION	3
1. GENERALIDADES SOBRE CONTROL AUTOMÁTICO.	4
2. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL.	6
2.1. Estabilidad.	6
2.2. Exactitud.	7
2.3. Velocidad de respuesta.	7
3. CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID).	8
3.1. Funcionamiento.	9
3.2. Proporcional, Integral, Derivativo.	10
3.3. Usos.	15
3.4. Ajuste de parámetros del PID.	15
3.5. Limitaciones de un control PID.	17
3.7. Ejemplos prácticos.	17
4. PRACTICAS DE LABORATORIO.	21
4.1. PRÁCTICA Nº 1: CONTROL ON/OFF CON HISTERESIS.	21
4.1.1. Introducción.	21
4.1.2. Equipos.	22
4.1.3. Marco teórico.	22

4.1.3.1.	Controlador <i>Selec® PID528</i> .	22
4.1.3.2.	Especificaciones técnicas.	23
4.1.3.3.	Recomendaciones de seguridad.	25
4.1.3.4.	Precauciones eléctricas.	26
4.1.4.	Banco de pruebas.	26
4.1.4.1.	Generalidades.	26
4.1.4.2.	Uso adecuado de la Planta.	30
4.1.4.3.	Uso adecuado del Sensor.	32
4.1.5.	Configuración del sistema.	33
4.1.6.	Procedimiento.	35
4.1.6.1.	Controlador ON/OFF con Histéresis.	35
4.1.6.2.	Preguntas.	41
4.1.6.3.	Observaciones.	42
4.2.	PRÁCTICA N° 2: CONTROL PROPORCIONAL (P).	43
4.2.1.	Introducción.	43
4.2.2.	Equipos.	43
4.2.3.	Marco teórico.	44
4.2.4.	Procedimiento.	44
4.2.4.1.	Controlador proporcional.	44
4.2.4.2.	Preguntas.	47
4.2.4.3.	Observaciones.	47
4.3.	PRÁCTICA N° 3: CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL (PI).	48
4.3.1.	Introducción.	48
4.3.2.	Equipos.	49
4.3.3.	Marco teórico.	49
4.3.4.	Procedimiento.	50
4.3.4.1.	Controlador Proporcional Integral.	50
4.3.4.2.	Preguntas.	53
4.3.4.3.	Observaciones.	53

4.4. PRÁCTICA N° 4: CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID).	54
4.4.1. Introducción.	54
4.4.2. Equipos.	55
4.4.3. Marco teórico.	55
4.4.4. Procedimiento.	56
4.4.4.1. Controlador PID y el método de <i>Ziegler-Nichols</i> .	56
4.4.4.2. Preguntas.	59
4.4.4.3. Observaciones.	59
 CONCLUSIONES.	 60
 BIBLIOGRAFIA.	 61
 ANEXO A.	 63

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Diagrama de bloques representativo del control PID.	8
Figura 2.	Acción proporcional en sistemas de control PID.	11
Figura 3.	Ejemplo de respuesta del control con acción Integral.	12
Figura 4.	Fenómeno de Derivación (K_d) en función de la frecuencia.	14
Figura 5.	Esquema de control de un Reactor químico.	18
Figura 6.	Ejemplo de interfaz de experimentación para control de caudal y nivel con un depósito.	19
Figura 7.	Ejemplo de interfaz de experimentación para el control de caudal y nivel de un proceso con dos depósitos en cascada	20
Figura 8.	Modelo de control ON/OFF en lazo cerrado.	21
Figura 9.	Panel de control principal. Se encuentran integrados todos los terminales de conexión para el controlador PID, sensor y actuador.	27
Figura 10.	Vista general del Panel de control principal. Este es el sistema que comprende al controlador <i>Selec® PID528</i> y sus terminales de conexión.	28
Figura 11.	Prototipo del sistema de calefacción. Se encuentran integrados la fuente de calefacción (bombillos), el sensor (TC/RTD) y los terminales para el Actuador (Relé/Contactor).	29
Figura 12.	El contactor y sus partes. En este proyecto, es utilizado como Actuador en reemplazo del Relay cuando la corriente necesaria para activar la carga (bombillos) supera los 0.5A.	29
Figura 13.	Conexión directa de carga: será correcta siempre y cuando la carga tenga consumo de corriente menor a 0.5A.	30

Figura 14.	Conexión directa de carga: será correcta siempre y cuando la carga exceda el consumo de corriente de 0.5A.	30 28
Figura 15.	Diagrama de control con uso de MOV y Red Snubber: a) para cargas con consumo menor a 0.5A; b) para cargas que superen el consumo de corriente de 0.5A.	31
Figura 16.	Conexión correcta del sensor tipo Termocupla (TC).	32
Figura 17.	Conexión correcta del sensor tipo Sensor Resistivo de temperatura (RTD).	32
Figura 18.	Representación del modelo de control ON/OFF con Histéresis.	35
Figura 19.	Selección del sensor (TC/RTD)	36
Figura 20.	Ajuste de Set point, Pb e Histéresis	36
Figura 21.	Representación del modelo de Control Proporcional.	43
Figura 22.	Reducción del error estacionario en un proceso de control de temperatura PI.	48
Figura 23.	Diagrama de bloques del modelo de control Proporcional Integral.	49
Figura 24.	Activación del modo proporcional.	50
Figura 25.	Configuración de bandas derivativa e integral para Control Proporcional.	51
Figura 26.	Diagrama de bloques representativo del Control PID.	54
Figura 27.	Método de Ziegler-Nichols: ajuste de bandas integral y derivativa.	56

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Especificaciones técnicas del controlador <i>Selec®</i> <i>PID528</i> .	23
Cuadro 2.	Comandos de configuración del controlador <i>Selec®</i> <i>PID528</i> .	33
Cuadro 3.	Regla de Ziegler-Nichols. Patrones de cálculo para ajuste de un controlador.	55

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Datos de Temperatura, Tiempo y Estado para Histéresis mínima.	37
Tabla 2.	Datos de Temperatura, Tiempo y estado para Histéresis = 0.5.	38
Tabla 3.	Datos de Temperatura, Tiempo y estado para Hys1 = 1.	40
Tabla 4.	Datos de Temperatura y Tiempo para Control proporcional.	45
Tabla 5.	Datos de Temperatura y Tiempo para banda integral igual a 20.	51
Tabla 6.	Datos de Temperatura y Tiempo para banda integral igual a ____.	51
Tabla 7.	Datos de Temperatura y Tiempo para el proceso en estado oscilatorio.	57
Tabla 8.	Parámetros calculados para ajuste del controlador PID.	58
Tabla 9.	Datos de Temperatura y Tiempo del proceso con cambio de referencia.	59

INDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1.	Control ON/OFF con Histéresis mínima.	37
Gráfica 2.	Control ON/OFF con Histéresis = 0.5.	39
Gráfica 3.	Control ON/OFF con Histéresis = 1.	40
Gráfica 4.	Control Proporcional.	46
Gráfica 5.	Control Proporcional Integral.	52
Gráfica 6.	Control PID: método de Ziegler-Nichols.	57
Gráfica 7.	Respuesta del Controlador PID ajustado con el método de Ziegler-Nichols.	58

INTRODUCCIÓN

El control automático desempeña un papel importante en casi todos los procesos existentes en la actualidad; los procesos de manufactura, industriales, navales, aeroespaciales, robótica, económicos, biológicos, entre otros, representan en parte, la extensión que la automatización tienen en los procesos productivos.

Luego, al estar ligado prácticamente, a todas las ingenierías (eléctrica, electrónica, mecánica, sistemas, industrial, química, etc.), este documento ha sido desarrollado sin preferencia hacia alguna disciplina determinada, de tal manera que permita al lector construir ideas, visualizaciones, o profundizaciones, sin que sea necesario tener amplios conocimientos en electrónica o en su defecto, teoría del control automático.

Con la ayuda de este manual, se podrá conocer información importante sobre la dinámica de la automatización de procesos, de los principios de funcionamiento de los sistemas de temperatura controlados automáticamente, junto con la implementación del Control Proporcional, Integral, Derivativo (PID) y sus derivaciones; se requiere, sin embargo, que el lector tenga conocimientos básicos en Control Automático para mayor y mejor entendimiento del contenido aquí presentado.

OBJETIVOS

Objetivo general.

El presente manual está centrado en el diseño e implementación de un modelo didáctico a nivel de educación superior, donde los estudiantes podrán ejercitar su aprendizaje mediante bancos de prueba para el estudio del comportamiento de un proceso de control de temperatura.

Objetivos específicos.

Diseñar e implementar un banco de pruebas de carácter didáctico para el fácil aprendizaje de las teorías de control de temperatura, utilizando el controlador *Selec® PID528*.

Analizar aspectos importantes sobre el control de temperatura y su relación con los distintos parámetros de sintonización del controlador *Selec® PID528*.

Establecer un Manual de instrucciones para prácticas y ensayos de laboratorio, para el uso y/o aplicación de controladores *ON/OFF*, Proporcional (*P*), Proporcional Integral (*PI*) y Proporcional Integral Derivativo (*PID*).

JUSTIFICACION

La Universidad Tecnológica de Bolívar ha realizado importantes esfuerzos para obtener todo tipo de equipos, materiales y elementos que permitan a la población estudiantil afianzar sus competencias, mediante el entrenamiento en los laboratorios de la institución.

Partiendo de lo anterior, y específicamente para las áreas de la Automatización Industrial y/o el Control Automático, ésta monografía se constituye como aporte al inventario de equipos, materiales y elementos de laboratorio que permitan la real confrontación del contenido teórico-práctico que se aprende en la Universidad Tecnológica de Bolívar.

1. GENERALIDADES SOBRE CONTROL AUTOMATICO.

Muchos factores dentro del área de la automática contribuyen a aumentar la productividad en los procesos; la difusión de la aplicación del control automático en todos los campos donde se aplica ha creado la necesidad de elevar el nivel de la educación de quienes desean adquirir conocimientos amplios sobre esta temática, capacitándolos para desempeñar con mayor responsabilidad, el diseño, manejo y mantenimiento de sistemas o instrumentos de control¹. Para continuar con este tema, es necesario definir ciertos términos básicos, para facilitar al lector la mayor comprensión posible; veamos:

- **Señal de salida:** es la variable que se desea controlar (posición, velocidad, presión, temperatura, etc.). También se denomina variable controlada.
- **Señal de referencia:** es el valor que se desea que alcance la señal de salida, también denominada *Set point*.
- **Error:** es la diferencia entre la señal de referencia y la señal de salida real.
- **Señal de control:** es la señal que produce el controlador para modificar la variable controlada de tal forma que se disminuya, o elimine, el error.
- **Señal análoga:** es una señal continua en el tiempo (corriente o voltaje).
- **Señal digital:** es una señal que solo toma valores de 1 y 0; el PC por ejemplo, solo envía y/o recibe señales digitales.

¹ *Control automático en la industria: un poco de historia, aspectos generales.*
http://www.sapiensman.com/control_automatico/control_automatico6.htm

- **Convertor A/D ó D/A** : es un dispositivo que convierte una señal analógica en una señal digital, ó viceversa.
- **Planta**: es el elemento físico que se desea controlar. Planta puede ser: un motor, un horno, un sistema de disparo, un sistema de navegación, un tanque de combustible, etc.
- **Proceso**: operación que conduce a un resultado determinado.
- **Sistema**: consiste en un conjunto de elementos que actúan coordinadamente para realizar un objetivo determinado.
- **Perturbación**: es una señal que tiende a afectar la salida del sistema, desviándola del valor deseado.
- **Sensor**: es un dispositivo que convierte el valor de una magnitud física (presión, flujo, temperatura, etc.) en una señal eléctrica codificada ya sea en forma analógica o digital; también es llamado **Transductor**. Los sensores o transductores analógicos envían, por lo regular, señales normalizadas de 0 a 5V, 0 a 10V ó 4 a 20mA.
- **Sistema de control en lazo cerrado**: es aquel en el cual continuamente se está monitoreando la señal de salida para compararla con la señal de referencia y calcular la señal de error, la cual a su vez es aplicada al controlador para generar la señal de control y tratar de llevar la señal de salida al valor deseado. También es llamado **Control realimentado**.
- **Sistema de control en lazo abierto**: en estos sistemas de control la señal de salida no es monitoreada para generar una señal de control.

2. CARACTERISTICAS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL.

Existen a veces, tendencias a exagerar los beneficios obtenidos con los sistemas de control automático, considerándolos como una estrategia capaz de remediar cualquier defecto o perturbación; esto es una sobre valoración, pero, la mayor parte de la teoría del control automático trata de los sistemas realimentados, porque los sistemas a lazo abierto no presentan dificultades matemáticas, mientras que los sistemas realimentados requieren el uso de un aparato matemático bastante complejo. Sin embargo, estos sistemas poseen ciertas características que brindan garantía a los procesos; veamos:

2.1. Estabilidad.

La condición de estabilidad es fundamental; todo sistema de control deberá ser estable para prestar alguna utilidad; la condición de estabilidad significa que, estando el sistema en un punto de equilibrio y sometido a la acción de una perturbación, o a una variación del valor de referencia, presentará una respuesta que tenderá a un nuevo estado de equilibrio. En cambio, un sistema inestable iniciará una oscilación de amplitud creciente alrededor del valor de equilibrio, o se saturará en alguno de sus valores extremos.

Aún siendo estable, un sistema puede presentar un grado de estabilidad insuficiente; esto significa que, para llegar a un nuevo punto de equilibrio, produce oscilaciones amortiguadas de excesiva duración antes de estabilizarse en los valores definitivos. La medición del grado de estabilidad de los sistemas tiene que ver con ciertas características de las ecuaciones diferenciales que describen su comportamiento, y existen técnicas que permiten variar el grado de estabilidad para obtener una respuesta satisfactoria.

2.2. Exactitud.

La exactitud implica mantener las variables controladas dentro de un cierto entorno tolerable alrededor de sus valores de referencia, en otras palabras, con un error suficientemente pequeño para los fines a los que está destinado el sistema.

La exactitud constituye un factor importante en la determinación de la proyección del costo de un sistema de control automático, y por lo tanto no debe pretenderse obtener más de lo necesario.

2.3. Velocidad de respuesta

Similares consideraciones se aplican al diseño de la velocidad de respuesta de un sistema de control automático. La velocidad de respuesta indica la rapidez con que el sistema se adapta a nuevas condiciones de equilibrio, ya sea por perturbaciones o por que se varían los valores de referencia. Así, pues, si la exactitud nos indica una condición más bien estática, la velocidad de respuesta nos ilustra sobre la capacidad de adecuación dinámica del sistema a requisitos cambiantes.

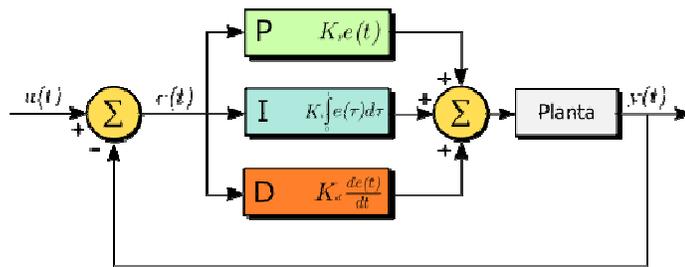
Sea cual fuere el origen de las variaciones (perturbaciones o modificación de los valores de referencia), el diseño del sistema en lo que hace a su velocidad de respuesta se efectuará estimando la máxima velocidad de variación de las variables, y en base al máximo retardo tolerable en la respuesta.

3. CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID).

Un PID (Proporcional Integral Derivativo) es un mecanismo de control por realimentación que se utiliza en sistemas de control industriales; este mecanismo PID corrige el error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener calculándolo y luego sacando una acción correctora que puede ajustar al proceso acorde. El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo.

El valor Proporcional determina la reacción del error actual, el Integral genera una corrección proporcional a la integral del error, esto nos asegura que aplicando un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero; el Derivativo determina la reacción del tiempo en el que el error se produce.

Figura 1. Diagrama en bloques representativo del control PID.



Fuente: Wikipedia, the free encyclopedia.

La suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso vía un elemento de control como la posición de una válvula de control o la energía suministrada a un calentador, por ejemplo: ajustando estas tres constantes en el algoritmo de control del PID, el controlador puede proveer un control diseñado para lo que requiera el proceso a realizar. La respuesta del controlador puede ser descrita en

términos de respuesta del control ante un error, el grado el cual el controlador llega al **Set point**, y el grado de oscilación del sistema.

Nótese que el uso del PID para control no garantiza control óptimo del sistema o la estabilidad del mismo; algunas aplicaciones pueden solo requerir de uno o dos modos de los que provee este sistema de control. Un controlador PID puede ser llamado también Proporcional Integral (PI), Proporcional Derivativo (PD), Proporcional (P) o Integral (I), en la ausencia de las acciones de control respectivas. Los controladores PI son particularmente comunes, ya que la acción derivativa es muy sensible al ruido, y la ausencia del proceso integral puede evitar que se alcance al valor deseado debido a la acción de control.

3.1. Funcionamiento.

Para el correcto funcionamiento de un controlador PID que regule un proceso o sistema se necesita, al menos tres partes importantes: un **sensor**, que determine el estado del sistema (termómetro, caudalímetro, manómetro, etc), un **controlador**, que genere la señal que gobierna al actuador y un **actuador**, que modifique al sistema de manera controlada (resistencia eléctrica, motor, válvula, bomba, etc). Se especifica información a cerca de cada parte para entender más a fondo sobre el funcionamiento de estos:

- **El sensor:** proporciona una señal analógica o digital al controlador, la cual representa el **punto actual** en el que se encuentra el proceso o sistema. La señal puede representar ese valor en tensión eléctrica, intensidad de corriente eléctrica o frecuencia; en este último caso la señal es de corriente alterna, a diferencia de los dos anteriores, que son con corriente continua.
- **El controlador:** este dispositivo lee una señal externa que representa el valor que se desea alcanzar (**Set point**), la cual es de la misma naturaleza

y tiene el mismo rango de valores que la señal que proporciona el sensor. Para hacer posible esta compatibilidad y que, a su vez, la señal pueda ser entendida por un humano, es necesario establecer algún tipo de interfaz; para ello, se utilizan interfaces **HMI** (Human Machine Interface). Estas últimas son pantallas de gran valor visual y fácil manejo que se usan para hacer más intuitivo el control de un proceso.

El controlador resta la señal de punto actual a la señal de punto de consigna, obteniendo así la señal de error, que determina en cada instante la diferencia que hay entre el valor deseado (consigna) y el valor medido. La señal de error es utilizada por cada uno de los 3 componentes del controlador PID. Las 3 señales sumadas, componen la señal de salida que el controlador va a utilizar para gobernar al actuador. La señal resultante de la suma de estas tres se llama variable manipulada y no se aplica directamente sobre el actuador, sino que debe ser transformada para ser compatible con el actuador que usemos.

Las tres componentes de un controlador PID son: parte **P**roportional, acción **I**ntegral y acción **D**erivativa. El peso de la influencia que cada una de estas partes tiene en la suma final, viene dado por la constante proporcional, el tiempo integral y el tiempo derivativo, respectivamente. Se pretenderá lograr que el bucle de control corrija eficazmente y en el mínimo tiempo posible los efectos de las perturbaciones.

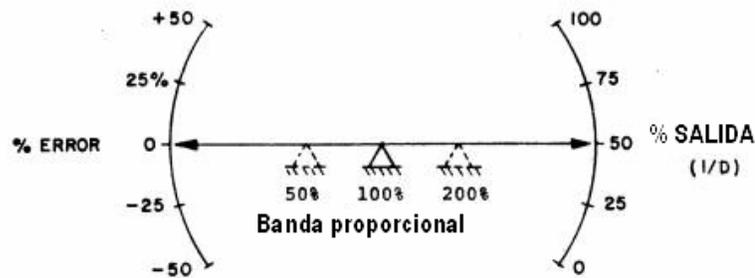
3.2. Proporcional, Integral, Derivativo.

La parte **Proporcional** consiste en el producto entre la señal de error y la constante proporcional como para que hagan que el error en estado estacionario sea casi nulo, pero en la mayoría de los casos, estos valores solo serán óptimos

en una determinada porción del rango total de control, siendo distintos los valores óptimos para cada porción del rango. Sin embargo, existe también un valor límite en la constante proporcional a partir del cual, en algunos casos, el sistema alcanza valores superiores a los deseados.

Este fenómeno se llama sobre oscilación y, por razones de seguridad, no debe sobrepasar el 30%, aunque es conveniente que la parte proporcional ni siquiera produzca sobre oscilación. Hay una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control. La parte proporcional no considera el tiempo, por lo tanto, la mejor manera de solucionar el error permanente y hacer que el sistema contenga alguna componente que tenga en cuenta la variación respecto al tiempo, es incluyendo y configurando las acciones integral y derivativa.

Figura 2. Acción Proporcional en sistemas de control PID.



Fuente: Fundamentos del control automático industrial².

La fórmula del proporcional está dada por la relación matemática $P_{sal} = K_p e(t)$; el error, la banda proporcional y la posición inicial del elemento final de control se expresan en tanto por uno. Nos indicará la posición que pasará a ocupar el elemento final de control.

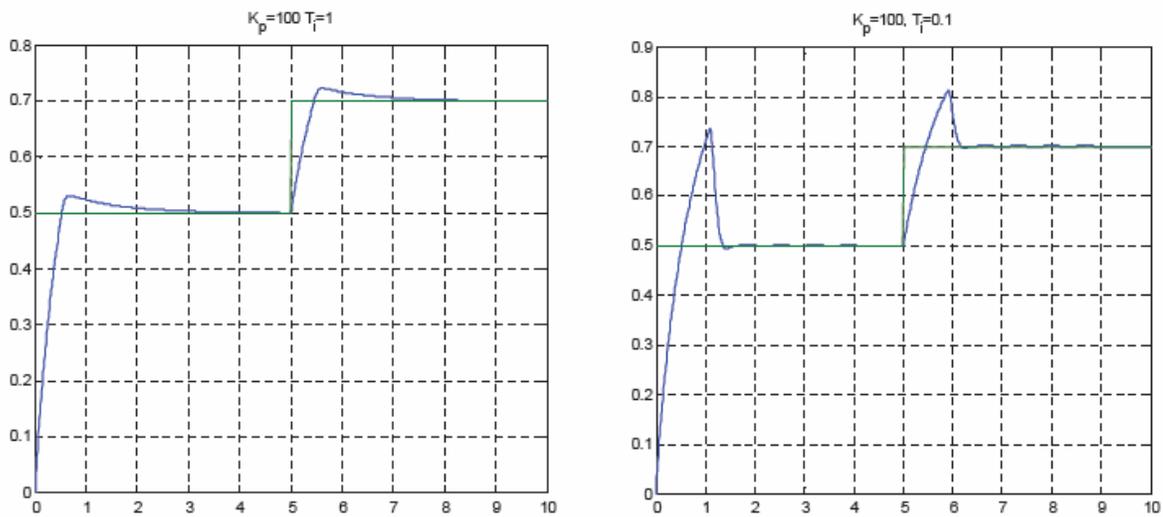
² http://www.sapiensman.com/control_automatico/control_automatico3.htm

Ejemplo aplicativo: Cambiar la posición de una válvula (elemento final de control) proporcionalmente a la desviación de la temperatura (variable) respecto al punto de consigna (variable deseada).

La parte **Integral** tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por el modo proporcional. El control integral actúa cuando hay una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando esta desviación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional.

El **error** es integrado, lo cual tiene la función de promediarlo o sumarlo por un periodo de tiempo determinado; luego es multiplicado por una constante **I**. Esta constante representa la Integración; posteriormente, la respuesta integral es adicionada al modo Proporcional para formar el control **P + I** con el propósito de obtener una respuesta estable del sistema sin error estacionario.

Figura 3. Ejemplo de respuesta del control con acción Integral.



Fuente: Acciones básicas de control³.

³ <http://www.esi2.us.es/~asun/TCA07/T2-4.pdf>

El modo integral presenta un desfase en la respuesta de 90° que sumados a los 180° de la retroalimentación (negativa) acercan al proceso a tener un retraso de 270°, luego entonces solo será necesario que el tiempo muerto contribuya con 90° de retardo para provocar la oscilación del proceso (la ganancia total del lazo de control debe ser menor a 1, y así inducir una atenuación en la salida del controlador para conducir el proceso a estabilidad del mismo); se caracteriza por el tiempo de acción integral en minutos por repetición.

En adelante, será el tiempo en que delante de una señal en escalón, el elemento final de control repite el mismo movimiento correspondiente a la acción proporcional; por otra parte, el control integral se utiliza para obviar el inconveniente del *offset* (desviación permanente de la variable con respecto al punto de consigna) de la banda proporcional.

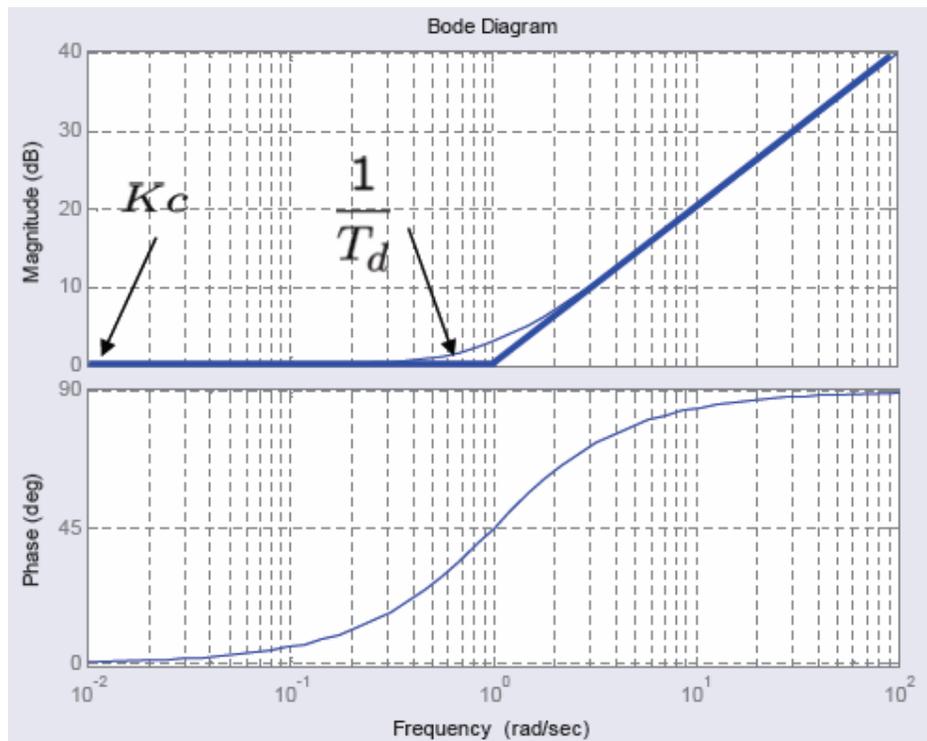
La fórmula del integral está dada por la relación matemática $I_{sal} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$.

Ejemplo aplicativo: Mover la válvula (elemento final de control) a una velocidad proporcional a la desviación respecto al punto de consigna (variable deseada).

La acción **Derivativa** se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error; (si el error es constante, solamente actúan los modos proporcional e integral); el *error* es la desviación existente entre el punto de medida y el valor consigna, o **Set Point**. La función de la acción derivativa es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad que se produce; de esta manera evita que el error se incremente. Se deriva con respecto al tiempo y se multiplica por una constante **D** y luego se suma a las señales anteriores (*P+I*). Es importante adaptar la respuesta de control a los cambios en el sistema ya que una mayor derivativa corresponde a un cambio más rápido y el controlador puede responder acordeamente.

La fórmula del derivativo está dada por la relación $D_{sal} = K_d \frac{de}{dt}$.

Figura 4. Fenómeno de Derivación (K_d) en función de la frecuencia.



Fuente: Acciones básicas de control⁴.

El control derivativo se caracteriza por el tiempo de acción derivada en minutos de anticipo. La acción derivada es adecuada cuando hay retraso entre el movimiento de la válvula de control y su repercusión a la variable controlada; cuando el tiempo de acción derivada es grande, hay inestabilidad en el proceso. Cuando el tiempo de acción derivada es pequeño la variable oscila demasiado con relación al punto de consigna. Suele ser poco utilizada debido a la sensibilidad al ruido que manifiesta y a las complicaciones que ello conlleva. El tiempo óptimo de acción derivativa es el que retorna la variable al punto de consigna con las mínimas oscilaciones.

⁴ <http://www.esi2.us.es/~asun/TCA07/T2-4.pdf>

Ejemplo aplicativo: Corrige la posición de la válvula (elemento final de control) proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada.

La acción derivada puede ayudar a disminuir el rebasamiento de la variable durante el arranque del proceso; puede emplearse en sistemas con tiempo de retardo considerables, porque permite una repercusión rápida de la variable después de presentarse una perturbación en el proceso.

3.3. Usos.

Por tener una exactitud mayor a los controladores proporcional, proporcional derivativo y proporcional integral se utiliza en aplicaciones más cruciales tales como control de presión, flujo, fuerza, velocidad, en muchas aplicaciones químicas, y otras variables.. Además es utilizado en reguladores de velocidad de automóviles (control de crucero o *cruise control*), control de ozono residual en tanques de contacto, etc.

3.4. Ajuste de parámetros del PID.

El objetivo de los ajustes de los parámetros PID es lograr que el bucle de control corrija eficazmente y en el mínimo tiempo los efectos de las perturbaciones; se tiene que lograr la mínima integral de error. Si los parámetros del controlador PID (la ganancia del proporcional, integral y derivativo) se eligen incorrectamente, el proceso a controlar puede ser inestable, por ejemplo, que la salida de este varíe, con o sin oscilación, y está limitada solo por saturación o rotura mecánica.

Ajustar un lazo de control significa ajustar los parámetros del sistema de control a los valores óptimos para la respuesta del sistema de control deseada. El comportamiento óptimo ante un cambio del proceso o cambio del **Set point** varía dependiendo de la aplicación. Generalmente, se requiere estabilidad ante la

respuesta dada por el controlador, y este no debe oscilar ante ninguna combinación de las condiciones del proceso y cambio de **Set point**.

Algunos procesos tienen un grado de no-linealidad y algunos parámetros que funcionan bien en condiciones de carga máxima no funcionan cuando el proceso está en estado de "sin carga". Hay varios métodos para ajustar un lazo de PID. El método más efectivo generalmente requiere del desarrollo de alguna forma del modelo del proceso, luego elegir **P**, **I** y **D** basándose en los parámetros del modelo dinámico; los métodos de ajuste manual pueden ser muy ineficientes. La elección de un método dependerá de si el lazo puede ser "desconectado" para ajustarlo, y del tiempo de respuesta del sistema. Si el sistema puede desconectarse, el mejor método de ajuste a menudo es el de ajustar la entrada, midiendo la salida en función del tiempo, y usando esta respuesta para determinar los parámetros de control.

Ahora, utilizando un ajuste manual, si el sistema debe mantenerse **Online**, un método de ajuste es el de primero *setear* los valores de I y D a cero, incrementar P hasta que la salida del lazo oscile; luego P debe ser configurada a aproximadamente la mitad del valor configurado previamente. Ahora incrementar D hasta que el proceso se ajuste en el tiempo requerido aunque subir mucho D puede causar inestabilidad. Finalmente, incrementar I, si se necesita, hasta que el lazo sea lo suficientemente rápido para alcanzar su referencia luego de una variación brusca de la carga. Un lazo de PID muy rápido tiene como ventaja alcanza su *Set point* de manera veloz, aunque algunos sistemas no son capaces de aceptar este disparo brusco; en estos casos se requiere de otro lazo con un P menor a la mitad del P del sistema de control anterior.

3.5. Limitaciones de un control PID.

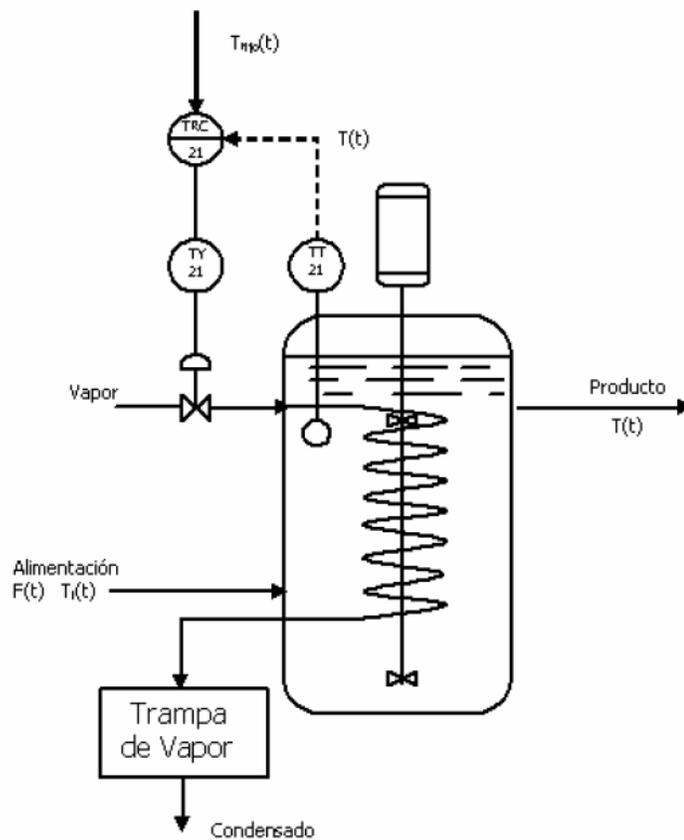
Mientras que los controladores PID son aplicables a la mayoría de los problemas de control, puede ser pobres en otras aplicaciones; cuando se usan solos, pueden dar un desempeño pobre cuando la ganancia del lazo del PID debe ser reducida para que no se dispare u oscile sobre el valor del **Set point**. El desempeño del sistema de control puede ser mejorado combinando el lazo cerrado de un control PID con un lazo abierto; conociendo el sistema (como la *aceleración* necesaria o la *inercia*) puede ser avanaccionado y combinado con la salida del PID para aumentar el desempeño final del sistema.

Solamente el valor de avanacción puede proveer la mayor porción de la salida del controlador. El controlador PID puede ser usado principalmente para responder a cualquier diferencia o "error" que quede entre el **Set point** y el valor actual del proceso. Como la salida del lazo de avanacción no se ve afectada a la *realimentación* del proceso, nunca puede causar que el sistema oscile, aumentando el desempeño del sistema, su respuesta y estabilidad. Por ejemplo, en la mayoría de los sistemas de control con movimiento, para acelerar una carga mecánica, se necesita de más fuerza (o *torque*) para el motor.

3.6. Ejemplos prácticos.

Ejemplo 1. Deseamos mantener la temperatura interna de un reactor químico en su valor de referencia; deberemos tener un dispositivo de control de la temperatura (puede ser un calentador, una resistencia eléctrica, etc.), y un sensor (termómetro).

Figura 5. Esquema de control de un Reactor químico.



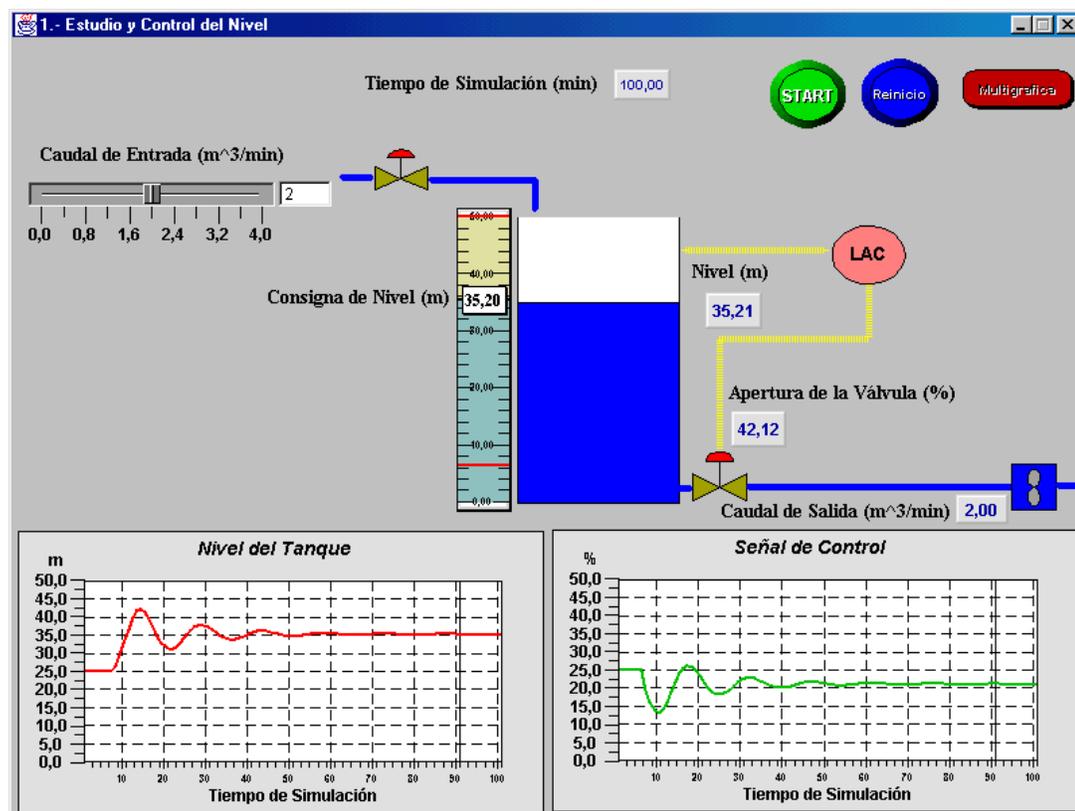
Fuente: Control Inteligente De Un Reactor químico⁵.

El P, PI o PID irá controlando la variable (en este caso la temperatura). En el instante que esta no sea la correcta avisará al dispositivo de control de manera que este actúe, corrigiendo el error. De todos modos lo más correcto es poner un PID, si hay mucho ruido un PI pero un P no nos sirve demasiado, puesto que no llegaría a corregirnos hasta el valor exacto.

⁵ Grupo de Percepción y Sistemas Inteligentes. Universidad del Valle. Cali, Valle, Colombia.
http://objetos.univalle.edu.co/files/Control_inteligente_de_un_reactor_quimico.pdf

Ejemplo 2. Deseamos controlar el caudal de un flujo de entrada en un reactor químico. En primer lugar tendremos que poner una válvula de control del caudal de dicho flujo, y un caudalímetro, con la finalidad de tener una medición constante del valor del caudal que circule; el controlador ira vigilando que el caudal que circule sea el establecido por nosotros, en el momento que detecte un error, mandara una señal a la válvula de control de modo que esta se abrirá o cerrará corrigiendo el error medido. Y tendremos de ese modo el flujo deseado e necesario. El PID, es un cálculo matemático, quien envía la información es el PLC.

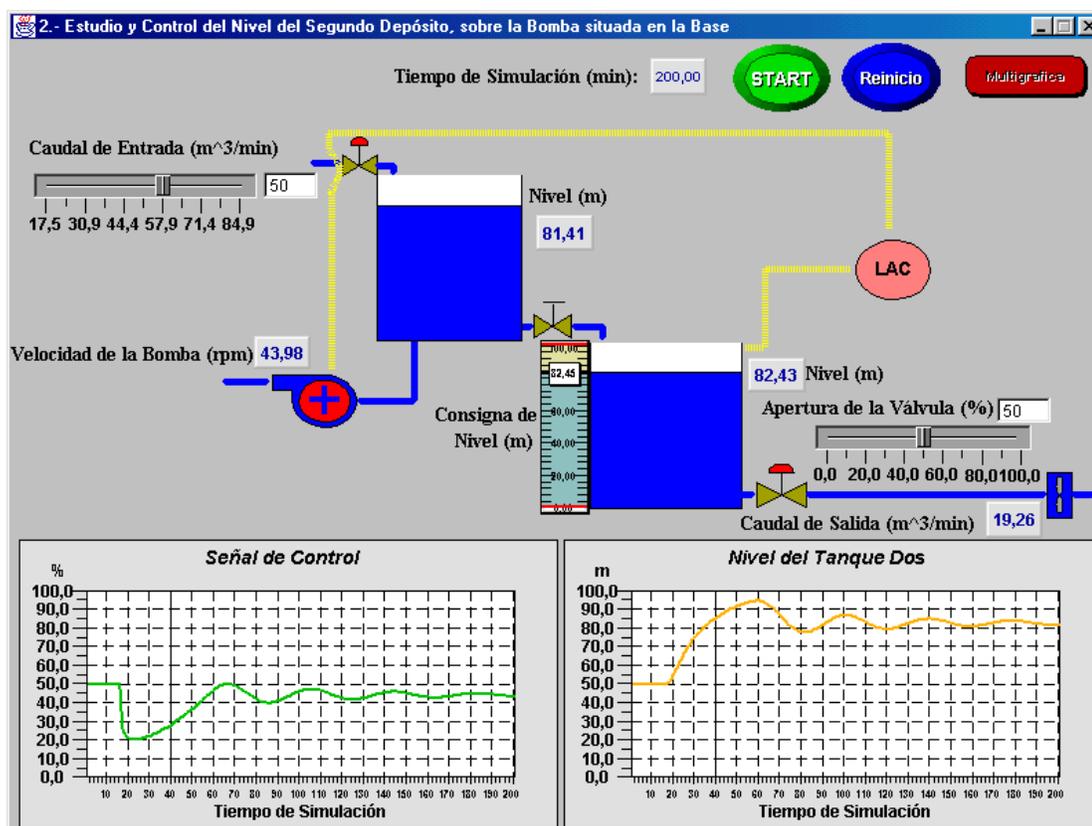
Figura 6. Ejemplo de interfaz de experimentación para control de de caudal y nivel con un depósito.



Fuente: Entorno de experimentación sobre control de nivel y control de caudal ⁶.

⁶ Dpto de Informática y Automática, Facultad de Ciencias UNED.
http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXIII/documentos/ja02_032.pdf

Figura 7. Ejemplo de interfaz de experimentación para el control de caudal y nivel de un proceso con dos depósitos en cascada.



Fuente: Entorno de experimentación sobre control de nivel y control de caudal⁷.

⁷ Dpto de Informática y Automática, Facultad de Ciencias UNED.
http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXIII/documentos/ja02_032.pdf

4. PRACTICAS DE LABORATORIO.

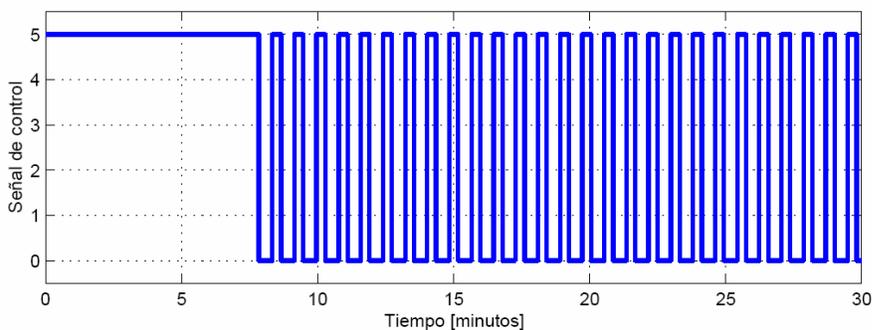
4.1. PRACTICA Nº 1: CONTROL ON/OFF CON HISTERESIS

4.1.1. Introducción

El control ON/OFF debe su nombre al hecho de aplicar toda la tensión disponible a la carga cuando no se ha alcanzado el valor referencia ó **Set point**, y no aplicar tensión a la carga cuando se alcanza éste valor; en nuestro caso, controlaremos la temperatura del sistema de la siguiente manera: cuando se le quita la tensión a la carga, ésta se enfría haciendo que se le aplique tensión nuevamente y así sucesivamente.

El dispositivo de conmutación del controlador (Relay ó Contactor) constantemente se encenderá ó se apagará dependiendo de la necesidad de generar calor o viceversa; para obtener información sobre la temperatura, el sistema utiliza un sensor representado ya sea, por una Termocupla (TC) o un Sensor resistivo de temperatura (RTD), el cual entrega una tensión proporcional a la temperatura a la que está expuesto. De manera más clara: Si $T > \text{Set point}$ → Encender (ON) ó si $T < \text{Set point}$ → Apagar (OFF).

Figura 8. Modelo de control ON/OFF en lazo cerrado.



Fuente: Problema de control ON/OFF ⁸.

⁸ http://www.csd.newcastle.edu.au/SpanishPages/clase_slides_download/on_off.pdf

4.1.2. Equipos.

Controlador *Selec® PID528*.

Fuente de calefacción.

Termocupla o Sensor resistivo de temperatura PT100.

Contactador 110V/60Hz.

Fuente de alimentación 100VAC.

Cronómetro.

Cables.

4.1.3. Marco teórico.

4.1.3.1. Controlador *Selec® PID528*.

- Medida compacta 1/16 Din.
- Display doble por LED para indicación simultanea de temperatura del proceso y Set Point.
- Controlador PID con *overshoot* (sobre envío) reducido.
- Auto-sintonía del control PID a requerimiento.
- Alimentación 85 a 270 VCA / VCC (opcional 24 VCA / VCC).
- Acepta entrada de (termocupla o RTD).
- Gran precisión de indicación: $\pm 0.25\%$.
- Compensación de error (offset) y detección de rotura.
- Indicación de salidas; *Compliance*: CE, UL, RoHS.
- Características opcionales: salida de 18 VCC para comando de SSR.

4.1.3.2. Especificaciones técnicas.

Cuadro 1. Especificaciones técnicas del controlador Selec® PID528.

CARACTERISTICAS	OBJETO	OBSERVACIONES
Display	General	Doble 4-dígitos (LED 7 segmentos).
	Display Superior	10mm, alta luminosidad, Rojo.
	Display Inferior	7mm, alta luminosidad, Verde.
	Mensajes de Display	Alternando entre PV durante alarma AL1; Indicación de ajuste mediante parpadeo del punto decimal.
	Indicador estado por LED	Relay ON; Alarma; Ajuste.
Alimentación	General	85 VCA min. a 270 VCA máx., 50 o 60 Hz, 5 VA max. Opcional: 24VCA / VCC.
Ajustes	General	Por teclado sobre frente de panel.
Memoria	General	No volátil EEPROM retiene todos los parámetros y valores.
Entrada Sensor principal	Respuesta a falla de sensor	Automático / Manual.
	Tiempo captura	250 ms.
	Unidades de temperatura	°C / °F.
	Resolución	1 / 0.1° (hasta 999.9 °C/°F) para todos los tipos.
Entrada de termocuplas	J	-99 a 750 °C.
	K	-99 a 1350 °C.
	T	-99 a 1350 °C.
	R	-99 a 1750 °C.
	S	-99 a 1750 °C.
Entrada RTD (2 y 3 hilos)	PT100	-99 a 850 °C.
Precisión de indicación	General	0.25% del Span ± 1 °C (a partir de los 20 minutos de calentamiento del sistema).
Control de las salidas de alarma (calefacción, enfriado o alarma)	Salida Relay (principal)	5A, 250VCA ó 30VCC.
	Salida Relay auxiliar/alarma	5A, 250VCA ó 30VCC.
	Vida útil	100000 ciclos máx. a carga nominal.
	Opcional	Salida 18VCC para comando de SSR. Salida 12VCC auxiliar.
Control principal	Control	PID o ON/OFF.
	Salida	Tiempo proporcional o CC lineal.
	Tiempo ciclo	Programable.
	Auto-sintonía	Ajuste de banda proporcional, tiempo integral, tiempo derivado, tiempo ciclo, y otros parámetros.

Salidas auxiliares (alarmas)	Tipo	Directo, Inverso.
	Forma	Tanto en absoluto como valor de derivación.
	Histéresis	Programable.
	Prueba de ruptura	Sobre rango.
Condiciones ambientales	Temperatura de trabajo	0 a 50°C.
	Temperatura de almacenamiento	-20 a 75°C.
	Humedad	85% máx.
	Humedad relativa no condensada)	0 a 50°C.
Rango de aislamiento	Línea de CA respecto a todas las entradas y salidas	2000 Volts.
	Toda otra entrada y salida respecto al contactor del Relay	2000 VCA.
Aprobada	General	CE, UL, RoHS.
Compatibilidad electromagnética (Radiación conforme a BSEN 50081-2)	Interferencia de RF	BSEN 55011. Potencia principal clase A. Todos los demás según clase A.
	Descarga electrostática	BSEN 61000-4-2. Nivel 2; 6 kV contactos. Nivel 3; 8 kV aire.
	Campos electromagnéticos de RF	BSEN 61000-4-3. Nivel 3; 10 V/m. 80 MHz - 1 GHz.
	Transitorios rápidos (barrido)	BSEN 61000-4-4. Nivel 3; potencia 2 kV.
	Interferencia de RF en cableado	BSEN 61000-4-6. Nivel 3; 3 V rms. 150 KHz - 100 MHz.
	Campos magnéticos de alta frecuencia	BSEN 61000-4-8. Nivel 4; 30 A/m.
	Interferencias por picos de tensión	BSEN 61000-4-11. Reducción: 100%. Duración: 0.5 ciclo cada polaridad.
Conexión	General	Terminales a tornillo para grampas soldadas.
Construcción	General	Caja de plástico negro inyectado para montaje frente de panel. Con plaquetas de circuito impreso removibles para cambio de salidas sin remoción del frente. Opcional NEMA 4X/IP66 apto para uso exterior.
Peso	General	195 gramos.

Fuente: Manual de instrucciones del controlador Selec® PID528.

4.1.3.3. Recomendaciones de seguridad.

Este manual está diseñado pensando en todas aquellas personas involucradas con las áreas técnicas de instalación, operación y mantenimiento rutinario de equipos y/o procesos⁹. Todas las medidas de seguridad relacionadas con las codificaciones, los símbolos e instrucciones que aparecen en este manual de instrucciones o en los equipos deben ser estrictamente seguidos para garantizar la seguridad del personal de operación, así como del instrumento. Si el equipo no se gestiona de una manera especificada por el fabricante podría afectar la protección prevista por el equipo

 **PRECAUCIÓN:** *Lea las instrucciones completas antes de la instalación y el funcionamiento de la unidad. Recuerde que se encuentra frente a equipos que comprenden riesgo de choque eléctrico.*

1. Este equipo, normalmente se convierte en una parte del panel de control principal y en tal caso, las terminales no se dejan accesibles al usuario final después de la instalación y el cableado interno.
2. El equipo no se debe instalar en condiciones ambientales distintas de las especificadas en este manual; no debe entrar en las proximidades de cualquier fuente de calentamiento, vapores cáusticos, aceites, vapor, o de otro tipo de medio no deseado.
3. El equipo no contiene incorporado, por tanto, se recomienda la instalación de un fusible externo para circuitos eléctricos. Valor de fusible recomendado al menos 275VAC/1Amp.

⁹ *Selectron Process Controls Pvt.Ltd., India. Manual de instrucciones del controlador Selec® PID528. <http://www.selecindia.com>*

4. Dado que se trata de una central ubicada en el panel de control principal, sus terminales de salida deben conectarse a los equipos de acogida. Dichos equipos tendrán que cumplir también con normas básicas EMI / EMC y los requisitos de seguridad como BS EN 61326-1 y BS EN 61010, respectivamente.

4.1.3.4. Precauciones eléctricas.

El ruido eléctrico generado por la conmutación de cargas de inducción puede crear perturbaciones momentáneas, errores en pantalla, pérdida de datos o daños permanentes al instrumento. Para reducir este ruido se recomienda:

- a) Utilice dispositivo MOV entre el suministro de energía del controlador de temperatura, así como el uso de circuitos de Red *Snubber* entre las cargas.
- b) Utilice cables blindados para separar las entradas.

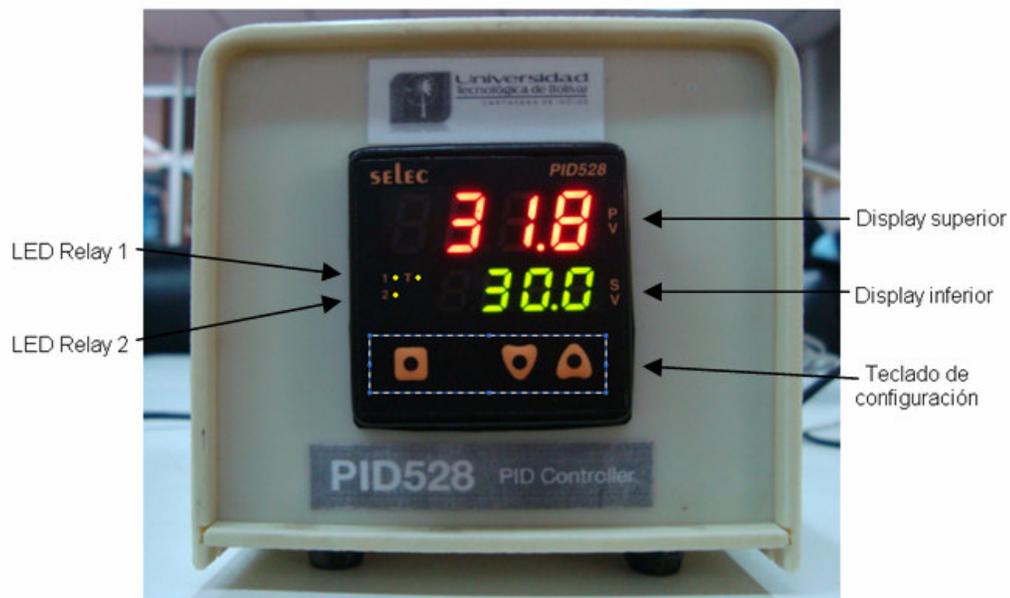
4.1.4. Banco de pruebas.

4.1.4.1. Generalidades.

De forma general, este prototipo consta de dos partes fundamentales: el controlador *Selec*[®] *PID528*, en el cual se encuentra implícito el **Actuador** (Relay para cargas que no superan 0.5A ó implementación de un Contactador para cargas que superen los 0.5A) y la **Planta** representado por un sistema de calefacción basado en una caja de madera donde se encuentran instalados dos (2) bombillos tipo vela incandescentes de 40 Watts que simulan el elemento calefactor, el cual puede producir una temperatura aproximada de 886 °C (1160 °K)¹⁰.

¹⁰ Ficha técnica lám,para incandescente BF50 40W 120/220V. <http://www.phillips.com>

Figura 9. Panel de control principal. Se encuentran integrados todos los terminales de conexión para el controlador PID, sensor y actuador.



Fuente: Prototipo diseñado e implementado por Ronal Salas Contreras – UTB, 2009.

En cuanto a la Planta, podemos encontrar El **sensor** es una termocupla (TC) o Sensor resistivo de temperatura (RTD) del tipo PT100, adaptado a la caja, la cual se conecta de manera directa a los terminales del controlador, partiendo de las recomendaciones que se encuentran en este manual ¹¹.

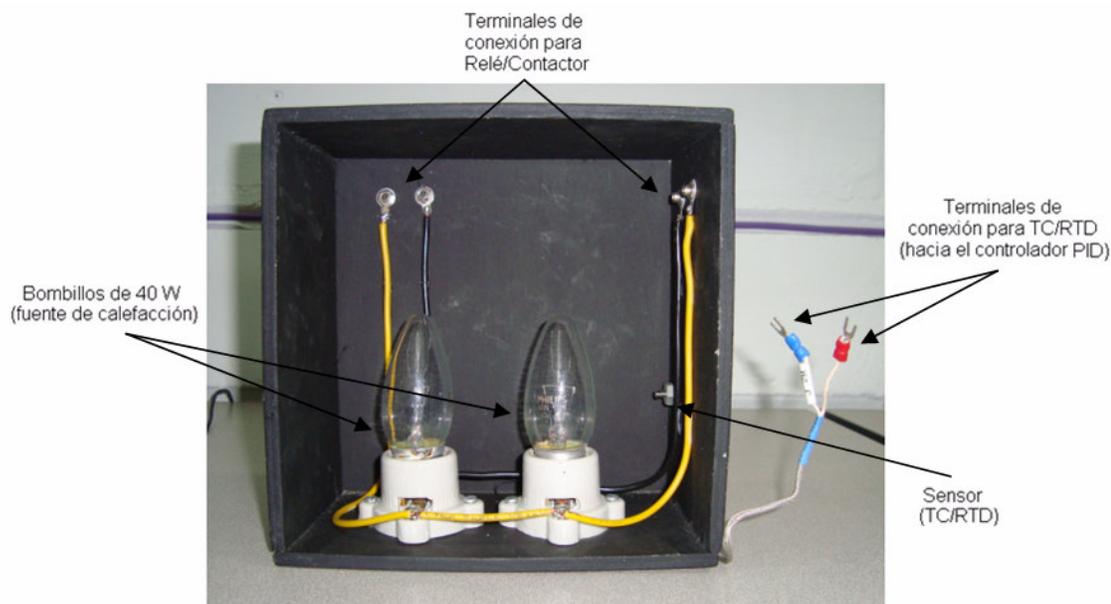
Figura 10. Vista general del Panel de control principal. Este es el sistema que comprende al controlador Selec® PID528 y sus terminales de conexión.



Fuente: Prototipo diseñado e implementado por Ronal Salas Contreras – UTB, 2009.

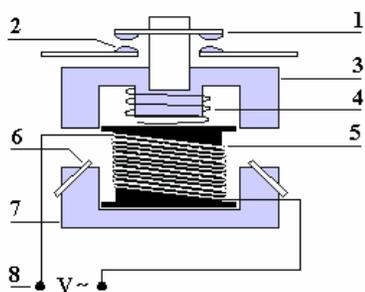
¹¹ Véase (en este manual) apartado 4.1.4.3. Uso adecuado del Sensor.

Figura 11. Prototipo del sistema de calefacción. Se encuentran integrados la fuente de calefacción (bombillos), el sensor (TC/RTD) y los terminales para el Actuador (Relé/Contactor).



Fuente: Prototipo diseñado e implementado por Ronal Salas Contreras – UTB, 2009.

Figura 12. El contactor y sus partes. En este proyecto, es utilizado como Actuador en reemplazo del Relay cuando la corriente necesaria para activar la carga (bombillos) supera los 0.5A.



- 1- Contactos móviles. 2 - Contactos fijos.
- 3- Hierro móvil. 4 - Muelle antagonista. 5 - Bobina.
- 6- Espira de sombra (en corriente alterna).
- 7- Hierro fijo. 8 - Alimentación bobina.

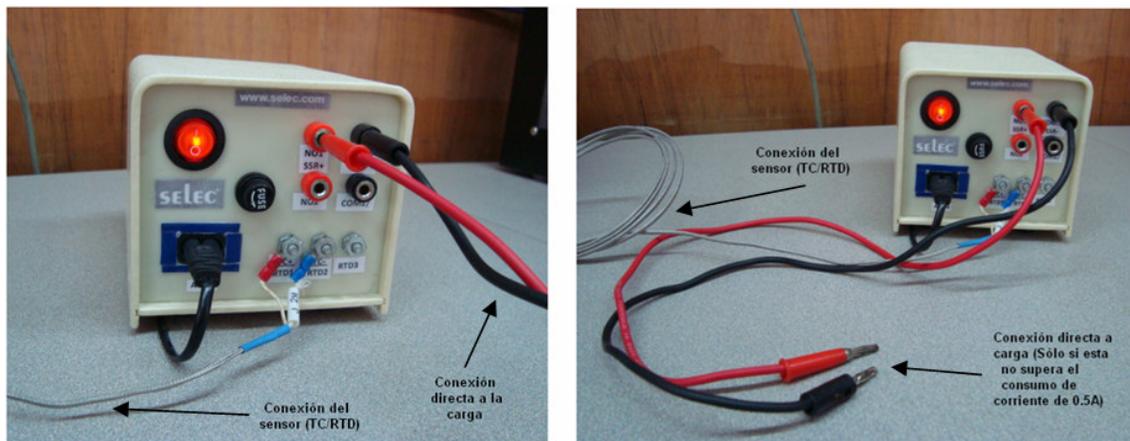


Fuente: <http://www.siemens.com>.

4.1.4.2 Uso adecuado de la planta.

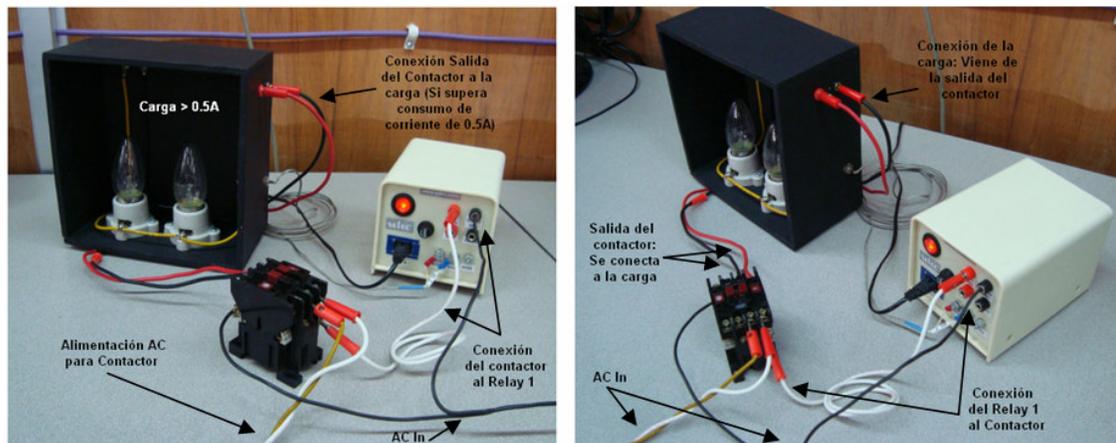
Si la corriente de carga es inferior a 0.5 A conecte la carga de manera directa a los terminales del Relay1 (NO1 y COM1); en caso de utilizar el Relay 2, conecte directamente los terminales de la carga a NO2 y COM2, respectivamente.

Figura 13. Conexión directa de carga: será correcta siempre y cuando la carga tenga consumo de corriente menor a 0.5A.



Fuente: Prototipo diseñado e implementado por Ronal Salas Contreras – UTB, 2009.

Figura 14. Conexión directa de carga: será correcta siempre y cuando la carga exceda el consumo de corriente de 0.5A.



Fuente: Prototipo diseñado e implementado por Ronal Salas Contreras – UTB, 2009.

Si la corriente de carga es mayor de 0.5A, conecte un contactor entre los terminales de salida del Relay seleccionado (NO1/COM1 para Relay 1 y NO2/COM2 para Relay 2), y los terminales de conexión de la Planta.

Nota: Para cargas inductivas, se recomienda la utilización de Red Snubber y MOV, como se ha indicado anteriormente.

Figura 15. Diagrama de control con uso de MOV y Red Snubber: a) para cargas con consumo menor a 0.5A; b) para cargas que superen el consumo de corriente de 0.5A.

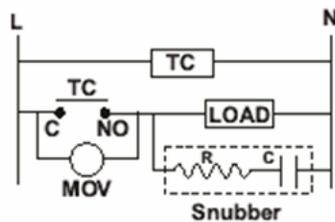


Diagrama de control:

- Red Snubber Parte No: APCR-01
- MOV Parte No: AP-MOV-03.

a)

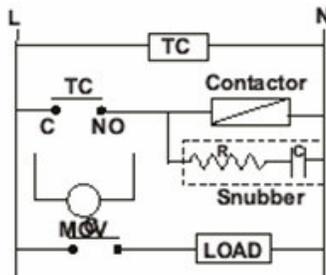


Diagrama de control:

- Red Snubber Parte No: APCR-01
- MOV Parte No: AP-MOV-03.

b)

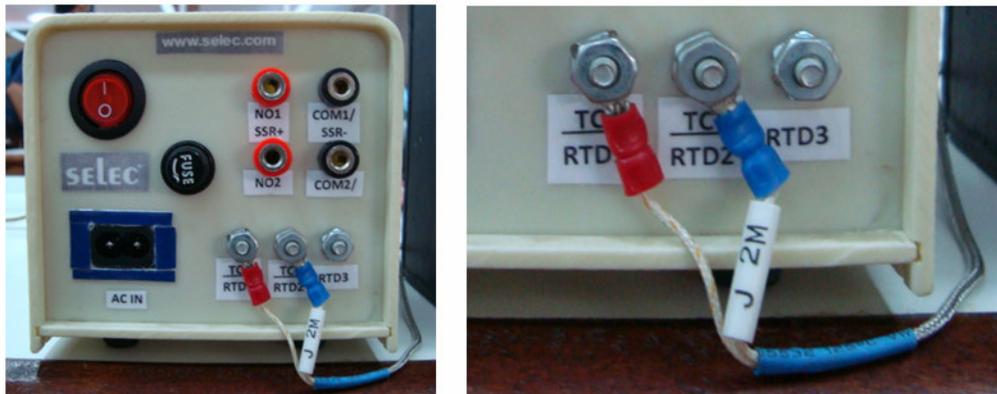
Fuente: Manual de instrucciones del controlador Selec® PID528 ¹².

¹² Selectron Process Controls Pvt.Ltd., India. Manual de instrucciones del controlador Selec® PID528. <http://www.selecindia.com>

4.1.4.3. Uso adecuado del sensor.

- **Conexión de termocupla o termopar (TC):**

Figura 16. Conexión correcta del sensor tipo Termocupla (TC).

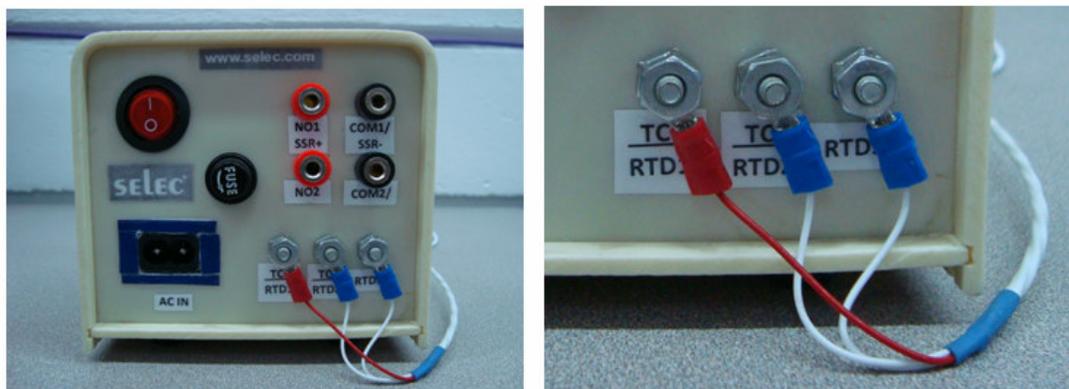


Fuente: Prototipo diseñado e implementado por Ronal Salas Contreras – UTB, 2009.

Conecte la Termocupla o termopar (TC) a las terminales del controlador $TC+$ y $TC-$ de acuerdo a la polaridad, y como se muestra en la figura anterior.

- **Conexión para Sensor resistivo de temperatura (RTD):**

Figura 17. Conexión correcta del sensor tipo Sensor Resistivo de temperatura (RTD).



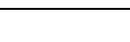
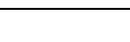
Fuente: Prototipo diseñado e implementado por Ronal Salas Contreras – UTB, 2009.

El Sensor resistivo de temperatura (RTD) consta de tres hilos referenciados para su fácil identificación; conéctelos a los terminales del controlador RTD1, RTD2 Y RTD3, respectivamente, tal y como se muestra en la figura.

4.1.5. Configuración del sistema.

Para ajustar los parámetros de control del sistema *Selec® PID528*, es necesario habilitar el modo de *Configuración*; para ello debe presionar los botones  y  durante tres (3) segundos.

Cuadro 2. Comandos de configuración del controlador Selec® PID528.

Presionar	Display		Nombre	Descripción
	Superior	Inferior		
Press  +  for 3 sec.			* Reseteo manual	Programable desde -99.9 hasta 99.9 para 0.1°C.
Press 			* Config. bloqueo	Bloqueo fijo, Código: 0085.
Press 			Sensor de entrada	Selecciona el tipo de sensor de entrada: Opciones: J, K, T, R, S ó RTD.
Press 			Resolución del Display	Resolución: 0.1°C ó 1°C. Válido sólo para sensores tipo J, K y RTD.
Press 			Limite de alto nivel	Selecciona el límite máximo de Set point.
Press 			* Modo de sintonización	Para sintonizar el instrumento seleccionar  y salir de la configuración. El LED de sintonización parpadeará indicando el progreso en sintonía.

Press A	Pb	0 100	Banda proporcional	Banda proporcional programable de 0.0 a 400.0°C. Pb=00 hará que el controlador funcione en modo de control ON/OFF.
Press A	INTE	120	Tiempo de integración	(Reseteo) Programable de 0 a 3600 seg. Este parámetro es solicitado sólo en modo PID, es decir, cuando PB>0.
Press A	DETE	030	Tiempo de derivación	(Tasa) programable de 0 a 200 seg. Este parámetro se solicita solo en modo de control PID, es decir, cuando PB>0.
Press A	CYC	020	Tiempo del ciclo	Rango: 1 a 100 segundos.
Press A	HYS1	0 10	Histéresis de Set1	Válido sólo para modo ON/OFF. Programable de 0.1 a 99.9.
Press A	PLY1	FE	Salida del modo de Relay1	Selecciona Reverse FE para calefacción & Forward FD para refrigeración.
Press A	PLY2	FE	Salida del modo de Relay2	Selecciona Reverse FE para calefacción & Forward FD para refrigeración.
Press A	SEET	ABS	Set point 2	Absoluta / Desviación, alternado entre los modos ABS / DEU presionando las teclas □ & ▲ .
Press A	SEET	0000	Set point 2	-99 hasta el máximo rango del sensor para 1°C de resolución, y -99.9 a 999.9 para 0.1°C de resl.
Press A	HYS2	0 10	Histéresis de Set2	Programable desde 0.1°C hasta 99.9°C.
Press A	L-SP	YES	Bloqueo de Set point	Bloqueo de Set point Alternado entre los modos NO / YES con cada pulsación de las teclas □ & ▲ .
Press A	PSEE	NO	Reseteo	Reseteo de todos los parámetros a valores predeterminados, alternando entre los modos NO / YES con cada pulsación de las teclas □ & ▲ .

Presione las teclas  y  durante tres (3) segundos para salir del modo de programación.
NOTA: * parámetros se explican en el respectivo cuadro configuración del sistema.

Fuente: Manual de instrucciones del controlador Selec® PID528 ¹³.

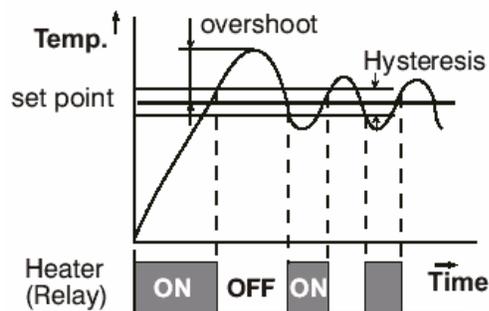
4.1.6. Procedimiento.

4.1.6.1. Controlador ON/OFF con Histéresis.

El Relay seleccionado estará en estado encendido (ON) siempre que los valores de temperatura estén por debajo de los valores de ajuste o **Set point**, mientras que en los cortes donde los valores de temperatura estén por encima, el Relay estará en estado apagado (OFF). Como la temperatura del sistema desciende, el Relay se enciende (ON) a una temperatura ligeramente inferior al **Set point**.

Histéresis: La diferencia entre la temperatura a la que el Relay conmuta (ON/OFF) se denomina histéresis o banda muerta. En la figura 9 se puede apreciar gráficamente el modelo de control con este tipo de fenómeno.

Figura 18. Representación del modelo de control ON/OFF con Histéresis.



Fuente: Manual de instrucciones del controlador Selec® PID528.

¹³ Selectron Process Controls Pvt.Ltd., India. Manual de instrucciones del controlador Selec® PID528. <http://www.selecindia.com>

1. Ajuste el valor de la resolución en 0.1. Seleccione el tipo de sensor que utilizará para la correcta medición de la temperatura; para ello debe establecer en la configuración del controlador si es del tipo *Termocupla* (J, K, t, R ó S) o *Sensor Resistivo de temperatura* (RTD).

Figura 19. Selección del sensor (TC/RTD)



Fuente: Prototipo diseñado e implementado por Ronal Salas Contreras – UTB, 2009.

2. Fije el **Set point** en un valor intermedio de capacidad del proceso; luego seleccione la banda proporcional en valor nulo ($Pb=0$) y ajuste el valor mínimo de Histéresis (*Hys1*).

Figura 20. Ajuste de Set point, Pb e Histéresis



Fuente: Prototipo diseñado e implementado por Ronal Salas Contreras – UTB, 2009.

3. Durante el proceso, tome datos de temperatura, tiempo y estado (ON/OFF) y consígnelos en la Tabla 1.

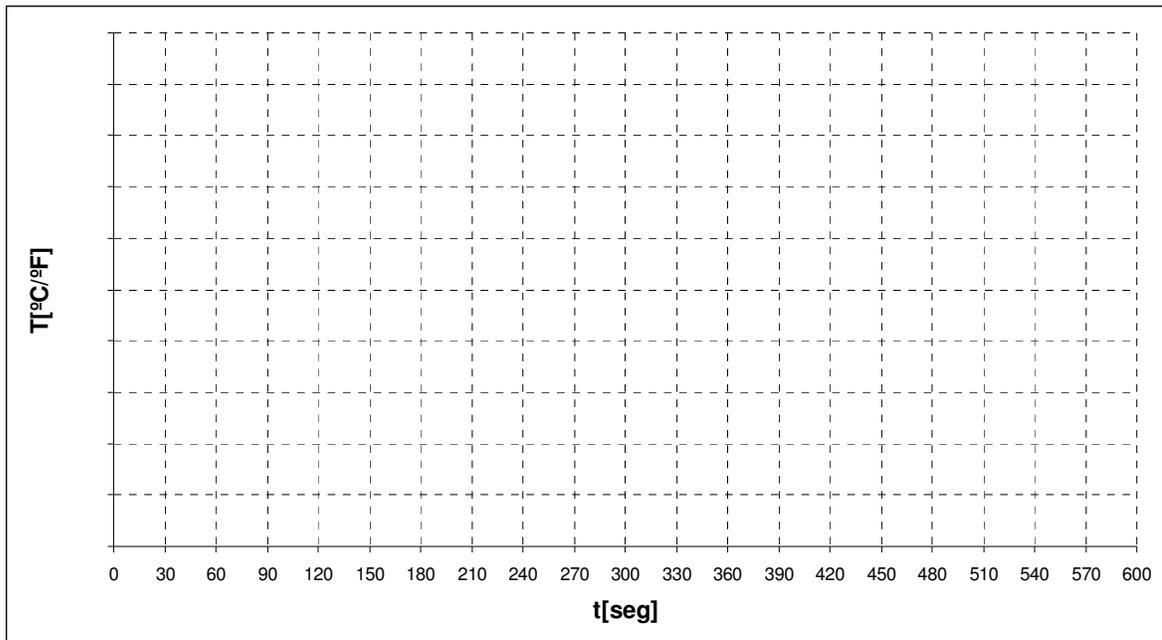
Tabla 1. Datos de Temperatura, Tiempo y Estado para Histéresis mínima.

T[°C/°F]															
t [seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
Estado															
T[°C/°F]															
t [seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590
Estado															

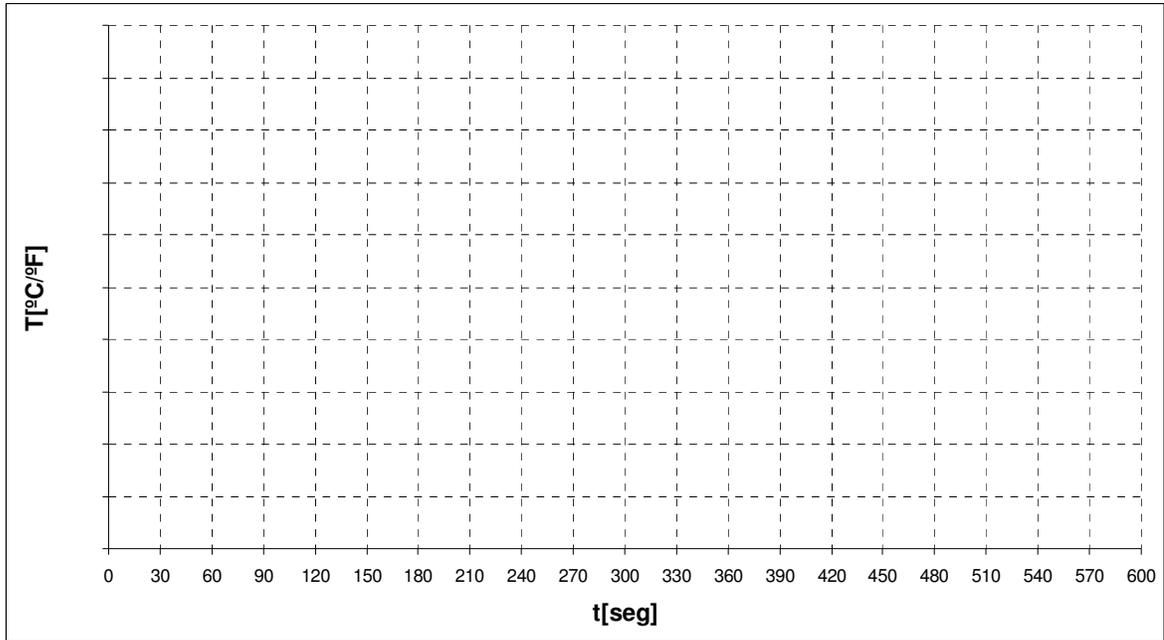
4. Realice las gráficas de seguimiento de Temperatura Vs. Tiempo y Estado (ON/OFF) Vs. Tiempo. Anote observaciones.

Gráfica 1. Control ON/OFF con Histéresis mínima.

Temp Vs. Tiempo



Estado Vs. Tiempo



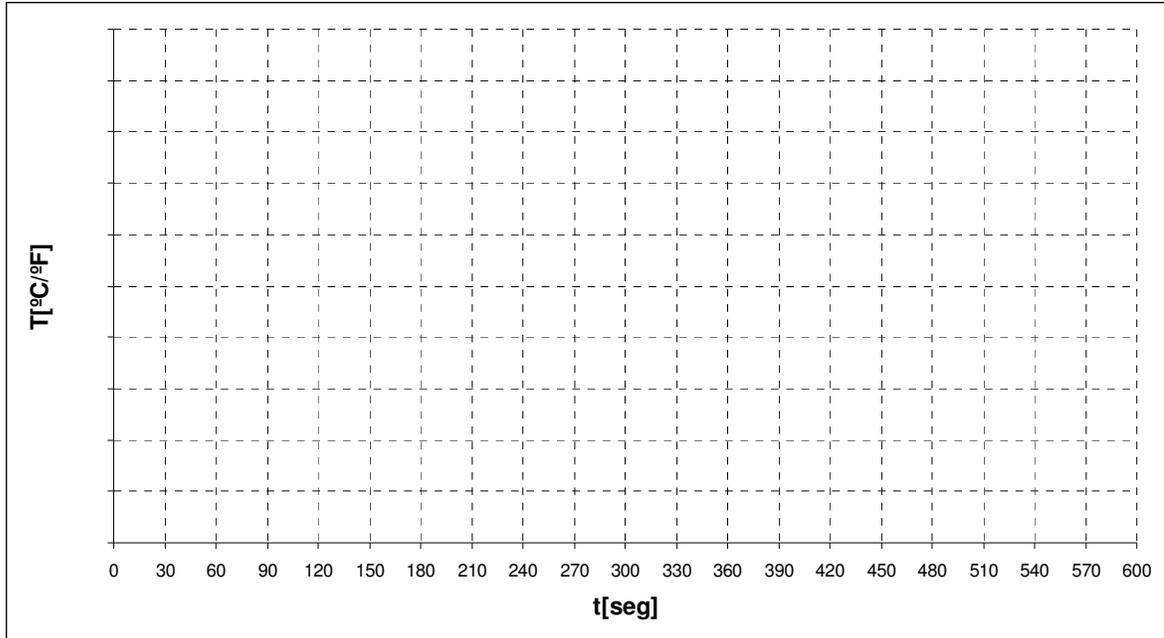
5. Aumente el valor de Histéresis $Hys1 = 0.5$, tome datos de temperatura, tiempo y estado (ON/OFF) y consígnelos en la Tabla 2. Realice las gráficas de seguimiento de Temperatura Vs. Tiempo y Estado (ON/OFF) Vs. Tiempo; deje que el proceso sea lo más estable posible, observe el comportamiento del sistema y anote sus conclusiones.

Tabla 2. Datos de Temperatura, Tiempo y estado para Histéresis = 0.5.

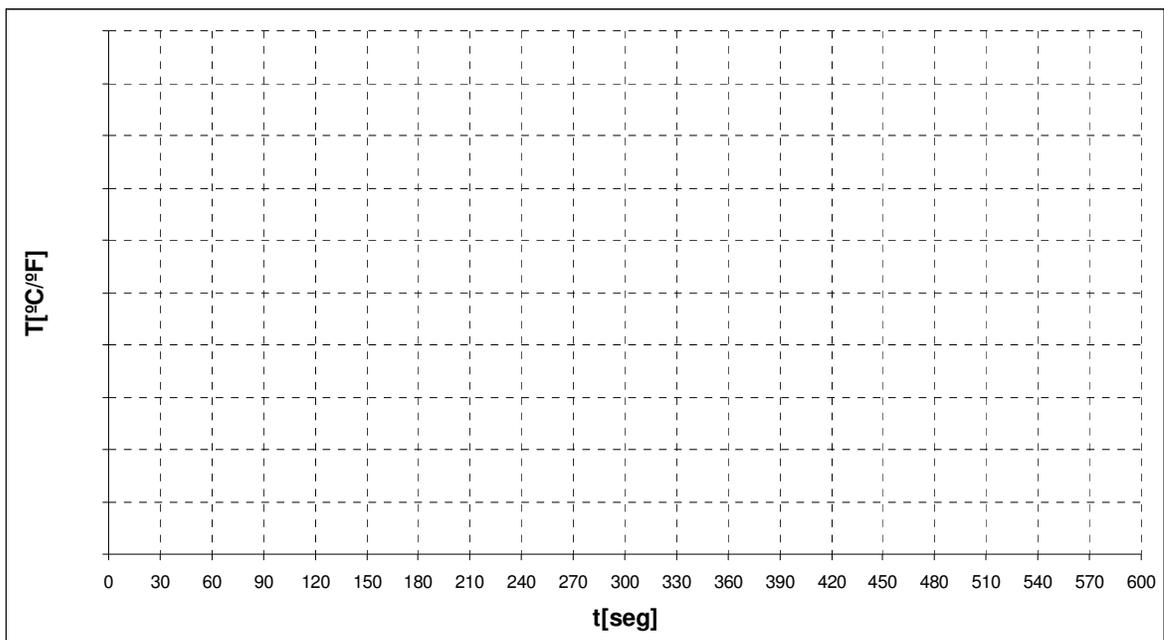
T[°C/°F]															
t[seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
Estado															
T[°C/°F]															
t[seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590
Estado															

Gráfica 2. Control ON/OFF con Histéresis = 0.5.

Temp Vs. Tiempo



Estado Vs. Tiempo



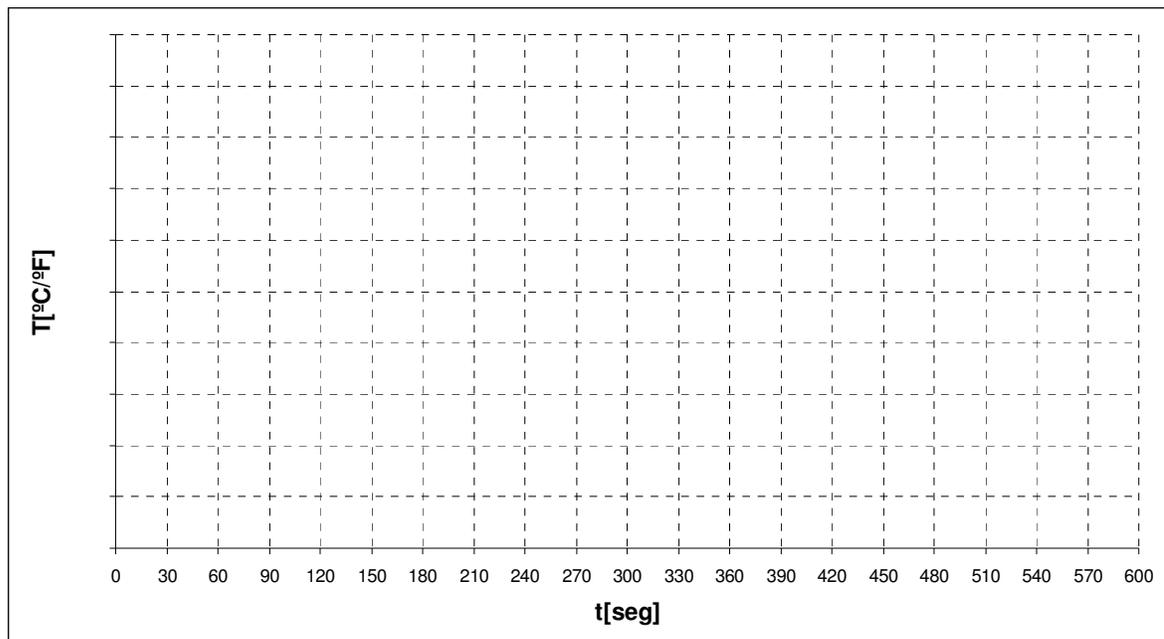
6. Realice el mismo procedimiento para Histéresis $Hys1 = 1$, tome datos de temperatura, tiempo y estado (ON/OFF) y consígnelos en la Tabla 3; realice las gráficas de seguimiento de Temperatura Vs. Tiempo y Estado (ON/OFF) Vs. Tiempo; observe el comportamiento del sistema y anote sus observaciones.

Tabla 3. Datos de Temperatura, Tiempo y estado para Hys1 = 1.

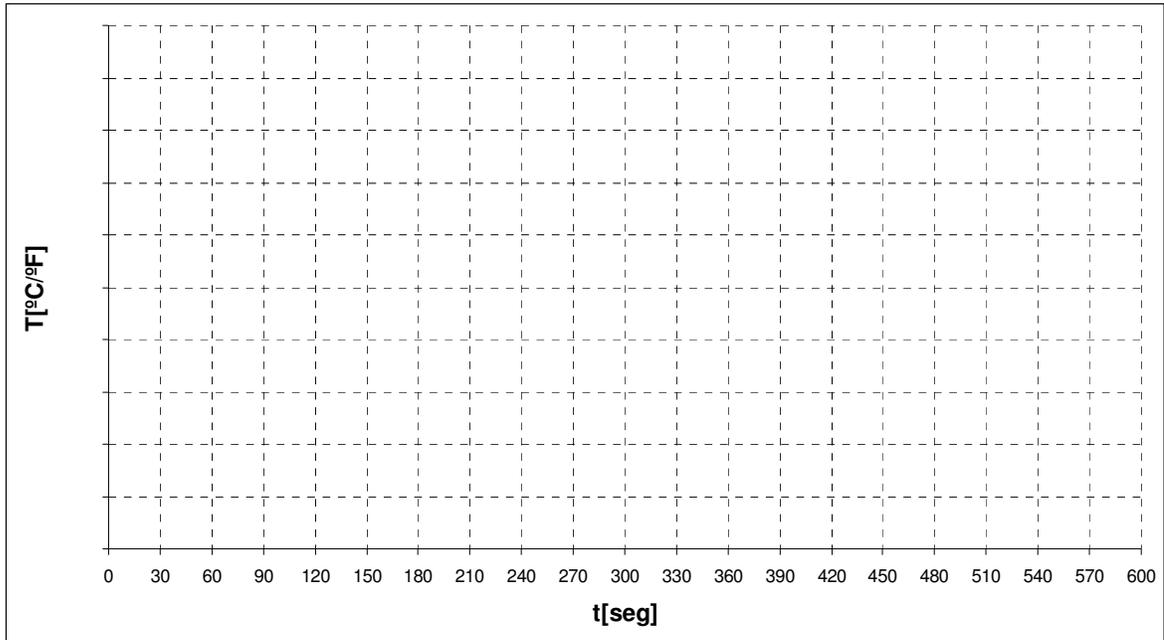
T[°C/°F]															
t[seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
Estado															
T[°C/°F]															
t[seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590
Estado															

Gráfica 3. Control ON/OFF con Histéresis = 1.

Temp Vs. Tiempo



Estado Vs. Tiempo



4.1.6.2. Preguntas

- ¿Cómo se comporta el proceso con Histéresis de 0.1, 0.5 y 1?

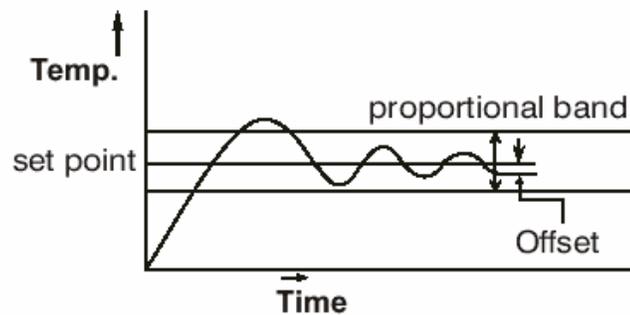
- ¿Qué efecto produce la Histéresis en el proceso?

4.2. PRACTICA Nº 2: CONTROL PROPORCIONAL (P)

4.2.1. Introducción.

En Control proporcional, el tiempo de encendido y apagado del Relay varía en proporción a la desviación de la temperatura actual desde un valor predeterminado (valor de **Set point**). La acción proporcional se produce dentro de una banda sobre el punto de ajuste, ejerciendo mayor control que el modo de control ON/OFF.

Figura 21. Representación del modelo de Control Proporcional.



Fuente: Manual de instrucciones del controlador Selec® PID528.

4.2.2. Equipos.

Controlador *Selec® PID528*.

Fuente de calefacción.

Termocupla o Sensor resistivo de temperatura PT100.

Contactador 110V/60Hz.

Fuente de alimentación 100VAC.

Cronómetro.

Cables.

4.2.3. Marco teórico.

La acción de control es *Proporcional* al error; es decir, que en el tiempo $c(t)=K_C \cdot e(t) + c_S$ donde c_S es la señal de la condición de estado estacionario, K_C es la constante de proporcionalidad del controlador. Sin duda, sólo K_C caracteriza completamente al controlador proporcional, de tal manera que el producto entre ésta y el error, hagan que el error estacionario sea casi nulo.

Se suele usar una notación diferente, pero equivalente, al hablar de la *Banda proporcional* (Pb) del controlador, definida como $Pb=100/K_C$. La parte proporcional no considera el tiempo, por lo tanto, la mejor manera de solucionar el error permanente y hacer que el sistema contenga alguna componente que tenga en cuenta la variación respecto al tiempo, es incluyendo y configurando las acciones integral y derivativa.

4.2.4. Procedimiento.

4.2.4.2. Controlador proporcional.

En esta práctica se inicia con una banda proporcional ancha que se irá estrechando gradualmente; se observará el comportamiento del sistema hasta obtener la estabilidad deseada.

1. Fije el *Set point* en un valor intermedio de la capacidad del proceso; selecciones un valor de banda proporcional igual a 20, observe el comportamiento del proceso.
2. Tome datos de Temperatura y Tiempo para la banda proporcional igual a 20 y consígnelos en la Tabla 4.

3. Seleccionando valores de banda proporcional $Pb=5$, $Pb=3$ y $Pb=0.5$, realice el mismo procedimiento de los numerales 1 y 2.

Tabla 4. Datos de Temperatura y Tiempo para Control proporcional.

PB=20	T[°C/°F]															
	t [seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
	T[°C/°F]															
	t [seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590
PB=5	T[°C/°F]															
	t [seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
	T[°C/°F]															
	t [seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590
PB=3	T[°C/°F]															
	t [seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
	T[°C/°F]															
	t [seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590
PB=0.5	T[°C/°F]															
	t [seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
	T[°C/°F]															
	t [seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590

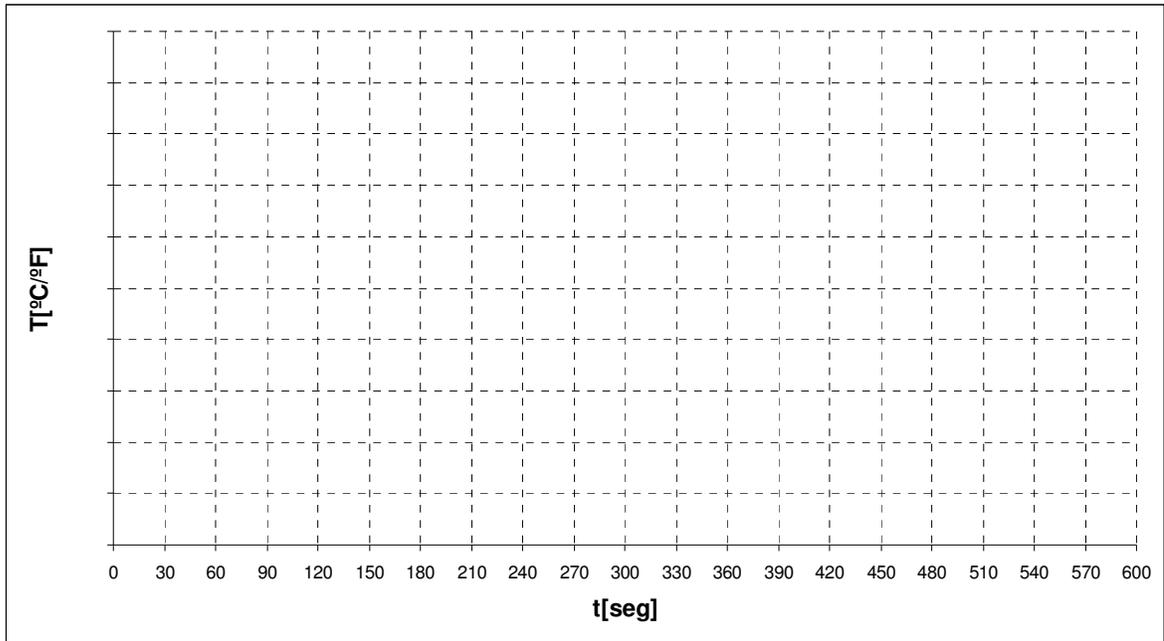
4. Seleccione los datos de Temperatura y Tiempo de dos bandas proporcionales diferentes (una ancha y otra estrecha), y dibuje sus respectivas gráficas.

Pb (Ancha) = _____

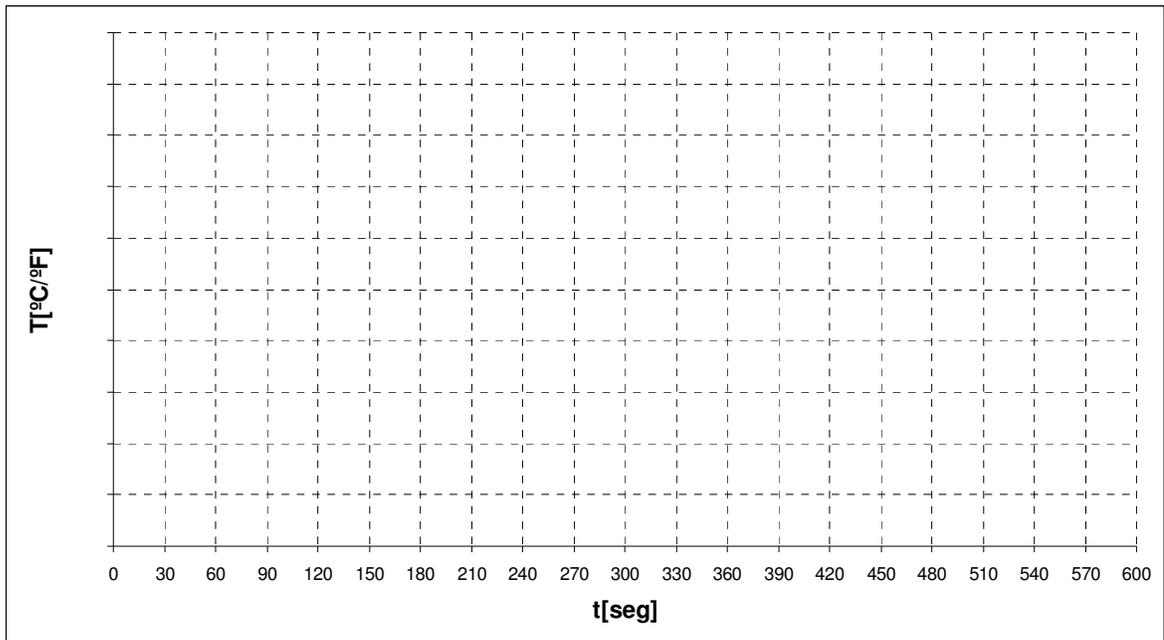
Pb (Estrecha) = _____

Gráfica 4. Control Proporcional.

P_b (Ancha) = _____



P_b (Estrecha) = _____



4.2.4.2. Preguntas.

- ¿Cómo se comporta el controlador con una Pb ancha y luego con una estrecha?

- ¿Cuál fue la Pb optima para el proceso?

- ¿Por qué el control proporcional no estabiliza el control de la línea de referencia?

4.2.4.3. Observaciones.

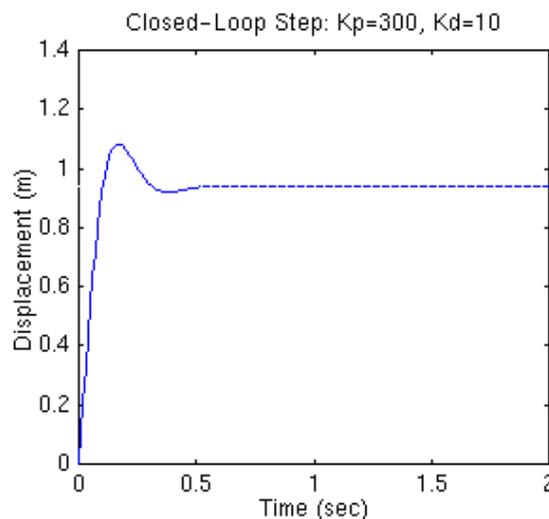
4.3. PRACTICA Nº 3: CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL (PI)

4.3.1. Introducción.

Al implementar un controlador con acción proporcional e integral (PI), el error estacionario después de un tiempo se hace cero, siempre y cuando el sistema tenga respuesta estable, aunque puede tender a ser oscilatorio; es por ello que los controladores PI se han vuelto particularmente comunes, ya que la acción derivativa es muy sensible al ruido y la ausencia del proceso integral puede evitar que se alcance al valor deseado debido a la acción de control.

Un controlador integral (K_i) decrementa el tiempo de elevación, incrementa tanto el sobrepico cuanto el tiempo de establecimiento, y elimina el error de estado estacionario.

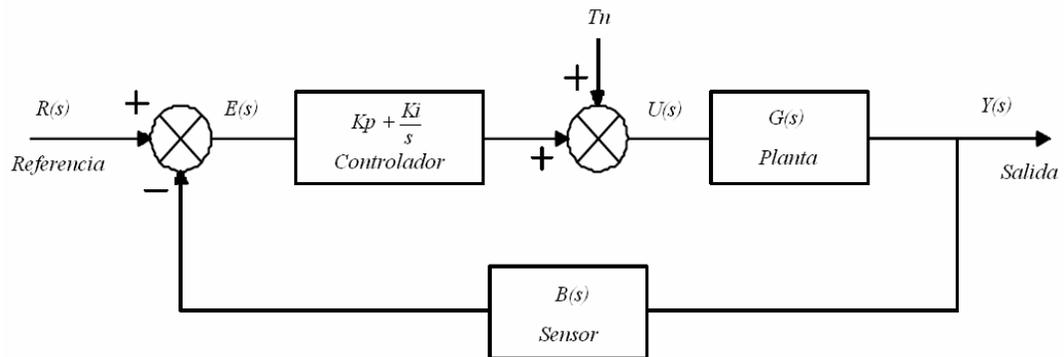
Figura 22. Reducción del error estacionario en un proceso de control de temperatura PI.



Fuente: CTM: Tutorial PID ¹⁴.

¹⁴ http://www.ib.cnea.gov.ar/~control2/Links/Tutorial_Matlab_esp/PID.html#pi

Figura 23. Diagrama de bloques del modelo de control Proporcional Integral.



Fuente: Laboratorio de control analógico ¹⁵.

4.3.2. Equipos.

Controlador *Selec® PID528*.

Fuente de calefacción.

Termocupla o Sensor resistivo de temperatura PT100.

Contactador 110V/60Hz.

Fuente de alimentación 100VAC.

Cronómetro.

Cables.

4.3.3. Marco teórico.

En un proceso ordinario de control, la banda integral anulada o en su valor más bajo, obliga a que la banda proporcional deba reajustarse; como la acción integral empeora la estabilidad del control, se aumenta ligeramente la banda proporcional.

¹⁵ <http://nitsuga.net.eu.org/practicas/analogico/temperatura.pdf>

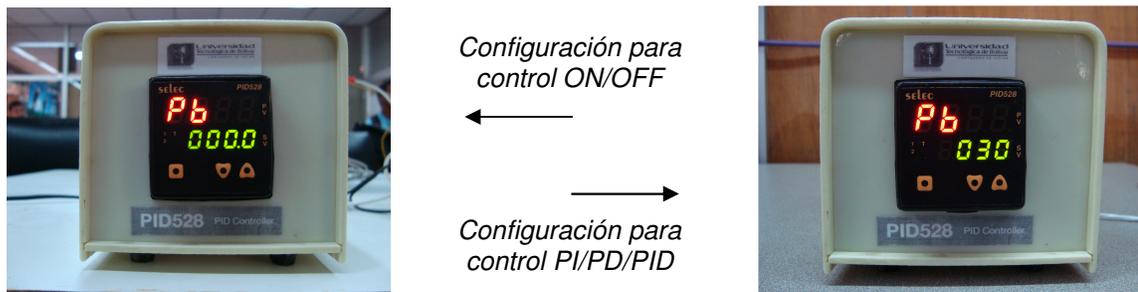
Para estudiar este fenómeno en el laboratorio, se incrementará por pasos la banda integral, creando cada vez perturbaciones en forma de desplazamiento del *Set Point*, hasta que empiecen a aumentarse los ciclos. Se hará notable que la última banda integral ensayada, se reduzca ligeramente.

4.3.4. Procedimiento.

4.3.4.4. Controlador Proporcional Integral.

1. Ajuste la banda proporcional en un valor diferente de cero, esto hará que el Controlador deje de funcionar bajo parámetros de control ON/OFF y se puedan manipular la banda integral y la banda derivativa.

Figura 24. Activación del modo Proporcional.



Fuente: Prototipo diseñado e implementado por Ronal Salas Contreras – UTB, 2009.

2. Anule la banda derivativa (parámetro de configuración *der.t*) igualándola a cero para convertir al controlador en un sistema *PI*; luego, ajuste la banda integral a 20 seleccionando el parámetro *Int.t*; observe el comportamiento del proceso.

Figura 25. Configuración de bandas derivativa e integral para Control Proporcional Integral.



Fuente: Prototipo diseñado e implementado por Ronal Salas Contreras – UTB, 2009.

3. Tome datos de Temperatura y Tiempo y consígnelos en la tabla 5.

Tabla 5. Datos de Temperatura y Tiempo para banda integral igual a 20.

T[°C/°F]															
t [seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
T[°C/°F]															
t [seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590

4. Seleccione valores de banda integral $Int.t=10$ e $Int.t=2$, Observe el comportamiento del proceso; luego, escoja cualquiera de estas bandas integrales, recomendable la más estrecha posible, tome sus datos de Temperatura y Tiempo y consígnelos en la tabla 6.

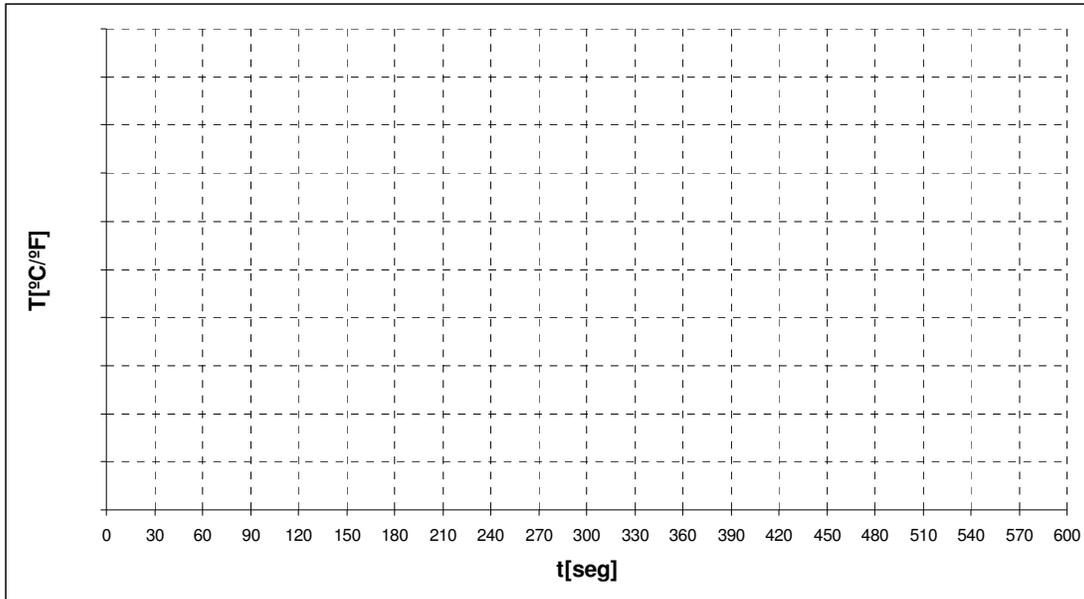
Tabla 6. Datos de Temperatura y Tiempo para banda integral igual a ____.

T[°C/°F]															
t [seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
T[°C/°F]															
t [seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590

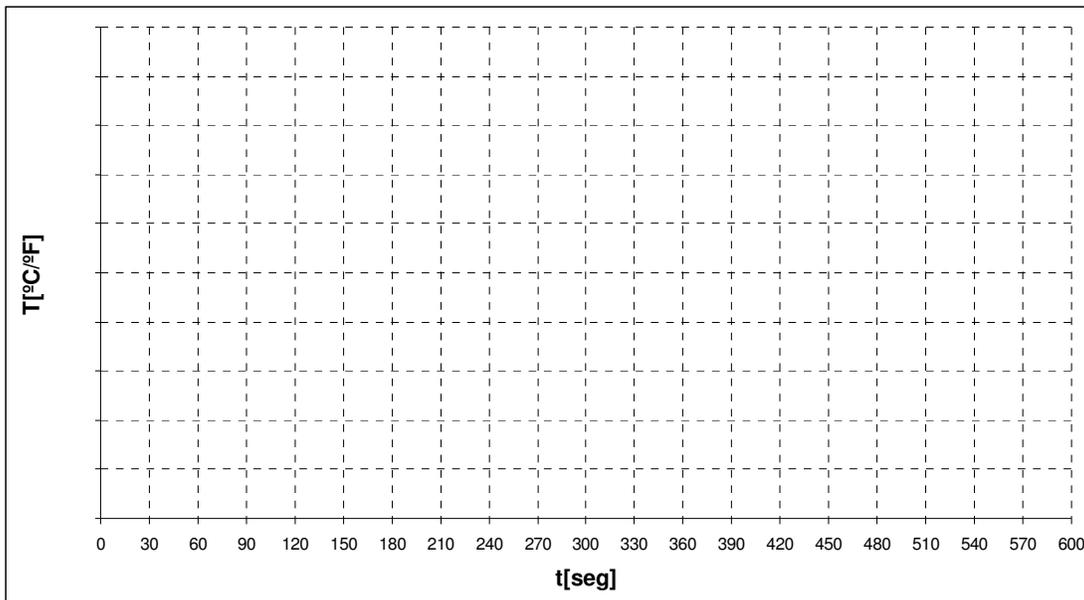
5. Dibuje las gráficas respectivas utilizando los datos de las tablas 5 y 6. Anote sus observaciones.

Gráfica 5. Control Proporcional Integral.

Int.t = 20



Int.t = ____

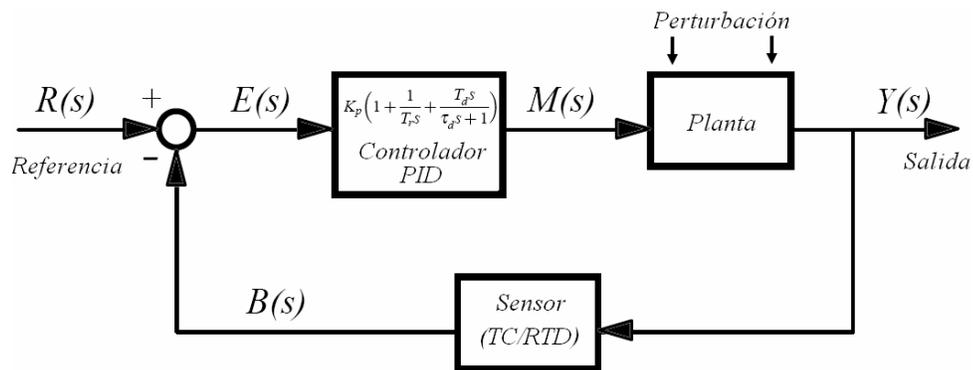


4.4. PRACTICA N° 4: CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID).

4.4.1. Introducción.

El objetivo de los ajustes de los parámetros *PID* es lograr que el lazo de control corrija eficazmente y en el mínimo tiempo los efectos de las perturbaciones; se tiene que lograr el mínimo margen de error. Si los parámetros del controlador *PID* (la banda proporcional, integral y derivativa) se eligen incorrectamente, el proceso a controlar puede ser inestable, haciendo que la salida de este varíe, con o sin oscilación.

Figura 26. Diagrama de bloques representativo del Control PID.



Fuente: Ogata, Katsuhiko (1998). Ingeniería de Control Moderna

Ajustar un lazo de control significa ajustar los parámetros del sistema de control a los valores óptimos para la respuesta del sistema de control deseada; el comportamiento óptimo ante un cambio del proceso o cambio del *Set point* varía dependiendo de la aplicación. Generalmente, se requiere estabilidad ante la respuesta dada por el controlador, y este no debe oscilar ante ninguna combinación de las condiciones del proceso y cambio de *Set point* ¹⁶.

¹⁶ Ogata, Katsuhiko (1998). Ingeniería de Control Moderna

4.4.2. Equipos.

Controlador *Selec® PID528*.

Fuente de calefacción.

Termocupla o Sensor resistivo de temperatura PT100.

Contactador 110V/60Hz.

Fuente de alimentación 100VAC.

Cronómetro.

Cables.

4.4.3. Marco teórico.

Para el ajuste de un controlador *PID*, existen varios métodos que permiten estabilizar la respuesta del proceso o sistema que deseamos controlar; en nuestro caso, utilizaremos la regla de *Ziegler-Nichols* para el ajuste manual del mismo. Este método consiste en evaluar, mediante tanteo, que valores de las bandas proporcional, integral y derivativa generan la mejor respuesta del sistema; luego, utilizando la regla que se muestra en el cuadro 3, se calculan los valores óptimos para ajustar finalmente el controlador *PID*.

Cuadro 3. Regla de Ziegler-Nichols. Patrones de cálculo para ajuste de un controlador.

Controlador	Kp	Ti	Td
P	$0.5K\mu$	No aplica	No aplica
PI	$0.45K\mu$	$T\mu / 0.5$	No aplica
PID	$0.6K\mu$	$T\mu / 2$	$T\mu / 8$

Fuente: CAUT: Control PID clásico¹⁷.

¹⁷ http://www.csd.newcastle.edu.au/SpanishPages/clase_slides_download/C07.pdf

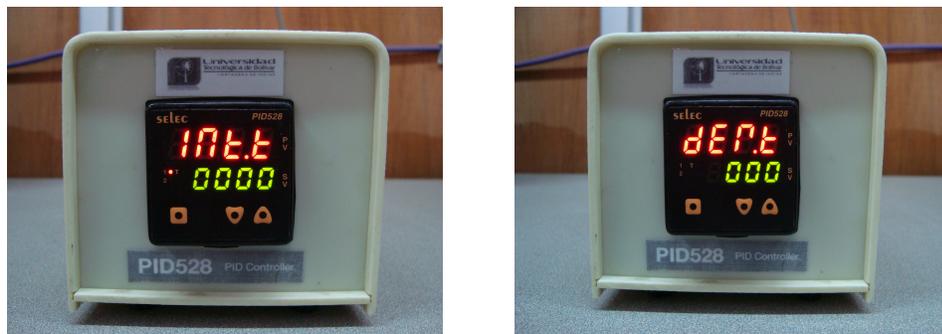
Entonces, con las bandas integral (*Int.t*) y derivativa (*der.t*) anuladas o al mínimo, se estrecha la banda proporcional como al principio de la experiencia; se aumenta ligeramente esta última y, a continuación, todavía con la banda derivativa anulada o en su valor mínimo, se incrementa por pasos la banda integral hasta obtener su valor óptimo; es decir, que lleve rápidamente la variable del proceso al *Set point*, pero sin crear inestabilidad. Seguidamente se aumenta la banda derivativa en pequeños incrementos, creando cada vez desplazamientos de las perturbaciones que se presentan en el proceso, hasta obtener una disminución de los ciclos de la curva de respuesta. Después de efectuar estos ajustes, es posible que sea necesario efectuar un re-tanteo en todas las bandas, ya que se influyen mutuamente.

4.4.4. Procedimiento.

4.4.4.1. Controlador PID y el método de Ziegler-Nichols.

1. Ajustando el valor de la referencia igual a 30, seleccione la banda proporcional $Pb=2$ y cambie los valores de la banda integral (*Int.t*) y la banda derivativa (*der.t*) a 0.

Figura 27. Método de Ziegler-Nichols: ajuste de bandas integral y derivativa.



Fuente: Prototipo diseñado e implementado por Ronal Salas Contreras – UTB, 2009.

2. Disminuya poco a poco la banda proporcional hasta que el sistema oscile; tome datos de Temperatura y Tiempo del proceso en oscilación y anótelos en la tabla 7.

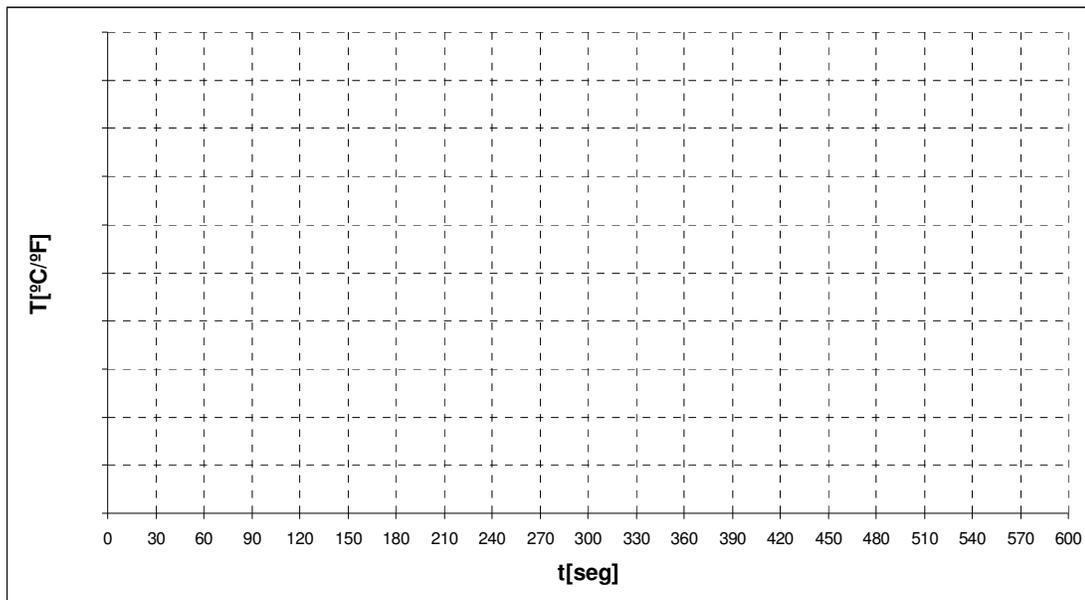
Tabla 7. Datos de Temperatura y Tiempo para el proceso en estado oscilatorio.

T[°C/°F]															
t [seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
T[°C/°F]															
t [seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590

3. A continuación, dibuje la gráfica del proceso utilizando los datos de la tabla 7. Mida el periodo de oscilación ($T\mu$) y la ganancia de la banda proporcional ($K\mu$), y anótelos.

Gráfica 6. Control PID: método de Ziegler-Nichols.

Temperatura Vs. Tiempo



$K\mu =$ _____

$T\mu =$ _____

4. Obtenga los parámetros del *PID* aplicando la regla de *Ziegler-Nichols* y anótelos en la tabla 8. Con estos datos, ajuste el controlador *PID*, fijando los valores de la banda proporcional K_p (*Pb*), la banda integral T_i (*Int.t*) y la banda derivativa T_d (*der.t*).

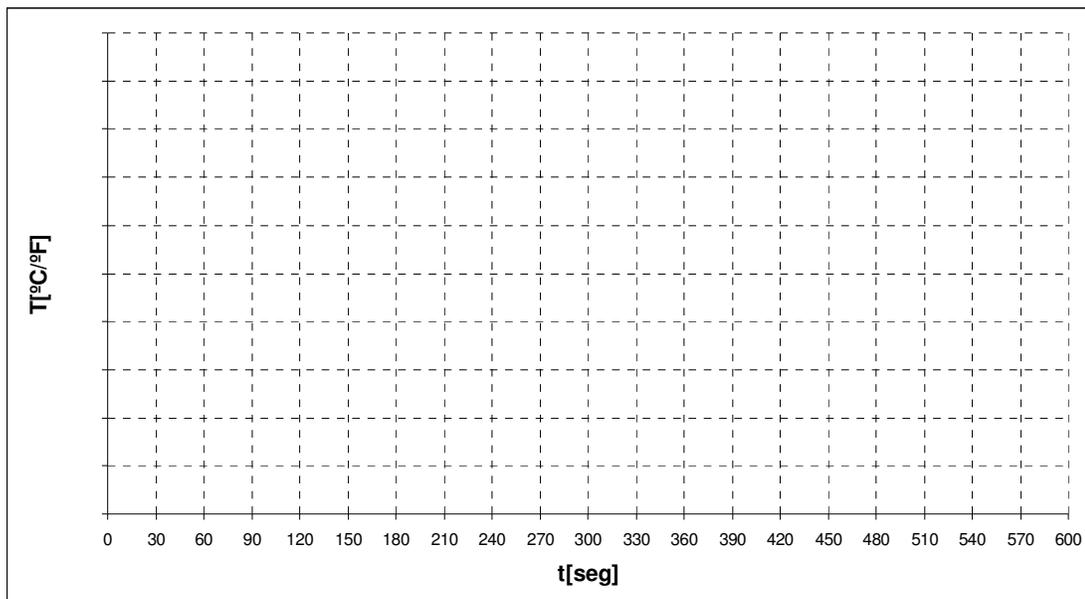
Tabla 8. Parámetros calculados para ajuste del controlador PID.

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID	$0.6K\mu$	$T\mu / 2$	$T\mu / 8$
Calculado			

5. Tome datos de Temperatura y Tiempo del nuevo controlador y consígnelos en la tabla 9; dibuje la gráfica característica del proceso y anote sus observaciones.

Gráfica 7. Respuesta del Controlador PID ajustado con el método de Ziegler-Nichols.

Temperatura Vs. Tiempo



Parámetros de ajuste: $P_b = \underline{\hspace{2cm}}$, $Int.t = \underline{\hspace{2cm}}$ seg, $der.t = \underline{\hspace{2cm}}$ seg

Tabla 9. Datos de Temperatura y Tiempo del proceso con cambio de referencia.

T[°C/°F]															
t [seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
T[°C/°F]															
t [seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590

4.4.4.2. Preguntas.

- ¿Qué ventajas o desventajas provee el control con respuesta oscilatoria?

- ¿Por qué es importante el ajuste de las bandas integral y derivativa?

- Si el proceso es estable, ¿qué sucede cuando se varía el Set point?

4.4.4.3. Observaciones.

CONCLUSIONES

Los sistemas PID son utilizados en aproximadamente un 80 % de los controles de procesos, debido a su suficiente flexibilidad como para alcanzar excelentes resultados a un precio bajo con respecto a sus competidores; es por eso que se ha querido reforzar su importancia a través de este trabajo. El uso de los modos de control, es siempre conforme a las características del proceso, lo cual significa que debemos entender bien la operación del proceso antes de automatizarlo; es por ello, que como valor agregado, se entrega este proyecto didáctico, enfocado a la educación superior; de igual forma, este se constituye como aporte adicional al trabajo de investigación, diseño y construcción que muchos estudiantes y profesionales de la Ingeniería desarrollamos a diario con el fin de incrementar la calidad de vida de los seres humanos.

Se ha demostrado también la implementación de un económico sistema de control de temperatura de tipo capaz de ayudar a desarrollar el conocimiento de aquellos que tienen algún interés particular en la teoría del control, enfatizando en el control Proporcional Integral Derivativo (PID); de la misma manera, este permite a los estudiantes observar la forma más fácil de controlar un proceso, identificar cada una de sus partes y entender cada función, gracias a la complementación teórica que se entrega en este manual.

El sistema diseñado cumple el objetivo de acercar al estudiante a todas las etapas del desarrollo de un sistema de control: definición del problema, modelado, sintonización, implementación y comprobación experimental (esta última podrá apreciarse en laboratorio mediante previos manuales de prácticas desarrollados por la UTB).

BIBLIOGRAFIA

- Smith, Carlos A. Corripio (1996). Control Automático de Procesos. Teoría y Práctica. Limusa Noriega Editores.
- Ogata, Katsuhiko (1998). Ingeniería de Control Moderna. Tercera Edición. Prentice-Hall hispanoamericana, S.A.
- Franklin, Gene. Powell, David. Emami-Naeine, Abbas (1991). Control de Sistemas Dinámicos con Retroalimentación. Addison-Wesley Iberoamericana.
- Chen, Chi-Tsong (1993). Analog & Digital. Control System Design. Saunders College Publishing. Hartcourt Brace Jovanovich College Publishers.
- M. Bañuelos S., J. Castillo H., G. Rayo L. S. Quintana T., R. Damián Z., J. Pérez S. Controlador de temperatura PID de temperatura de tipo didáctico. Lab. de Electrónica. Centro de Instrumentos, UNAM. Apdo. Postal 70-186. México, D.F. C.P. 04510. Tel. (5) 622-86-08 ext. 111. FAX: (5) 622-86-53. E-mail: mike@aleph.cinstrum.unam.mx
- Selectron Process control Pvt.Ltd., India. Operating manual/0506/PID528/Version 3 OP088-V03 (Page 2 of 2). Manual de instrucciones del controlador Selec® PID528. <http://www.selecindia.com>.
- Améstegui Moreno, Mauricio (2001). Apuntes de control PID. Univerisidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia. Primera edición.

- Contreras Montes, Juan Antonio (2006). Introducción a la implementación de controladores PID análogos. Armada República de Colombia, Escuela Naval de Cadetes Almirante Padilla, Cartagena, Colombia.
- Universidad Pontificia Bolivariana (2005). Práctica 5: Sensores de temperatura, ganancia y linealidad. Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad De Ingeniería Mecánica, Laboratorio de Ingeniería de control I.
- Google searcher, technical documents: Instrumentación Industrial (2003). Fundamentos del control automático industrial.
http://www.sapiensman.com/control_automatico/index.htm

ANEXO A.

ANALISIS Y RESULTADOS

4.1. PRACTICA Nº 1: CONTROL ON/OFF CON HISTERESIS

4.1.6. Procedimiento.

- Ajuste el valor de la resolución en 0.1. Seleccione el tipo de sensor que utilizará para la correcta medición de la temperatura; para ello debe establecer en la configuración del controlador si es del tipo *Termocupla* (J, K, t, R ó S) o *Sensor Resistivo de temperatura* (RTD).
- Fije el **Set point** en un valor intermedio de capacidad del proceso; luego seleccione la banda proporcional en valor nulo ($Pb=0$) y ajuste el valor mínimo de Histéresis ($Hys1$).
- Durante el proceso, tome datos de temperatura, tiempo y estado (ON/OFF) y consígnelos en la Tabla 1.

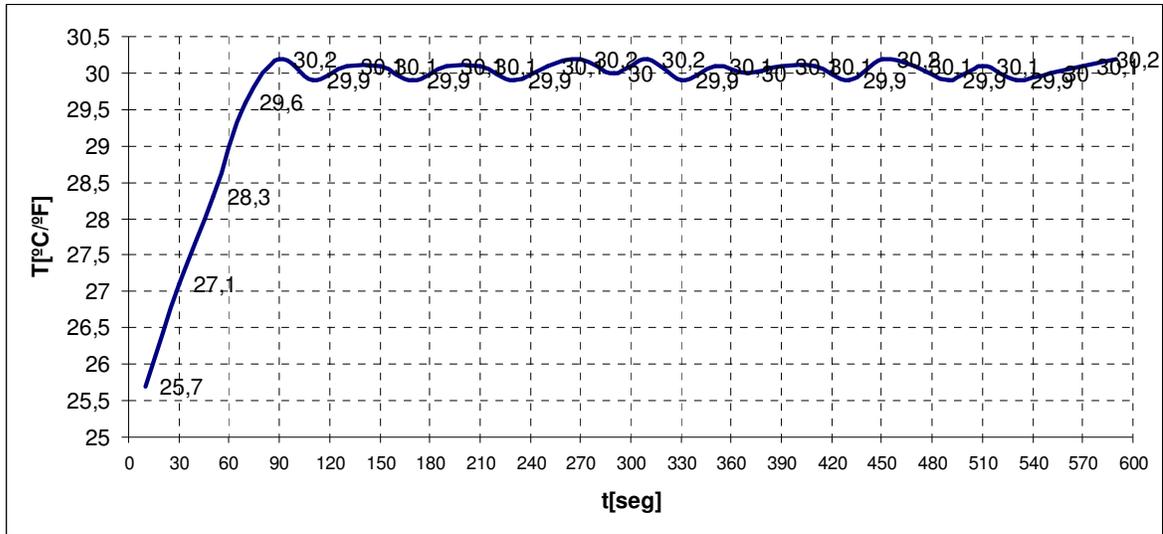
Tabla 1. Datos de Temperatura, Tiempo y Estado para Histéresis mínima.

T[°C/°F]	25.7	27.1	28.3	29.6	30.2	29.9	30.1	30.1	29.9	30.1	30.1	29.9	30.1	30.2	30
t [seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
Estado	ON	ON	ON	ON	OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF
T[°C/°F]	30.2	29.9	30.1	30	30.1	30.1	29.9	30.2	30.1	29.9	30.1	29.9	30	30.1	30.2
t [seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590
Estado	OFF	ON	OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF	OFF	ON

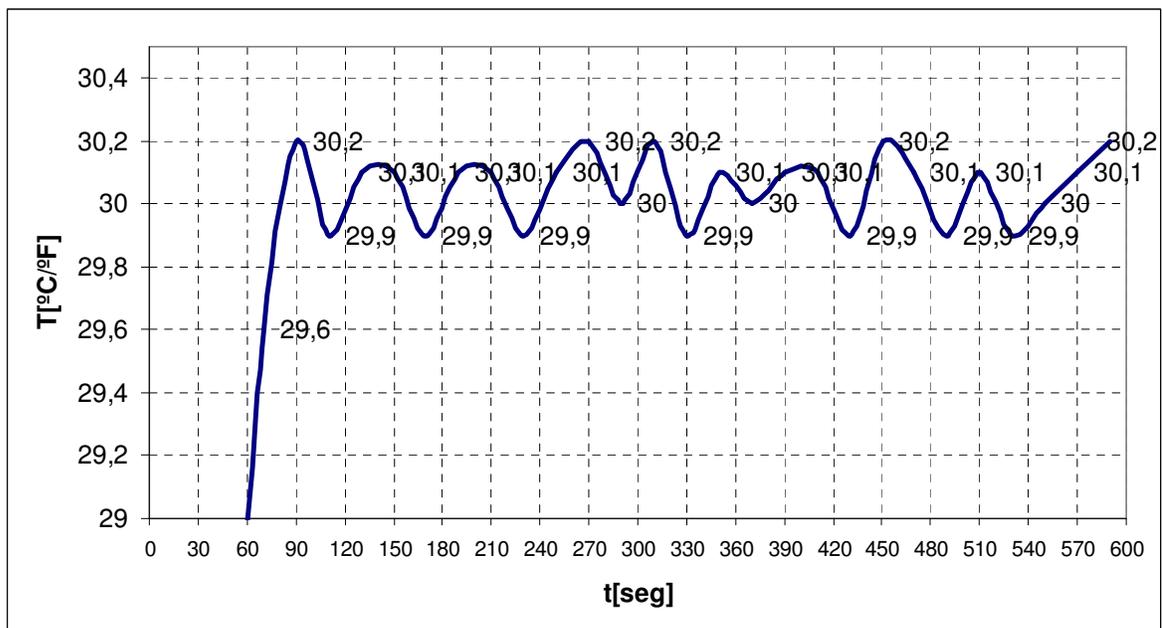
10. Realice las gráficas de seguimiento de Temperatura Vs. Tiempo y Estado (ON/OFF) Vs. Tiempo. Anote observaciones.

Gráfica 1. Control ON/OFF con Histéresis mínima.

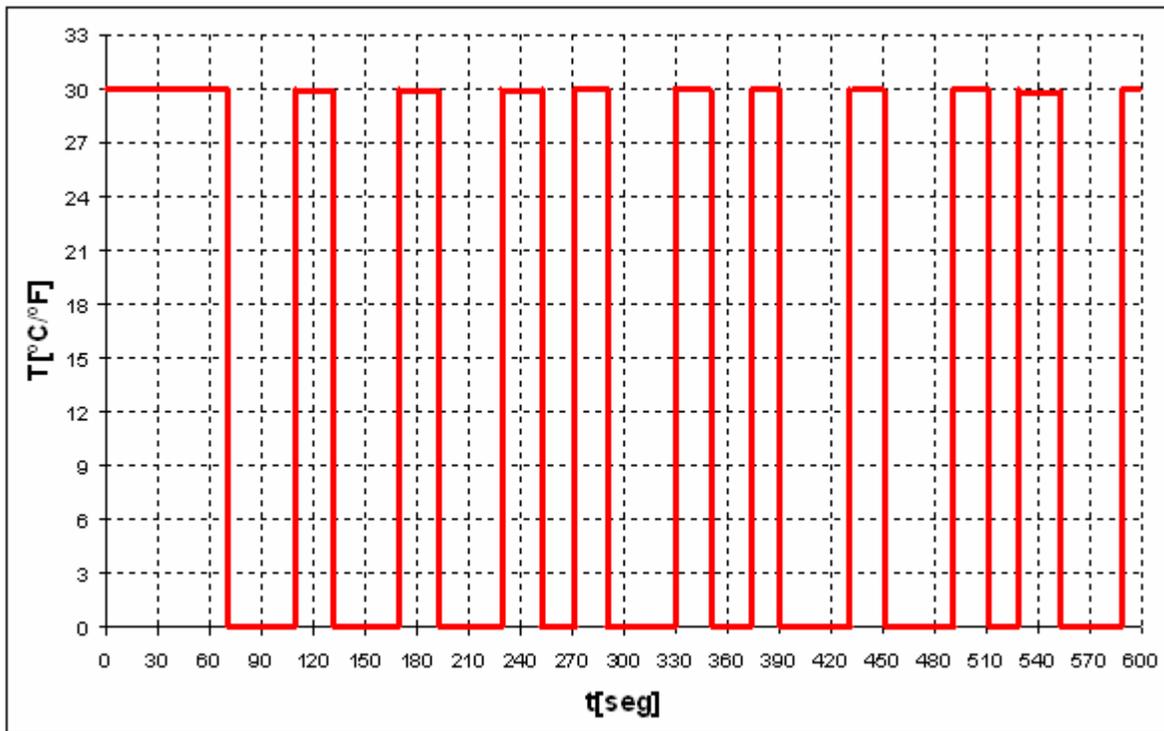
Temp Vs. Tiempo



Temp Vs. Tiempo (Escalado)



Estado Vs. Tiempo



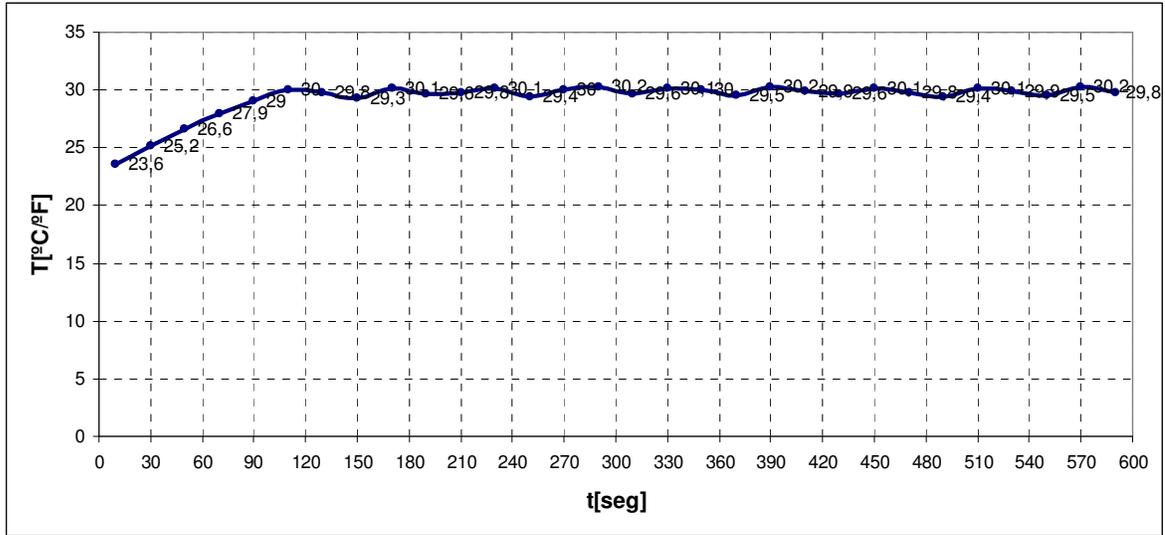
11. Aumente el valor de Histéresis $Hys1 = 0.5$, tome datos de temperatura, tiempo y estado (ON/OFF) y consígnelos en la Tabla 2. Realice las gráficas de seguimiento de Temperatura Vs. Tiempo y Estado (ON/OFF) Vs. Tiempo; deje que el proceso sea lo más estable posible, observe el comportamiento del sistema y anote sus conclusiones.

Tabla 2. Datos de Temperatura, Tiempo y estado para Histéresis = 0.5.

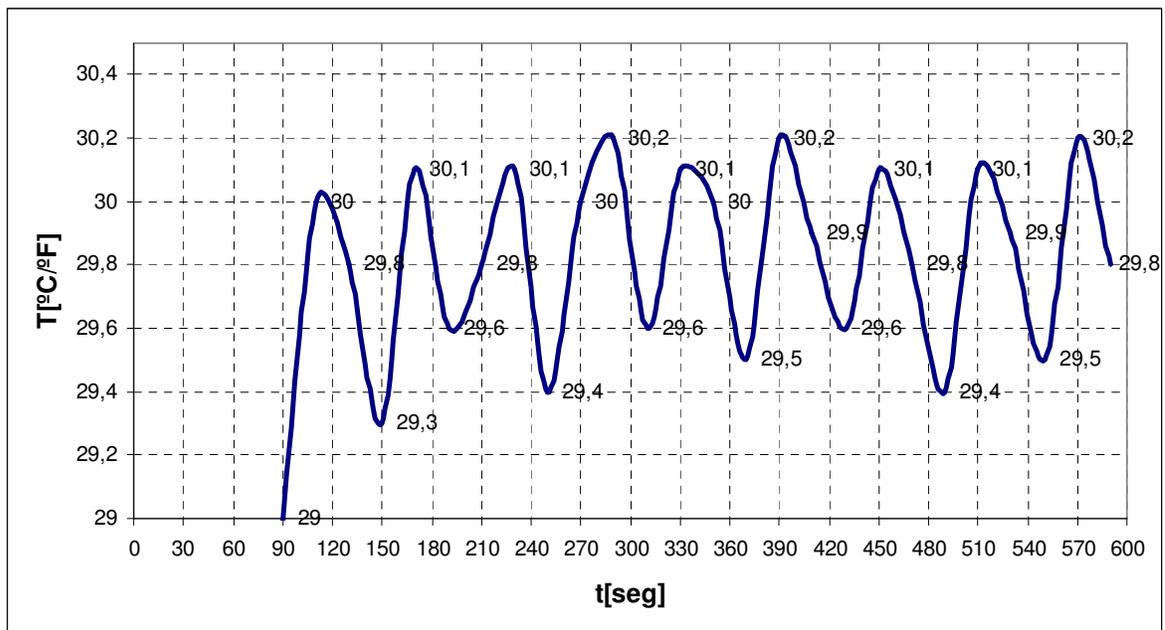
T[°C/°F]	23,6	25,2	26,6	27,9	29	30	29,8	29,3	30,1	29,6	29,8	30,1	29,4	30	30,2
t[seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
Estado	ON	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	ON	OFF
T[°C/°F]	29,6	30,1	30	29,5	30,2	29,9	29,6	30,1	29,8	29,4	30,1	29,9	29,5	30,2	29,8
t[seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590
Estado	ON	ON	OFF	ON	OFF	OFF									

Gráfica 2. Control ON/OFF con Histéresis = 0.5.

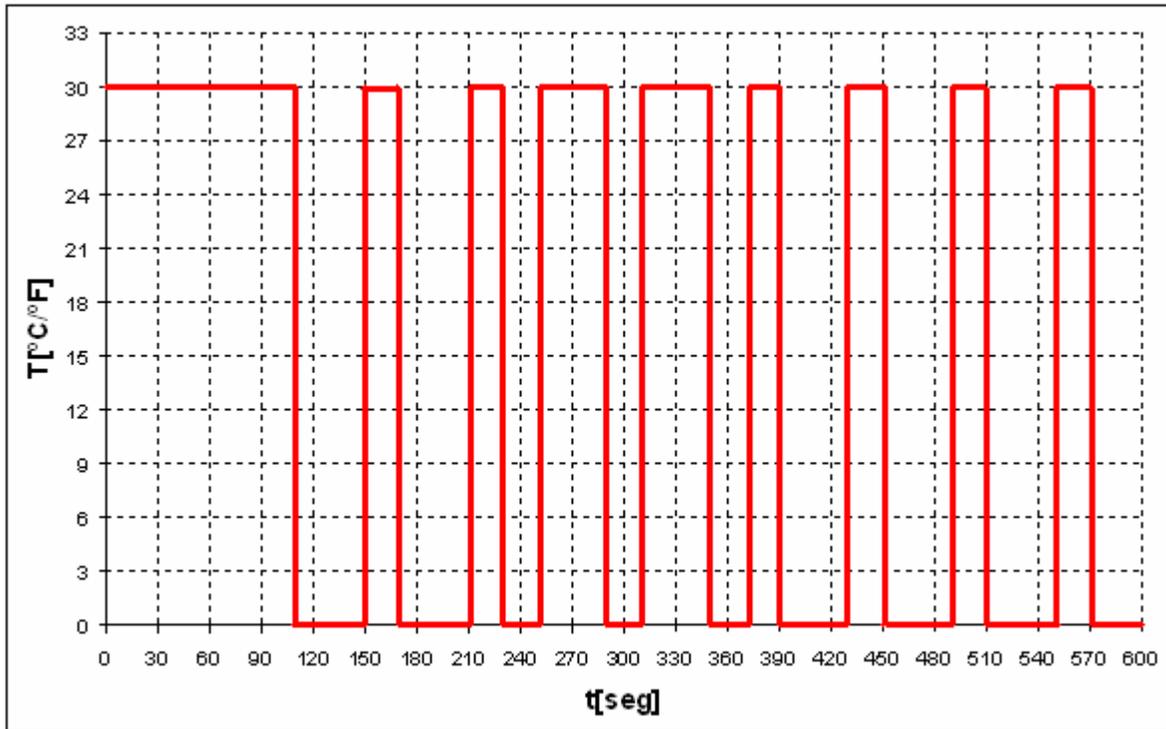
Temp Vs. Tiempo



Temp Vs. Tiempo (Escalado)



Estado Vs. Tiempo



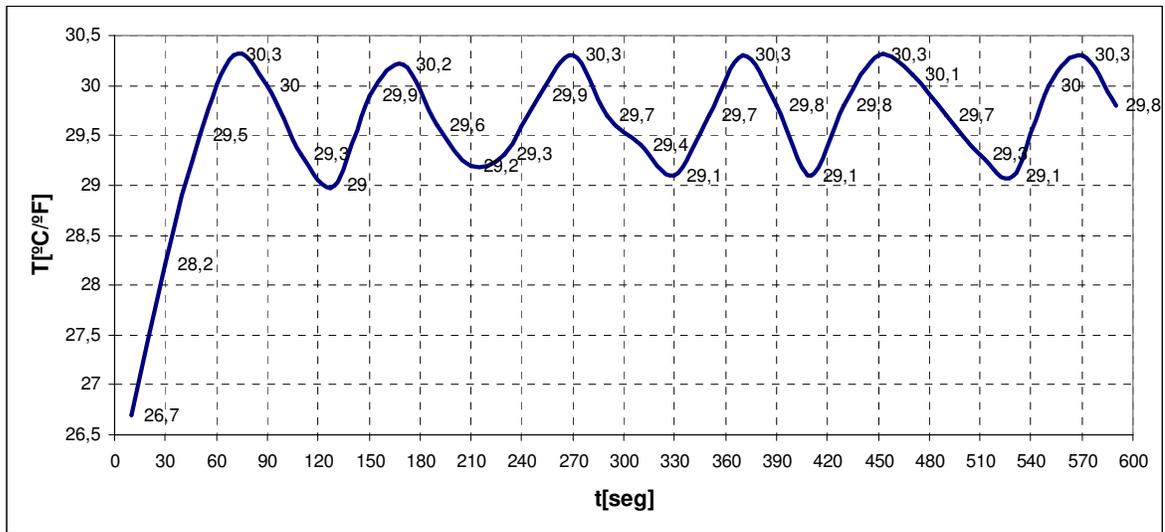
12. Realice el mismo procedimiento para Histéresis $Hys1 = 1$, tome datos de temperatura, tiempo y estado (ON/OFF) y consígnelos en la Tabla 3; realice las gráficas de seguimiento de Temperatura Vs. Tiempo y Estado (ON/OFF) Vs. Tiempo; observe el comportamiento del sistema y anote sus observaciones.

Tabla 3. Datos de Temperatura, Tiempo y estado para Hys1 = 1.

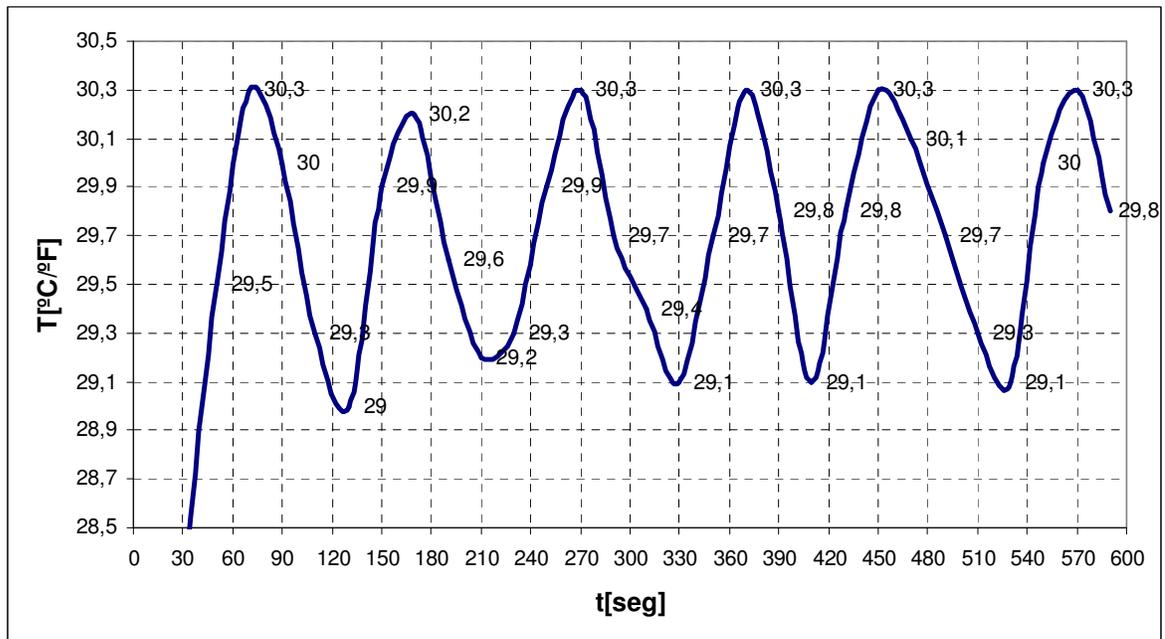
T[°C/°F]	26,7	28,2	29,5	30,3	30	29,3	29	29,9	30,2	29,6	29,2	29,3	29,9	30,3	29,7
t[seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
Estado	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
T[°C/°F]	29,4	29,1	29,7	30,3	29,8	29,1	29,8	30,3	30,1	29,7	29,3	29,1	30	30,3	29,8
t[seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590
Estado	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF

Gráfica 3. Control ON/OFF con Histéresis = 1.

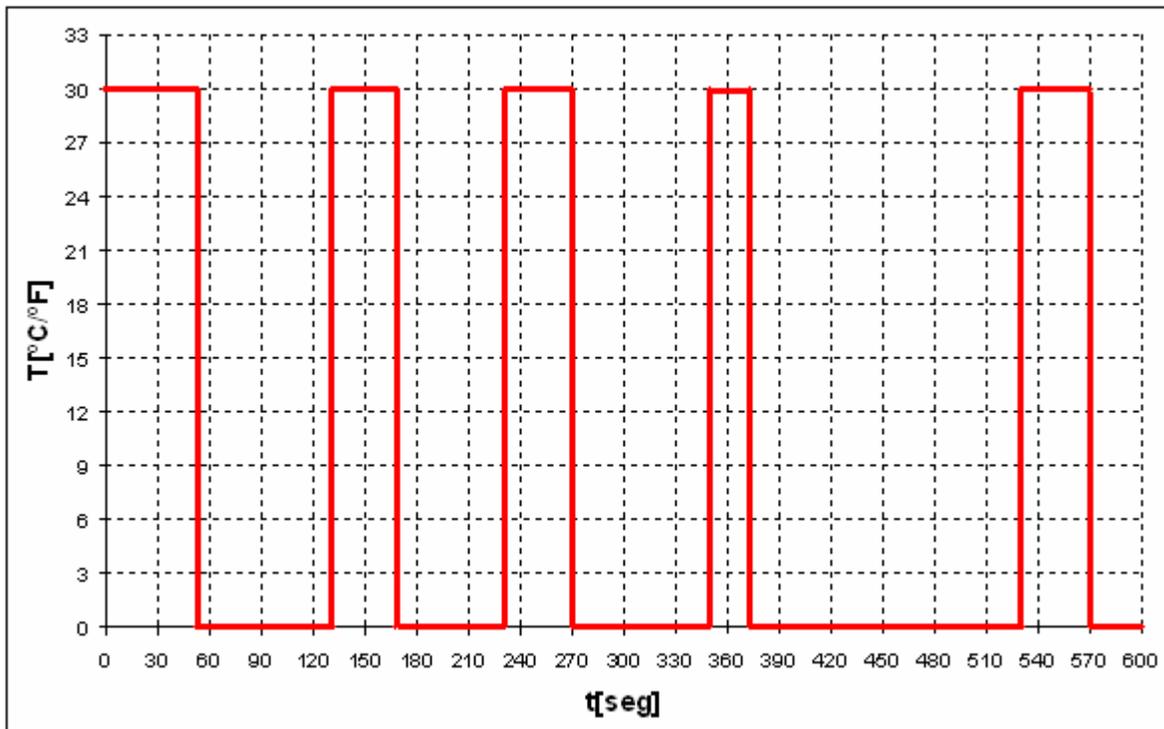
Temp Vs. Tiempo



Temp Vs. Tiempo (Escalado)



Estado Vs. Tiempo



4.1.6.2. Preguntas

- ¿Cómo se comporta el proceso con Histéresis de 0.1, 0.5 y 1?

El proceso se comporta como si fuese un control ON/OFF común y corriente, activándose y desactivándose cada vez que la medición sobrepase el *Set point*, pero manteniendo una estabilidad dentro de cada uno de sus rangos de Histéresis. A menor valor de Histéresis mejor respuesta entregará el proceso, conservando la estabilidad respecto al *Set point* asignado.

- ¿Qué efecto produce la Histéresis en el proceso?

El efecto que la Histéresis produce en el proceso, es mantener la temperatura dentro de los márgenes asignados según la Histéresis que encontremos adecuada para el proceso; otro efecto favorable que esta función produce, es reducir el uso del Contactor al activarse y desactivarse, alargando así su vida útil que.

- ¿Cuándo se comporta mejor el proceso, con más o menos histéresis?
Explique su respuesta

Para ver como se comporta mejor el proceso debemos tomar en cuenta que a mayor Histéresis existe una mayor inercia; por lo tanto, el proceso va a variar más que con menor Histéresis. Por otra parte, se debe tomar en cuenta la necesidad de la planta a controlar y los márgenes de temperatura que debemos respetar.

4.2. PRACTICA Nº 2: CONTROL PROPORCIONAL (P)

4.2.4. Procedimiento.

5. Fije el *Set point* en un valor intermedio de la capacidad del proceso; seleccione un valor de banda proporcional igual a 20, anule las bandas integral y derivativa, y observe el comportamiento del proceso.
6. Tome datos de Temperatura y Tiempo para la banda proporcional igual a 20 y consígnelos en la Tabla 4.
7. Seleccionando valores de banda proporcional $Pb=5$, $Pb=3$, y $Pb=0.5$, realice el mismo procedimiento de los numerales 1 y 2.

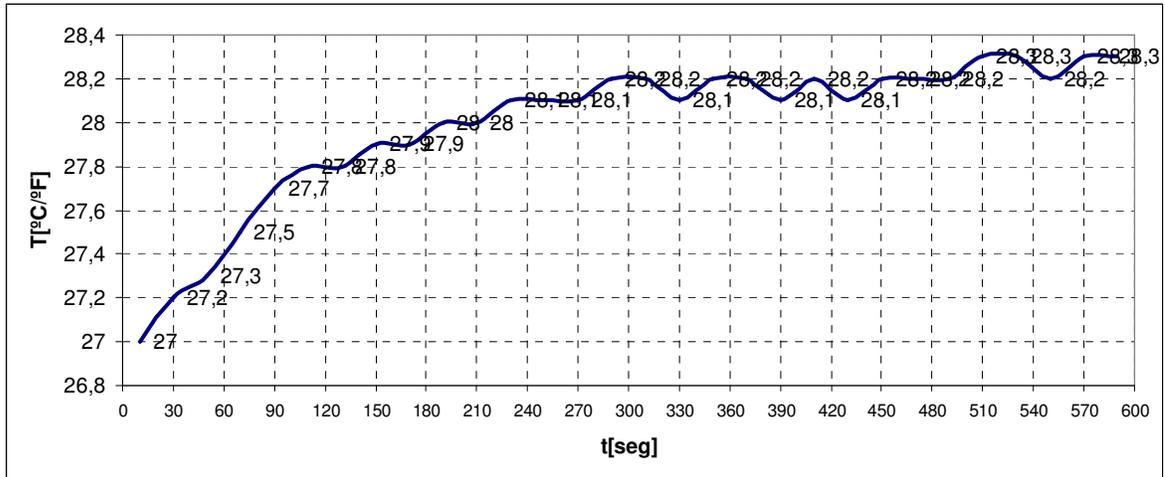
Tabla 4. Datos de Temperatura y Tiempo para Control proporcional.

PB=20	T[°C/°F]	27	27,2	27,3	27,5	27,7	27,8	27,8	27,9	27,9	28	28	28,1	28,1	28,1	28,2
	t [seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
	T[°C/°F]	28,2	28,1	28,2	28,2	28,1	28,2	28,1	28,2	28,2	28,2	28,3	28,3	28,2	28,3	28,3
	t [seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590
PB=5	T[°C/°F]	27,3	28,1	28,3	28,2	28,2	28,3	28,5	28,5	28,6	28,7	28,6	28,6	28,5	28,6	28,6
	t [seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
	T[°C/°F]	28,6	28,8	28,7	28,7	28,8	28,9	28,8	28,8	28,8	28,7	28,7	28,8	28,7	28,8	29
	t [seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590
PB=3	T[°C/°F]	27,9	28,9	29,3	29,2	29,1	29,1	29,1	29,2	29,2	29,1	29,2	29,2	29,2	29,2	29,2
	t [seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
	T[°C/°F]	29,4	29,3	29,3	29,3	29,3	29,4	29,4	29,3	29,4	29,3	29,4	29,3	29,4	29,4	29,4
	t [seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590
PB=0.5	T[°C/°F]	27,3	28,8	30,1	30,6	30,3	29,7	29,8	30,2	29,9	29,9	29,8	29,9	30	29,9	29,8
	t [seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
	T[°C/°F]	29,9	30,2	29,9	29,9	30	29,9	30	29,9	30	30,1	30	30	29,9	30	29,9
	t [seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590

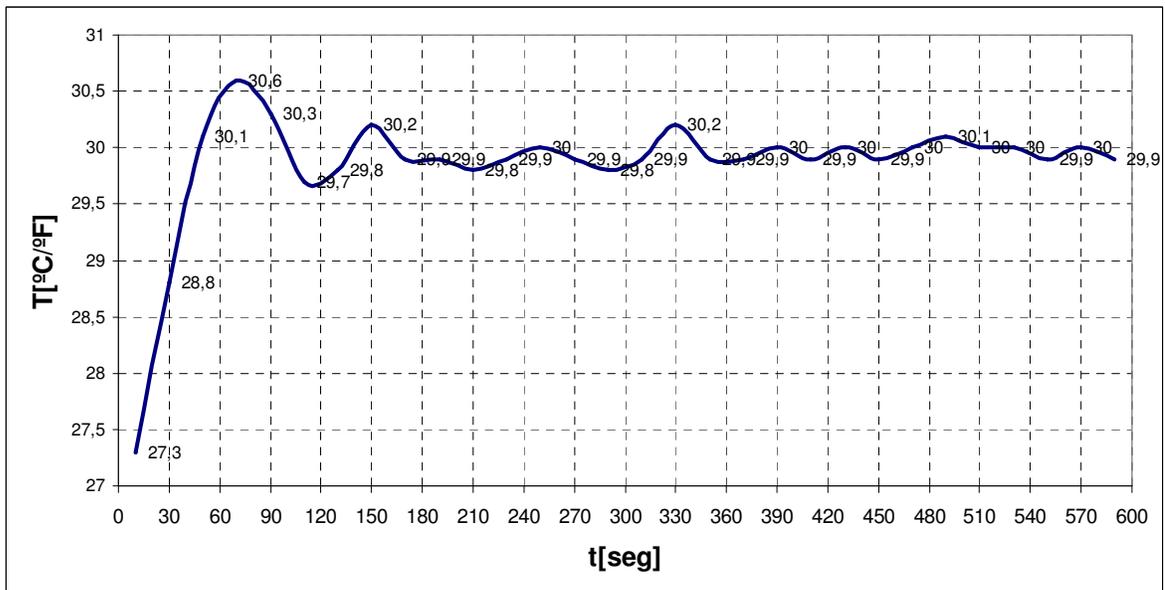
8. Seleccione los datos de Temperatura y Tiempo de dos bandas proporcionales diferentes (una ancha y otra estrecha), y dibuje sus respectivas gráficas.

Gráfica 4. Control Proporcional.

P_b (Ancha) = 20



P_b (Estrecha) = 0.5



4.2.4.2. Preguntas.

- ¿Cómo se comporta el controlador con una Pb ancha y luego con una estrecha?

Si PB es ancha el proceso es lento para llegar al *Set point* ya que la potencia en este caso del calefactor es baja, pero cuando la variable es controlada será muy poco el margen de error existente. Si PB es estrecha la respuesta del proceso es mas rápida para llegar al *Set point* ya que la potencia del calefactor es mucho mayor.

- ¿Cuál fue la Pb optima para el proceso?

Fue optimo el proceso con una $PB=0.5$ ya que la variable se pudo controlar, no con exactitud pero se disminuyo considerablemente el error con respecto a la banda mas estrecha.

- ¿Por qué el control proporcional no estabiliza el control de la línea de referencia?

El control proporcional no estabiliza el sistema de forma abrupta ya que es el encargado de entregar la potencia que varia en forma gradual entre 0 y 100%. A mayor error mayor potencia, y no se pudo estabilizar por efecto de inercia ya que el calefactor estará activado o desactivado.

4.3. PRACTICA Nº 3: CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL (PI)

4.3.4. Procedimiento.

6. Ajuste la banda proporcional en un valor diferente de cero (se recomienda un valor de banda estrecha), esto hará que el Controlador deje de funcionar bajo parámetros de control ON/OFF y se puedan manipular la banda integral y la banda derivativa.
7. Anule la banda derivativa (parámetro de configuración *der.t*) igualándola a cero para convertir al controlador en un sistema *PI*; luego, ajuste la banda integral a 20 seleccionando el parámetro *Int.t*; observe el comportamiento del proceso.
8. Tome datos de Temperatura y Tiempo y consígnelos en la tabla 5.

Tabla 5. Datos de Temperatura y Tiempo para banda integral igual a 20.

T[°C/°F]	26,9	28,1	29,4	30,7	31,4	30,9	30,2	29,7	29,4	29,7	30,1	30,3	30,1	29,9	29,8
t [seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
T[°C/°F]	29,9	30,1	30	30	29,9	29,9	30	30	29,8	30	30,1	30	29,9	30	30
t [seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590

9. Seleccione valores de banda integral *Int.t=10* e *Int.t=2*. Observe el comportamiento del proceso; luego, escoja cualquiera de estas bandas integrales, recomendable la más estrecha posible, tome sus datos de Temperatura y Tiempo y consígnelos en la tabla 6.

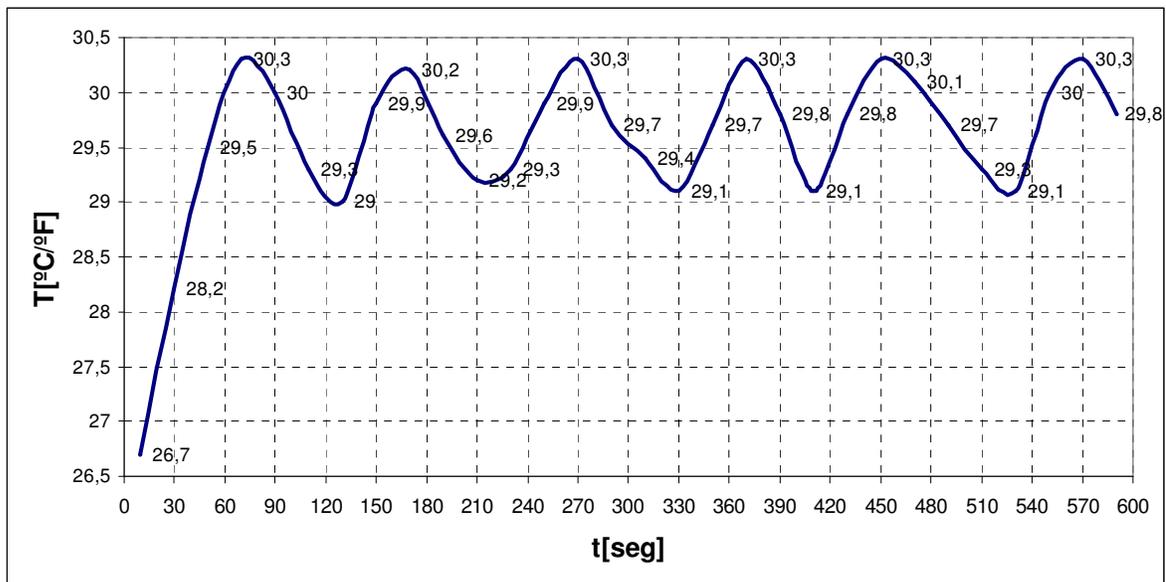
Tabla 6. Datos de Temperatura y Tiempo para banda integral igual a 2.

T[°C/°F]	27,1	28,3	29,8	31,1	31,1	30,6	30,2	29,9	29,7	30,6	31,3	31	30,5	30,1	29,9
t [seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
T[°C/°F]	30,2	30,3	30,2	30	29,8	30	30,1	29,9	30,1	30,2	29,8	30	30,1	30	30
t [seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590

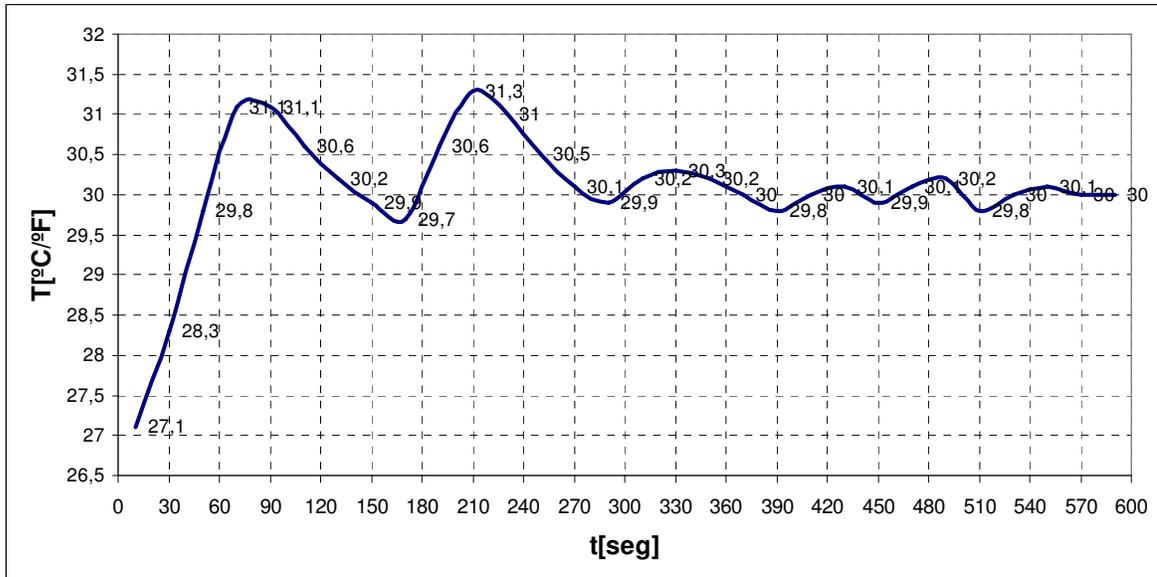
10. Dibuje las gráficas respectivas utilizando los datos de las tablas 5 y 6. Anote sus observaciones.

Gráfica 5. Control Proporcional Integral.

Int.t = 20



Int.t = 2



4.3.4.7. Preguntas.

- ¿Qué sucede al ir aumentando la banda integral?

A medida que aumenta la banda integral la respuesta del proceso tendrá mas fuerza en la salida por lo tanto, difícilmente alcanzará en un corto tiempo al *Set point*; luego, a mayor banda integral menor estabilización.

- ¿Qué diferencia existe entre una banda integral ancha y estrecha?

La banda integral ancha produce un disparo del sistema; esto impide que el sistema nunca llegue a estabilizarse por la alta potencia del calefactor. La banda integral estrecha optimiza el sistema y se vuelve un poco más rápido que utilizando solo la banda proporcional, ya que esta regula y aumenta la potencia del calefactor según la necesidad.

- ¿Cuál es la característica principal de la acción integral?

A mayor error la banda integral hace que la potencia del calefactor aumente; la disminución de la banda integral obligará al calefactor a disminuir su potencia para así estabilizar la salida.

4.4. PRACTICA N° 4: CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID).

4.4.4. Procedimiento.

6. Ajustando el valor de la referencia igual a 30, seleccione la banda proporcional $P_b=2$ y cambie los valores de la banda integral ($Int.t$) y la banda derivativa ($der.t$) a 0.
7. Disminuya poco a poco la banda proporcional hasta que el sistema oscile; tome datos de Temperatura y Tiempo del proceso en oscilación y anótelos en la tabla 7.

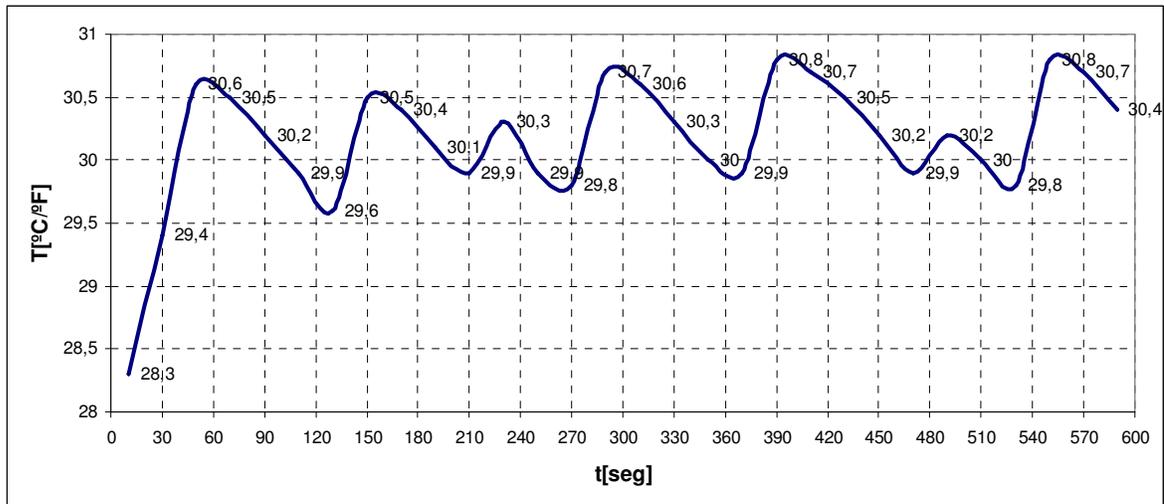
Tabla 7. Datos de Temperatura y Tiempo para el proceso en estado oscilatorio.

T[°C/°F]	28,3	29,4	30,6	30,5	30,2	29,9	29,6	30,5	30,4	30,1	29,9	30,3	29,9	29,8	30,7
t [seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
T[°C/°F]	30,6	30,3	30	29,9	30,8	30,7	30,5	30,2	29,9	30,2	30	29,8	30,8	30,7	30,4
t [seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590

8. A continuación, dibuje la gráfica del proceso utilizando los datos de la tabla 7. Mida el periodo de oscilación (T_μ) y la ganancia de la banda proporcional (K_μ), y anótelos.

Gráfica 6. Control PID: método de Ziegler-Nichols.

Temperatura Vs. Tiempo



$K_{\mu} = 0.8$ $T_{\mu} = 95 \text{ seg}$

9. Obtenga los parámetros del *PID* aplicando la regla de *Ziegler-Nichols* y anótelos en la tabla 8. Con estos datos, ajuste el controlador *PID*, fijando los valores de la banda proporcional K_p (*Pb*), la banda integral T_i (*Int.t*) y la banda derivativa T_d (*der.t*).

Tabla 8. Parámetros calculados para ajuste del controlador PID.

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID	$0.6K_{\mu}$	$T_{\mu} / 2$	$T_{\mu} / 8$
Calculado	0.48	47.5	11.87

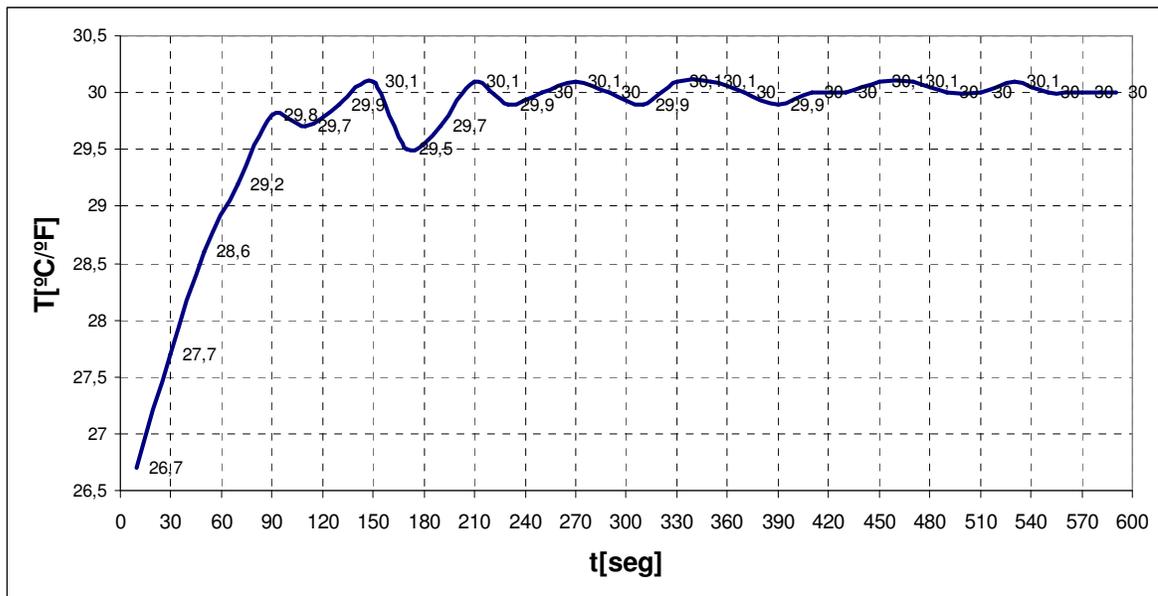
10. Tome datos de Temperatura y Tiempo del nuevo controlador y consígnelos en la tabla 9; dibuje la gráfica característica del proceso y anote sus observaciones.

Tabla 9. Datos de Temperatura y Tiempo del proceso con cambio de referencia.

T[°C/°F]	26,7	27,7	28,6	29,2	29,8	29,7	29,9	30,1	29,5	29,7	30,1	29,9	30	30,1	30
t [seg]	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
T[°C/°F]	29,9	30,1	30,1	30	29,9	30	30	30,1	30,1	30	30	30,1	30	30	30
t [seg]	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	530	550	570	590

Gráfica 7. Respuesta del Controlador PID ajustado con el método de Ziegler-

Temperatura Vs. Tiempo



Parámetros de ajuste: $P_b = 0.4$, $Int.t = 47$ seg, $der.t = 12$ seg

4.4.4.2. Preguntas.

- ¿Qué ventajas o desventajas provee el control con respuesta oscilatoria?

En la experiencia, se logra controlar la oscilación del proceso con un comportamiento estable pero con amortiguamiento crítico.

- ¿Por qué es importante el ajuste de las bandas integral y derivativa?

Porque mediante su ajuste se consigue una buena velocidad de respuesta y el error disminuye con respecto al tiempo, estabilizando mucho más rápido la señal de salida.

- Si el proceso es estable, ¿qué sucede cuando se varía el Set point?

Variando el set point del sistema, aun cuando se ha ajustado el PID, existe una tendencia a estabilizarse bajo dichos parámetros, pero con un margen de error variable.