

UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA**



**“SISTEMA DE CONTROL PROPORCIONAL INTEGRADOR Y
DERIVATIVO, COMO ALTERNATIVA PARA MEJORAR LA PRECISIÓN
DE TEMPERATURA, APLICADO AL PROCESO DE ELABORACION DE
PINTURAS, PARA LA EMPRESA MARA SA.”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR EL BACHILLER

BARRIENTOS HUAMANÍ, ARTURO EDERICK

Villa El Salvador
2017

DEDICATORIA:

Dedico mi Trabajo de Suficiencia Profesional a mis padres, mis hermanos y toda mi familia por su apoyo incondicional, para culminar con éxito mis estudios profesionales.

AGRADECIMIENTO:

A Dios, a mis padres y mis maestros de la UNTELS por sus sabios consejos y orientación para obtener mi título profesional.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
1.1. Descripción de la Realidad Problemática.....	9
1.2. Justificación del Proyecto.....	10
1.3. Delimitación del Proyecto.....	10
1.3.1. Teórica.....	10
1.3.2. Espacial.....	11
1.3.3. Temporal.....	11
1.4. Formulación del Problema.....	11
1.4.1 Problema General.....	11
1.4.2 Problemas Específicos.....	11
1.5. Objetivos.....	12
1.5.1 Objetivo General.....	12
1.5.2 Objetivos Específicos.....	12
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	
2.1 Antecedentes Bibliográficos.....	13
2.2 Bases Teóricas.....	18
2.3 Marco Conceptual.....	59
CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN Y DISEÑO DEL PROYECTO	
3.1 Descripción del Sistema Automatizado.....	62
3.2 Desarrollo del Automatismo.....	66
3.3 Revisión y consolidación de resultados.....	72
CONCLUSIONES	76
RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	78
ANEXOS	83

LISTADO DE FIGURAS

- Figura N° 01: Sistema de control de procesos.
- Figura N° 02: Esquema de un sistema de control de lazo cerrado.
- Figura N° 03: Sistema de control de lazo abierto.
- Figura N° 04: Sistema de control de lazo cerrado.
- Figura N° 05: Sistema de control de lazo cerrado con PID.
- Figura N° 06: Graficas del efecto de la acción de control proporcional.
- Figura N° 07: Graficas del efecto de la acción de control derivativa.
- Figura N° 08: Graficas del efecto de la acción de control integral.
- Figura N° 09: Diagrama de bloques.
- Figura N° 10: Sistema de control de lazo cerrado
- Figura N° 11: Esquema de la etapa de equilibrio de concentración.
- Figura N° 12: Esquema de accionamiento de los actuadores y del controlador.
- Figura N° 13: Controlador de Temperatura Digital serie TE4-RB10W TOKY.
- Figura N° 14: Diagrama del controlador de temperatura TE4-RB10W TOKY
- Figura N° 15: Descripción de nomenclatura del controlador de temperatura TE4-RB10W TOKY.
- Figura N° 16: Relé en estado sólido FOTEK SSR-40DA.
- Figura N° 17: Diagrama de conexión del relé en estado sólido *FOTEK SSR-40DA*.
- Figura N° 18: Esquema del sistema de control de temperatura PID.
- Figura N° 19: Curva del comportamiento de la variable controlada.
- Figura N° 20: Curva de comportamiento de la variable controlada.

LISTADO DE TABLAS

Tabla N° 01: Datos obtenidos utilizando el controlador PID

Tabla N° 02: Datos obtenidos sin utilizar el controlador PID

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de control surgen como la necesidad del hombre de liberarse del control manual y de los grandes errores que se presentan en todo tipo de proceso, la necesidad del aprovechamiento al máximo de los procesos recae en la automatización de estos, al tener involucrada una variable, tales como temperatura, presión, caudal, etc, que al tener que mantenerlas dentro de rangos pre establecidos, se busca utilizar mecanismos de autorregulación a fin de garantizar la estabilidad del proceso industrial.

El controlador PID, llamado también controlador proporcional, integrador y derivativo ayuda a que el proceso compense automáticamente los cambios experimentados por la variable controlada. Los términos proporcional, integrador y derivativa se deben ajustar o afinar individualmente al sistema en particular usando métodos de prueba y error.

En ese sentido y con la finalidad de mejorar la precisión de temperatura en el proceso de elaboración de pintura, mediante un sistema de control proporcional integrador y derivativo en la Empresa Mara S.A, es que a continuación presento mi trabajo de suficiencia profesional, el cual está dividido en 3 capítulos.

En el Capítulo I, se describe el planteamiento del problema, que está relacionado a la falta de precisión de la temperatura debido al sistema casi manual que actualmente se utiliza, generando un proceso de mezcla de baja calidad.

En el Capítulo II, se describe el marco teórico en la cual se sustenta la propuesta de solución, relacionado a las características del controlador proporcional - integrador - derivativo y su utilización en procesos de control de temperatura.

En el Capítulo III, se describe el sistema de control proporcional, integrador y derivativo, resaltando sus componentes y características de los mismo, para luego desarrollar el sistema de control, especificando el modo de integración del sensor y actuador. Finalmente se realiza la revisión e interpretación de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

La empresa Mara S.A. es una empresa peruana dedicada a la fabricación y comercialización de revestimiento de protección industrial para diversos sectores productivos del país.

Actualmente en su proceso de equilibrio de concentración, se mezcla la pintura y el solvente en un tanque de agitación, con características de un sistema casi manual, cuyo monitoreo de temperatura se realiza a través de un termómetro, sin posibilidad de regular la temperatura en caso de que este se encuentre fuera del valor de consigna.

Este procedimiento muy ajeno a un sistema de control, en muchas ocasiones ha generado que la mezcla no presente condiciones de calidad

requerido, entiéndase por esto, que la mezcla no alcanza valores de concentración ni de ph requeridos (constante de acidez).

Estas condiciones conllevan muchas veces a desconformidad por el cliente, derivándose en pérdidas materiales, ya que el insumo utilizado ya no se puede volver a usar, reflejando en pérdidas económicas para la empresa.

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto se justifica en que a partir del sistema de control proporcional, integrador y derivativo, el tiempo de respuesta de la variable controlada (temperatura) será relativamente corto ante la presencia de cualquier tipo de perturbación, mejorando la precisión de la temperatura en el proceso de fabricación de pintura, lo cual conllevará a mejorar la calidad del producto final, reduciendo el riesgo de pérdidas materiales y económicas debido a la insatisfacción del cliente.

1.3 DELIMITACIÓN DEL PROYECTO

1.3.1 TEÓRICA

El trabajo de suficiencia profesional desde el punto de vista teórico abarca estrictamente al sistema de control de temperatura a través del control proporcional, integrador y derivativo, resaltando la integración con los sensores y actuadores del proceso. No forma parte del estudio las características de dimensionamiento de válvulas, ductos, ni caudal o presión de los fluidos.

1.3.2 ESPACIAL

El sistema de control proporcional, integrador y derivativo se desarrolla en la Empresa Mara S.A. ubicado en el parque José Abelardo Quiñones, Mz. D Lote 10 Urb. Parcelación Semi Rústica Las Praderas de Lurín – Lima – Perú.

1.3.3 TEMPORAL

El proyecto de ingeniería comprende del 02 de Mayo al 26 de Mayo de 2017.

1.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.4.1 PROBLEMA GENERAL

¿Mejorar la precisión de temperatura en el proceso de elaboración de pintura, mediante el sistema de control proporcional integrador y derivativo en la Empresa Mara S.A?

1.4.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿Cuáles son los elementos que permiten detectar la variación de temperatura y modificarla, con la finalidad de alcanzar la precisión de la misma en el proceso de elaboración de pintura en la empresa Mara S.A.?
- ¿Cuál es el tiempo de respuesta, para alcanzar la precisión de temperatura, en el proceso de elaboración de pintura, haciendo uso del sistema de control proporcional, integrador y derivativo, en la Empresa Mara S.A?

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

- Mejorar la precisión de temperatura en el proceso de elaboración de pintura, mediante un sistema de control proporcional integrador y derivativo, en la Empresa Mara S.A.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los elementos que permiten detectar la variación de temperatura y modificarla, con la finalidad de alcanzar la precisión de la misma, en el proceso de elaboración de pintura en la empresa Mara S.A.
- Determinar el tiempo de respuesta, para alcanzar la precisión de temperatura, en el proceso de elaboración de pintura, haciendo uso del sistema de control proporcional, integrador y derivativo, en la Empresa Mara S.A.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES BIBLIOGRAFICOS

Jiménez (2012), en su tesis denominada “Control de temperatura de un horno eléctrico mediante lógica difusa” para optar el grado en Ingeniero en Mecatrónica en la Universidad tecnológica de la mixteca, concluye que:

“Por la complejidad del sistema, los factores externos que son difíciles de modelar y el tiempo que se hubiera invertido en tratar de realizar el modelo de todo el sistema, parece haber sido lo más adecuado para resolver el problema utilizando un controlador difuso directo sin optimización tipo proporcional derivativo.”¹

¹ Jiménez Escamilla Isaac Salomón, Tesis: “Control de temperatura de un horno eléctrico mediante lógica difusa”, Universidad tecnológica de la mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, 2012

Se opta por la acción de control derivativa como solución para la estabilización de la variable controlada, reducción de las sobreoscilaciones e inestabilidad del sistema.

Benítez (1994), en su tesis denominada “Diseño y construcción de un sistema de control de nivel de líquido” para optar el grado en Ingeniero en electrónica y control en la escuela politécnica nacional de México, concluye que:

“El control de un sistema de primer orden entrega resultados totalmente satisfactorios, es rápido, tiene un error admisible y responde muy bien a perturbaciones. En el caso del control para un sistema de segundo orden, el control es bueno, pero existe un error debido a que no se mide el nivel en el segundo tanque. En el caso de un sistema de tercer orden, se llega a controlar el sistema pero en este caso el control es pobre, pues no se puede manejar el caudal de las válvulas de control de flujo para mejorar el control; por estas razones, es preferible para su uso como prototipo de laboratorio, realizar el control sobre un solo tanque, es decir como un sistema de primer orden. Para fines didácticos se puede utilizar el control sobre dos tanques. En cuanto al sensor utilizado, éste es bastante bueno y su acondicionamiento de señal fácil de calibrar. Existe un problema con la repetitividad de los experimentos debido a las variaciones en la lectura del sensor, pero esto es debido a agentes externos como son la posición del tubo de vidrio introducido en el tanque de sensado y el acople con la manguera de plástico que comunica la señal de presión hacia el sensor, y

esto es debido a la manipulación que tienen estas partes tanto para montar como para desmontar el equipo.”²

Se entiende que el controlador PID es más eficiente cuando el sistema de control es de primer orden, y su ecuación diferencial presenta propiedades de un sistema de control lineal. En estas condiciones la función de transferencia del sistema de control será más fácil de interpretar ya que será la relación entre la transformada de Laplace de la señal de salida sobre la transformada de Laplace de la señal de entrada.

Ávila; Carbajal y Mares (2011), en su tesis denominada “Control de velocidad y dirección de un robot de carreras autónomo” para optar el grado en Ingeniero en comunicaciones y electrónica, en el instituto politécnico nacional de México, concluye que:

“El control proporcional integral derivativo es más robusto que el control proporcional derivativo, o el proporcional integral. Debido a que el control proporcional solo puede corregir el error actual, produce un sobrepaso importante y el tiempo en el cual regula de forma aceptable es mayor. El control proporcional integral es capaz de considerar la suma de errores pasados y reducir el tiempo que el sistema toma para llegar al set point. Sin embargo, no puede predecir errores, causando un sobrepaso considerable. Una característica destacable del control proporcional derivativo es precisamente, su eficacia para predecir el error. La suma de los tres tipos

² Benítez Mejía Diego Santiago, Tesis: Diseño y construcción de un sistema de control de nivel de líquido, escuela politécnica nacional de México, 1994.

de control consideran todo el historial de error: pasado, presente y futuro. Corrigiendo de forma más eficiente la variable de control.

Por otra parte es importante sintonizar de forma correcta el sistema de control. Es posible que los conceptos que involucra estén aplicados correctamente, sin embargo, el valor de las constantes proporcional, integral y derivativa pueden hacer que el controlador no regule de manera aceptable, de tal forma que si las constantes antes mencionadas tienen un valor mayor o cercano a la unidad, la acción de control es más brusca y puede causar conflictos en la regulación, causando sobrepasos. En cambio, si el valor de las constantes es cercano a cero, la acción de control puede ser demasiado lenta, y seguramente el regulador no será confiable, pues el tiempo que tomara para regular la variable de control será mayor.”³

Se denota la consecución del uso de cada acción de control para las acciones de control restantes y cómo afecta el uso desmedido de la sintonización de un determinado parámetro, sea proporcional, integral o derivativo.

Parra (2007), en su tesis denominada “Diseño e implementación de controladores PID industriales” para optar el grado en Maestro en ciencias, en la Universidad nacional de ingeniería, Perú, concluye que:

“La técnica del control adaptativo, por diseño propio, es más robusta que la técnica PID. En principio, el controlador PID es de carácter lineal y no

³ Ávila Herrera Fernando; Carbajal Bernal Jorge Isaac; Mares Olivares Josué, Tesis: Control de velocidad y dirección de un robot de carreras autónomo, instituto politécnico nacional de México, 2011.

requiere del modelo del proceso en su diseño ya que procesa el error de medición, y trabaja muy bien para rangos pequeños de variación de la variable controlada. Si los parámetros del proceso varían notoriamente, entonces un controlador PID requiere ser sintonizado para operar satisfactoriamente en esta nueva situación. El controlador adaptativo desarrollado, luego de la sintonización inicial de sus parámetros, no requiere un ajuste posterior, debido a que emplea una ley de adaptación de parámetros que permite que el proceso adapte sus parámetros a nuevos escenarios de operación.”⁴

Cada acción de control tendrá repercusiones en las demás acciones de control y ello se podrá visualizar en la curva de la variable controlada. La acción proporcional disminuirá el error permanente pero no en su totalidad, pero su uso desmedido hace que el sistema sea inestable, para ello se suma la acción derivativa.

⁴ Parra Quispe Aníbal Arturo, Tesis: Diseño e implementación de controladores PID industriales, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú, 2007.

2.2. BASES TEORICAS

2.2.1 CONTROL DE PROCESOS

“El objeto de todo proceso industrial es la obtención de un producto final, de unas características determinadas de forma que cumpla con las especificaciones y niveles de calidad exigidos.

La misión del sistema de control de proceso es corregir las desviaciones surgidas en las variables de proceso respecto de unos valores determinados, que se consideran óptimos para conseguir las propiedades requeridas en el producto producido.”⁵

“El control de procesos consiste en dos funciones claramente diferenciadas: la adquisición de datos y el control. Si tratamos de establecer el nexo con el mantenimiento concluiremos rápidamente que la adquisición de datos contribuye con la información para el mantenimiento y las acciones de control con la implantación de las acciones con fines tanto operativos como de mantenimiento.”⁶

⁵ Procesos Bio, control de procesos industriales, recuperado de <https://procesosbio.wikispaces.com/Control+de+procesos+industriales>

⁶ Arbildo López Aurelio, El control de procesos industriales y su influencia en el mantenimiento, recuperado de [http://fresno.ulima.edu.pe/sf/sf_bdfde.nsf/OtrosWeb/Ing29Control/\\$file/02-ingenieria-produccion-ARBILDO.pdf](http://fresno.ulima.edu.pe/sf/sf_bdfde.nsf/OtrosWeb/Ing29Control/$file/02-ingenieria-produccion-ARBILDO.pdf)

“El control de procesos toma en cuenta la medición y el análisis de las variables que determinan el funcionamiento de un proceso así como la toma de decisiones y la ejecución de acciones de control para gobernar dicho proceso. Aun cuando el control del proceso se realice con fines netamente operativos, siempre es posible capturar y almacenar información, que puede ser eficientemente procesada con fines de mantenimiento, como es el caso del mantenimiento predictivo. Asimismo, se acostumbra instrumentar máquinas y equipos de proceso para adquirir datos exclusivos para estos fines. Como una opción más, se pueden automatizar las tareas de mantenimiento”⁷

“El control del proceso consistirá en la recepción de unas entradas, variables del proceso, su procesamiento y comparación con unos valores predeterminados por el usuario, y posterior corrección en caso de que se haya producido alguna desviación respecto al valor preestablecido de algún parámetro de proceso.

El bucle de control típico estará formado por los siguientes elementos, a los que habrá que añadir el propio proceso.

- **Elementos de medida:** (Sensores) Generan una señal indicativa de las condiciones de proceso

⁷ Arbildo López Aurelio, El control de procesos industriales y su influencia en el mantenimiento, recuperado de [http://fresno.ulima.edu.pe/sf/sf_bdfde.nsf/OtrosWeb/Ing29Control/\\$file/02-ingenieria-produccion-ARBILDO.pdf](http://fresno.ulima.edu.pe/sf/sf_bdfde.nsf/OtrosWeb/Ing29Control/$file/02-ingenieria-produccion-ARBILDO.pdf)

- **Elementos de control lógico:** (Controladores): Leen la señal de medida, comparan la variable medida con la deseada (punto de consigna) para determinar el error, y estabilizan el sistema realizando el ajuste necesario para reducir o eliminar el error.
- **Elementos de actuación:** (Válvulas y otros elementos finales de control): Reciben la señal del controlador y actúan sobre el elemento final de control, de acuerdo a la señal recibida.

Esta serie de operaciones de medida, comparación, calculo y corrección, constituyen un ciclo cerrado. El conjunto de elementos que hacen posible este control reciben el nombre de bucle de control (control loop).”⁸

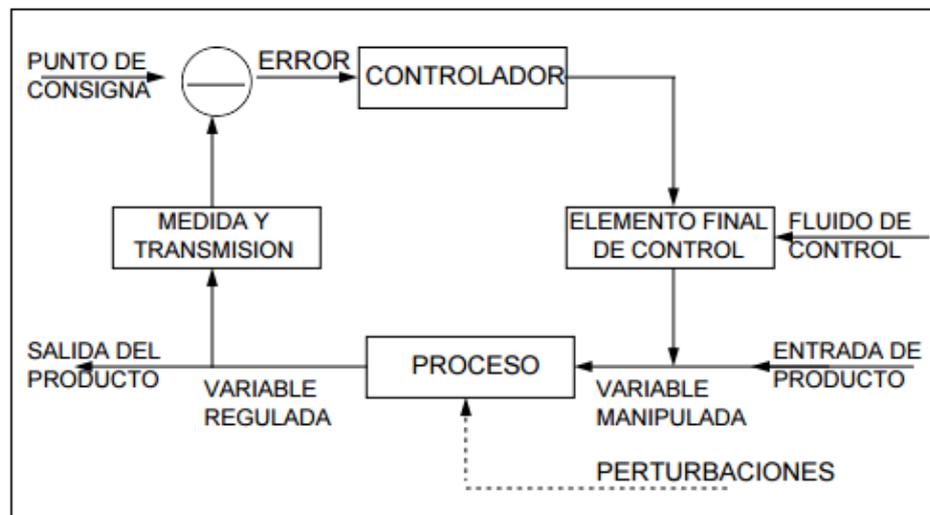


Figura N°01 Sistema de control de procesos
 Fuente: https://pastranamoreno.files.wordpress.com/2011/03/control_procesos-valvulas.pdf

⁸ MAVAINSA, control de procesos, Recuperado de https://pastranamoreno.files.wordpress.com/2011/03/control_procesos-valvulas.pdf

“En todo caso, independientemente del tipo de control utilizado, los objetivos del control de procesos pueden resumirse en: a) Operar el proceso en forma segura y estable.

b) Diseñar sistemas de control que el operador pueda vigilar, comprender y, cuando sea necesario, manipular en forma selectiva.

c) Evitar desviaciones importantes respecto a las especificaciones de productos durante las perturbaciones.

d) Permitir que el operador cambie un valor deseado o punto de consigna (valor de referencia) sin perturbar indebidamente otras variables controladas.

e) Evitar cambios considerables y rápidos en variables manipuladas que podrían incumplir restricciones de operación, o perturbar unidades integradas o situadas en escalafones inferiores.

f) Operar el proceso en forma congruente con los objetivos de calidad de cada producto. Así, las desviaciones en la calidad podrían ser menos permisivas (mucho más costosas) en un producto que en otro.

g) Controlar las cualidades del producto en valores que maximicen su utilidad cuando se consideren índices y valores de productos y además, minimicen el consumo de energía.”⁹

2.2.2 DIAGRAMA DE BLOQUES

“Un diagrama de bloques representa la estructura de un sistema. Esto es, las partes que lo forman y el modo en que se relacionan entre sí. No representa la forma ni el aspecto físico ni su funcionamiento. Hace hincapié en la función que cumplen los elementos. Un diagrama de bloques debe incluir a cada una de las partes del sistema. Cada parte puede ser en realidad un conjunto de partes que agrupamos porque consideramos que juntas cumplen una función.”¹⁰

2.2.3 SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO

“Dentro de los sistemas se encuentra el concepto de sistema de control. Un sistema de control es un tipo de sistema que se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema. La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados (consigna).”¹¹

⁹ Tema 4: control de procesos industriales, Control distribuido, recuperado de : https://www.academia.edu/11748103/TEMA_4_CONTROL_DE_PROCESOS_INDUSTRIALES._CONTROL_DISTRIBUIDO._4.1.-INTRODUCCI%C3%93N_AL_CONTROL_DE_PROCESOS

¹⁰ ORT Escuela Técnica, Área de educación tecnológica, recuperado de file:///C:/Users/ /Downloads/434345501.Diagramas%20de%20bloques.pdf

“Los procesos industriales pueden ser de distinta naturaleza, pero en general tienen como aspecto común, que se requiere del control de algunas magnitudes, como son: la temperatura, la presión, el flujo, etc. El sistema de control para estas magnitudes se puede definir como: Un sistema que compara el valor de una variable a controlar con un valor deseado y cuando existe una desviación, efectúa una acción de corrección sin que exista intervención humana”¹²

“El objetivo de un sistema de control es el de gobernar la respuesta de una planta, sin que el operador intervenga directamente sobre sus elementos de salida. Dicho operador manipula únicamente las magnitudes denominadas de consigna y el sistema de control se encarga de gobernar dicha salida a través de sus accionamientos. El concepto lleva de alguna forma implícito que el sistema de control opera, en general, con magnitudes de baja potencia, llamadas genéricamente señales, y gobierna unos accionamientos que son los que realmente modulan la potencia entregada a la planta.”¹³

¹¹ Capítulo 2: Sistemas de control, Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf?sequence=5>

¹² G. Enríquez, 2000. El abc de la instrumentación en el control de procesos industriales. Editorial Limusa, Pág. 11.

¹³ Josep Balcells y José Luis Romeral. Libro “Autómatas Programables”. Editorial MARCOMBO, España, 1997, pág. 12.

“Según la definición anterior, el conjunto de sistemas de control y accionamientos se limitaría a ser un convertidor amplificador de potencia que ejecuta las órdenes dadas a través de las magnitudes de consigna. Este tipo de sistemas de control se denomina *en lazo abierto*, por el hecho que no recibe ningún tipo de información del comportamiento de la planta.”¹⁴

A partir de aquí se recomienda diferenciar el concepto de señales con el de variables para el mejor entendimiento de un sistema de control, ya que puede entenderse como un mismo concepto en realidad no lo es así. Entendamos el concepto de señal como una magnitud de baja potencia la cual gobierna a un circuito de mando que accionara a un actuador, y entiéndase como variable a una magnitud física de mayor potencia que interactúa directamente sobre la planta.

“Lo habitual sin embargo es que el sistema de control se encargue de la toma de ciertas decisiones ante determinados comportamientos de la planta, hablándose entonces de sistemas automáticos de control. Para ello se requiere la existencia de unos sensores que detectan el comportamiento de dicha planta y de unas interfaces para adaptar las señales de los sensores a las entradas del sistema de control [...]. Este tipo de sistemas se

¹⁴ Josep Balcells y José Luis Romeral. Libro “Autómatas Programables”. Editorial MARCOMBO, España, 1997, pág. 12.

denominan *en lazo cerrado*, ya que su diagrama muestra claramente una estructura con una cadena directa y un entorno o realimentación, formando un lazo de control.”¹⁵

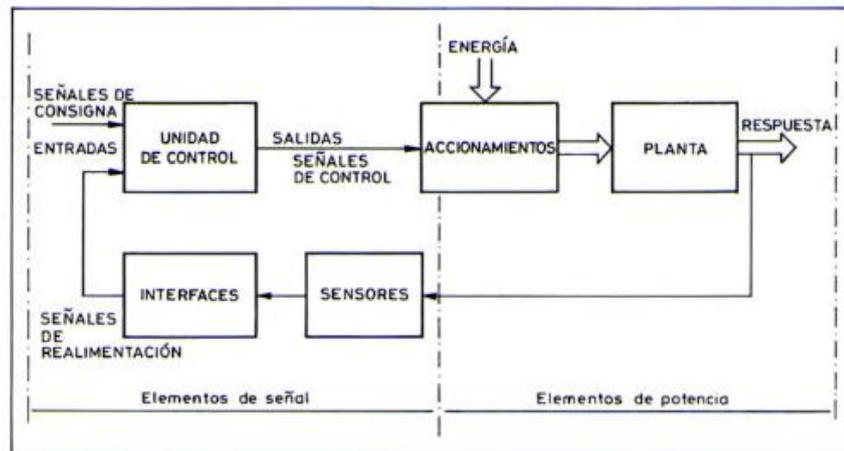


Figura N°02: Esquema de un sistema de control de lazo cerrado.
Fuente: Libro “Autómatas Programables”, pág. 12.

“La eliminación de errores y un aumento en la seguridad de los procesos es otra contribución del uso y aplicación de esta técnica de control. En este punto es importante destacar que anterior a la aplicación masiva de las técnicas de control automático en la industria, era el hombre el que aplicaba sus capacidades de cálculo e incluso su fuerza física para la ejecución del control de un proceso o máquina asociada a la producción. En la actualidad, gracias al desarrollo y aplicación de las técnicas modernas de control, un gran número de tareas y cálculos asociados a la manipulación de las variables ha sido delegado a computadoras,

¹⁵ Josep Balcells y José Luis Romeral. Libro “Autómatas Programables”. Editorial MARCOMBO, España, 1997, pág. 12.

controladores y accionamientos especializados para el logro de los requerimientos del sistema.”¹⁶

“El principio de todo sistema de control automático es la aplicación del concepto de realimentación o feedback (medición tomada desde el proceso que entrega información del estado actual de la variable que se desea controlar) cuya característica especial es la de mantener al controlador central informado del estado de las variables para generar acciones correctivas cuando así sea necesario. Este mismo principio se aplica en campos tan diversos como el control de procesos químicos, control de hornos en la fabricación del acero, control de máquinas herramientas, control de variables a nivel médico e incluso en el control de trayectoria de un proyectil militar.”¹⁷

2.2.3.1 VENTAJAS DE UN CONTROL AUTOMÁTICO

- “Mejora la calidad de los productos.
- Disminuir los tiempos de operación.
- Reducir la dependencia de operarios para manejar procesos.
- Reducir costos de operación.”¹⁸

¹⁶ Abarca Patricio, Sistemas de control automático, El abc de la automatización, recuperado de <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/sistemas-de-control-automatico.pdf>

¹⁷ Abarca Patricio, Sistemas de control automático, El abc de la automatización, recuperado de <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/sistemas-de-control-automatico.pdf>

¹⁸ Introducción al control de procesos para ingenieros, Universidad de los Andes, Escuela de ingeniería mecánica, Venezuela.

2.2.3.2 CLASIFICACION DE LOS SISTEMAS DE CONTROL:

2.2.3.2.1 SISTEMAS DE CONTROL DE LAZO ABIERTO

“En estos sistemas la señal de salida no influye sobre su regulación. Se obtienen los datos de entrada y se ejecuta el proceso de control. Un ejemplo de sistema de lazo abierto es el semáforo. La señal de entrada es el tiempo asignado a cada luz (rojo, amarilla y verde) de cada una de las calles. El sistema cambia las luces según el tiempo indicado, sin importar que la cantidad de tránsito varíe en las calles.”¹⁹

“La mayor parte de sistemas de lazo abierto serán automatismos a los que no podremos llamar en sentido estricto robots porque, al no tener en cuenta la salida, su capacidad de toma de decisiones “inteligentes” es muy limitada. Por ejemplo, un sistema de riego en lazo abierto tiene un temporizador que lo pone en marcha todos los días a una determinada hora; riega las plantas durante un cierto tiempo pasado el cual se interrumpe, con independencia de que las plantas hayan recibido la cantidad de agua adecuada, una cantidad excesiva o una cantidad insuficiente. Se trata de un automatismo, pero no de un auténtico robot.”²⁰

¹⁹ Castiñeira Néstor Horacio, Tecnología-tecnica, recuperado de http://www.tecnologia-tecnica.com.ar/sistemadecontrol/index%20sistemasdecontrol_archivos/Page268.htm

²⁰ Castiñeira Néstor Horacio, Tecnología-tecnica, recuperado de http://www.tecnologia-tecnica.com.ar/sistemadecontrol/index%20sistemasdecontrol_archivos/Page268.htm

“Es decir, en un sistema de control de lazo abierto la salida ni se mide ni se realimenta para compararla con la entrada. Los sistemas de control de lazo abierto son sistemas de control en los que la salida no tiene efecto sobre la señal o acción de control.”²¹

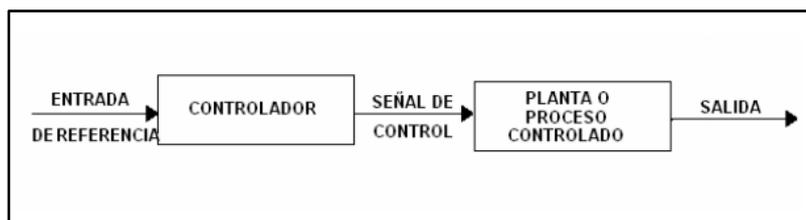


Figura N°03: Sistema de control de lazo abierto
Fuente: <http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>

“Los elementos de un sistema de control se pueden dividir en dos partes: el controlador y el proceso controlado. Una señal de entrada o comando se aplica al controlador, cuya salida actúa como una señal de control o señal actuante, la cual regula el proceso controlado, de tal forma que la variable de salida o variable controlada se desempeñe de acuerdo a ciertas especificaciones o estándares establecidos. En los casos simples, el controlador puede ser un amplificador, filtro, unión mecánica u otro elemento de control. En los casos más complejos puede ser una computadora tal como un procesador.”²²

²¹ Pérez Mario Alberto; Pérez Hidalgo Analía; Pérez Berenguer Elisa, Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo. ,Recuperado de <http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>

²² Pérez Mario Alberto; Pérez Hidalgo Analía; Pérez Berenguer Elisa, Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo. ,Recuperado de <http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>

“En los sistemas de control de lazo abierto, no se compara la salida con la entrada de referencia. Por lo tanto, para cada entrada de referencia corresponde una condición de operación fijada.”²³

“Así la exactitud del sistema depende de la calibración. Calibrar significa establecer una relación entre la entrada y la salida con el fin de obtener del sistema la exactitud deseada. Así la exactitud del sistema depende de la calibración. Hay que hacer notar que cualquier sistema de control que actúa sobre una base de control de tiempo (temporizador), es un sistema de lazo abierto.”²⁴

“Los sistemas de control de lazo abierto son económicos pero normalmente inexactos. Un sistema de control de lazo abierto es insensible a las perturbaciones; por consiguiente un sistema de control de este tipo es útil cuando se tiene la seguridad que no existen perturbaciones actuando sobre el mismo.

En la práctica solo se puede usar el control de lazo abierto si la relación entre la entrada y la salida es conocida, y si no hay perturbaciones internas ni externas importantes.”²⁵

2.2.3.2.2 SISTEMAS DE CONTROL DE LAZO CERRADO

“Se trata de aquellos sistemas que poseen retroalimentación de la señal de salida que interviene en la regulación. Un equipo de aire acondicionado es un sistema de lazo cerrado, ya que cuenta con un sensor que permanentemente registra la temperatura ambiente, y con un comparador, que determina si la temperatura es la deseada. Si es necesario corregirla, el comparador da la señal para que esto ocurra.

Un sistema de riego en lazo cerrado, no se detendrá al cabo de un tiempo fijo, sino cuando detecte que se está consiguiendo el objetivo buscado, es decir, que la humedad de las plantas es la adecuada. Y se pondrá en marcha, no a una hora determinada, sino en cualquier momento en que la humedad se sitúe por debajo de un valor determinado.”²⁶

“En los sistemas de control de lazo cerrado, la salida o señal controlada, debe ser realimentada y comparada con la entrada de referencia, y se debe enviar una señal actuante o acción de control, proporcional a la diferencia entre la entrada y la salida a través del sistema, para disminuir el error y corregir la salida.

²⁶ Castiñeira Néstor Horacio, Tecnología-tecnica, recuperado de http://www.tecnologia-tecnica.com.ar/sistemadecontrol/index%20sistemasdecontrol_archivos/Page268.htm

Un sistema de control de lazo cerrado es aquel en el que la señal de salida tiene efecto directo sobre la acción de control. Esto es, los sistemas de control de lazo cerrado son sistemas de control realimentados. La diferencia entre la señal de entrada y la señal de salida se la denomina señal de error del sistema; esta señal es la que actúa sobre el sistema de modo de llevar la salida a un valor deseado. En otras palabras el término lazo cerrado implica el uso de acción de realimentación negativa para reducir el error del sistema. La siguiente figura muestra la relación entrada-salida de un sistema de control de lazo cerrado."²⁷

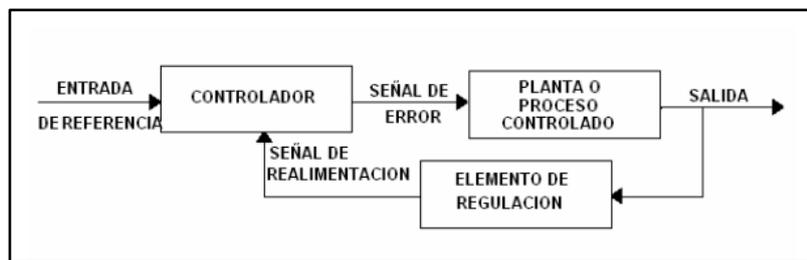


Figura N°04: Sistema de control de lazo cerrado
Fuente: <http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>

²⁷ Castiñeira Nestor Horacio, Tecnología-tecnica, recuperado de http://www.tecnologia-tecnica.com.ar/sistemadecontrol/index%20sistemasdecontrol_archivos/Page268.htm

2.2.3.3 **COMPARACION DE LOS SISTEMAS DE CONTROL:**

“La ventaja de los sistemas de control de lazo cerrado es que al usar de forma adecuada la realimentación, como se vio en la sección anterior, se puede lograr que el sistema sea relativamente insensible a las perturbaciones externas o exógenas y a variaciones internas de los parámetros del sistema. De esta manera se pueden utilizar en el diseño y experimentación componentes más inexactos y económicos, logrando exactitud de control, mientras esto sería mucho más complicado de solucionar proponiendo un diseño de un sistema de lazo abierto.

Desde el punto de vista de la estabilidad, en los sistemas de lazo abierto es más difícil de lograr, ya que no constituye un problema importante. Por otro lado, en los sistemas de lazo cerrado, la estabilidad siempre constituye un problema importante por la tendencia a sobre corregir errores lo que puede introducir oscilaciones de amplitud constante o variable.

Hay que recalcar que para sistemas en los que las entradas son conocidas y no existen perturbaciones, es preferible usar sistemas de control de lazo abierto. Los sistemas de control de lazo cerrado se deben usar sí o sí en sistemas que estén sometidos a perturbaciones externas.”²⁸

2.2.4 CONTROLADORES $G_c(s)$:

“Proporciona la excitación al proceso para alcanza la salida deseada. Es diseñado para controlar el comportamiento global del proceso y también recibe los nombres de *regulador*, *corrector* o *compensador*.”²⁹

“Los reguladores, también conocidos como controladores, son los elementos que permiten que la variable o magnitud física que se desea controlar (velocidad de una maquina eléctrica, posición del eje de un motor, temperatura de un recinto, etc.) permanezca siempre entre ciertos valores admisibles, sin intervención directa de un operador humano.

Un controlador electrónico es un dispositivo (analógico o digital) que calcula la acción de control necesaria a partir de una cierta ley de control (o algoritmo de control) determinada previamente. Para ello, utiliza las señales de entrada (la consigna y el valor de la variable d salida de la planta.

- **Controladores de temperatura todo/nada.**

También llamados ONN/OFF, permiten el control de variables de variación lenta, como es la temperatura.

²⁸ Perez Mario Alberto; Perez Hidalgo Analía; Perez Berenguer Elisa, Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo. ,Recuperado de <http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>

²⁹ Angulo Bahon Cecilio; Raya Giner Cristóbal. Tecnología de sistemas de control. Ediciones UPC, Barcelona, pág. 31.

- **Controladores de procesos de propósito general.**

Permiten el control de forma más precisa que los anteriores. Los controladores de este tipo más conocidos son llamados controladores PID (Proporcional Integral Derivativo).

- **Controladores de velocidad de máquinas eléctricas.**

Como su nombre indica, emite el control de la velocidad de giro y la posición de los ejes para motores eléctricos, tanto de CC como de CA.

- **Controladores secuenciales.**

En este grupo se incluyen aquellos reguladores de propósito general, utilizados normalmente en procesos industriales y que están basados en autómatas programables y sistemas eléctricos diversos como contactores, relés y temporizadores.”³⁰

2.2.4.1 CONTROLADOR PID:

“Un controlador o regulador PID es un dispositivo que permite controlar un sistema en lazo cerrado para que alcance el estado de salida deseado. El controlador PID está compuesto de tres elementos que proporcionan una acción Proporcional, Integral y Derivativa. Estas tres acciones son las que dan nombre al controlador PID.”³¹

³⁰ Duran Jose Luis; Martínez Herminio; Gamiz Juan; Domingo Joan; Grau Antoni, Automatismos eléctricos e industriales, Editorial MARCOMBO, 2012, Barcelona, pág. 53-54.

³¹ Picuino, Programación con arduino, control automático, Recuperado de <http://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html>

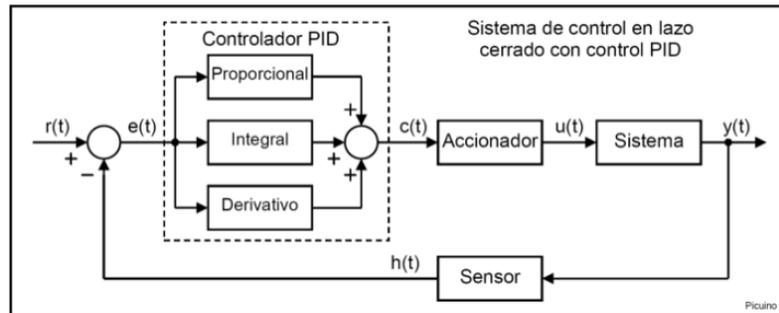


Figura N°05 Sistema de control de lazo cerrado con PID
 Fuente: <http://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html>

2.2.4.2 COMPONENTES DE CONTROLADOR PID:

2.2.4.2.1 ACCION DE CONTROL PROPORCIONAL

“Como su nombre indica, esta acción de control es proporcional a la señal de error $e(t)$. Internamente la acción proporcional multiplica la señal de error por una constante K_p .

Esta acción de control intenta minimizar el error del sistema. Cuando el error es grande, la acción de control es grande y tiende a minimizar este error.

Aumentar la acción proporcional K_p tiene los siguientes efectos:

- 1° - Aumenta la velocidad de respuesta del sistema.
- 2° - Disminuye el error del sistema en régimen permanente.
- 3° - Aumenta la inestabilidad del sistema.

Los dos primeros efectos son positivos y deseables. El último efecto es negativo y hay que intentar minimizarlo. Por lo tanto al aumentar la acción proporcional existe un punto de equilibrio en el que se consigue suficiente rapidez de

respuesta del sistema y reducción del error, sin que el sistema sea demasiado inestable. Aumentar la acción proporcional más allá de este punto producirá una inestabilidad indeseable. Reducir la acción proporcional, reducirá la velocidad de respuesta del sistema y aumentará su error permanente.”³²

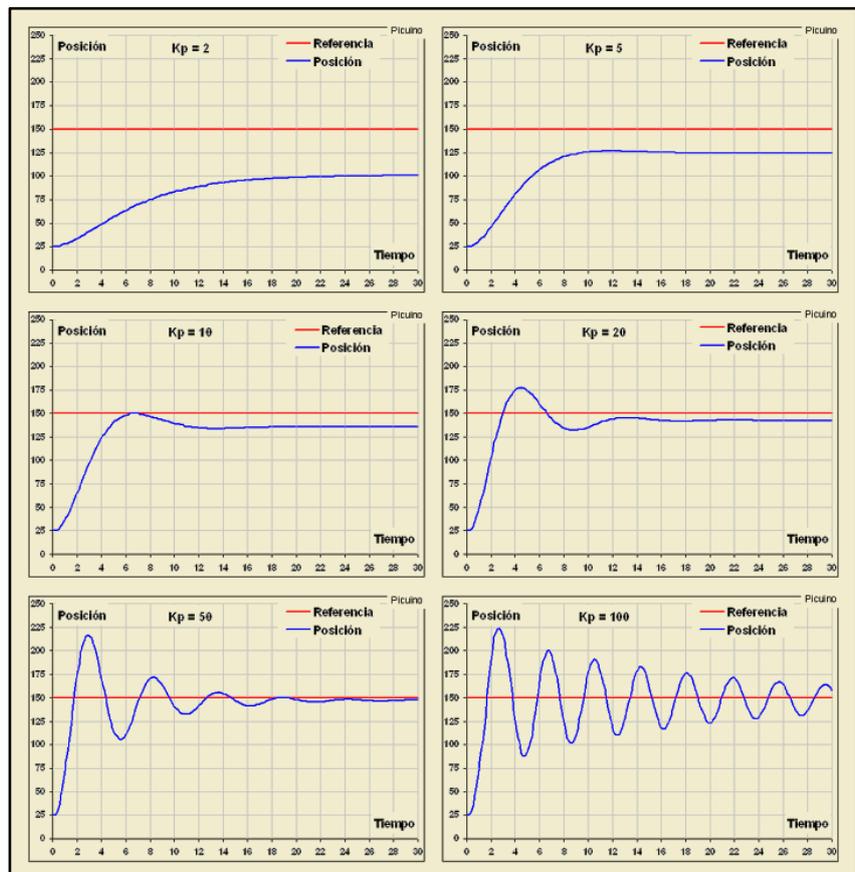


Figura N°06: Graficas del efecto de la acción de control proporcional.
Fuente: <http://www.picuno.com/es/arduprog/control-pid.html>

“En los gráficos anteriores puede observarse el efecto de aumentar progresivamente la acción proporcional en un control de posición.

³² Picuno, Programación con arduino, control automático, Recuperado de <http://www.picuno.com/es/arduprog/control-pid.html>

Con una acción proporcional pequeña $K_p=2$, el sistema es lento, tardando 20 segundos en alcanzar la posición deseada y el error de posición es grande, de 50 milímetros. A medida que se aumenta la acción proporcional, el error disminuye y la velocidad de respuesta aumenta.

Con una ganancia proporcional $K_p=20$ el sistema es más rápido, tardando 12 segundos en establecerse la posición permanente. Asimismo el error se ha reducido hasta una décima parte, sólo 5 milímetros. También se puede observar un sobrepulso en la respuesta, y el comienzo de cierta inestabilidad.

Con ganancias mayores se consigue disminuir todavía más el error permanente, pero la velocidad de respuesta no aumenta porque el sistema se vuelve tan inestable que la posición tarda mucho en establecerse en su estado final. En este ejemplo la acción proporcional se ha escalado de forma que sus valores se encuentren entre 0 y 100.

Llegado a este punto, puede verse que la acción proporcional no puede mejorar más la respuesta del sistema. La mejor opción con $K_p=20$ presenta un sobrepulso de unos 30 milímetros y un error permanente de 5 milímetros. Si se desea mejorar esta respuesta hay que incorporar otro tipo de control. Aquí es dónde el control

derivativo puede ayudar a mejorar la respuesta del sistema.”³³

2.2.4.2.2 ACCION DE CONTROL DERIVATIVO

“Como su nombre indica, esta acción de control es proporcional a la derivada de la señal de error $e(t)$. La derivada del error es otra forma de llamar a la “velocidad” del error. A continuación se verá porqué es tan importante calcular esta velocidad. En las gráficas anteriores, cuando la posición se encuentra por debajo de 150mm, la acción de control proporcional siempre intenta aumentar la posición. El problema viene al tener en cuenta las inercias. Cuando el sistema se mueve a una velocidad alta hacia el punto de referencia, el sistema se pasará de largo debido a su inercia. Esto produce un sobrepulso y oscilaciones en torno a la referencia. Para evitar este problema, el controlador debe reconocer la velocidad a la que el sistema se acerca a la referencia para poder frenarle con antelación a medida que se acerque a la referencia deseada y evitar que la sobrepase.

Aumentar la constante de control derivativa K_d tiene los siguientes efectos:

1º.- Aumenta la estabilidad del sistema controlado.

³³ Picuino, Programación con arduino, control automático, Recuperado de <http://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html>

2º.- Disminuye un poco la velocidad del sistema.

3º.- El error en régimen permanente permanecerá igual.

Esta acción de control servirá por lo tanto para estabilizar una respuesta que oscile demasiado.”³⁴

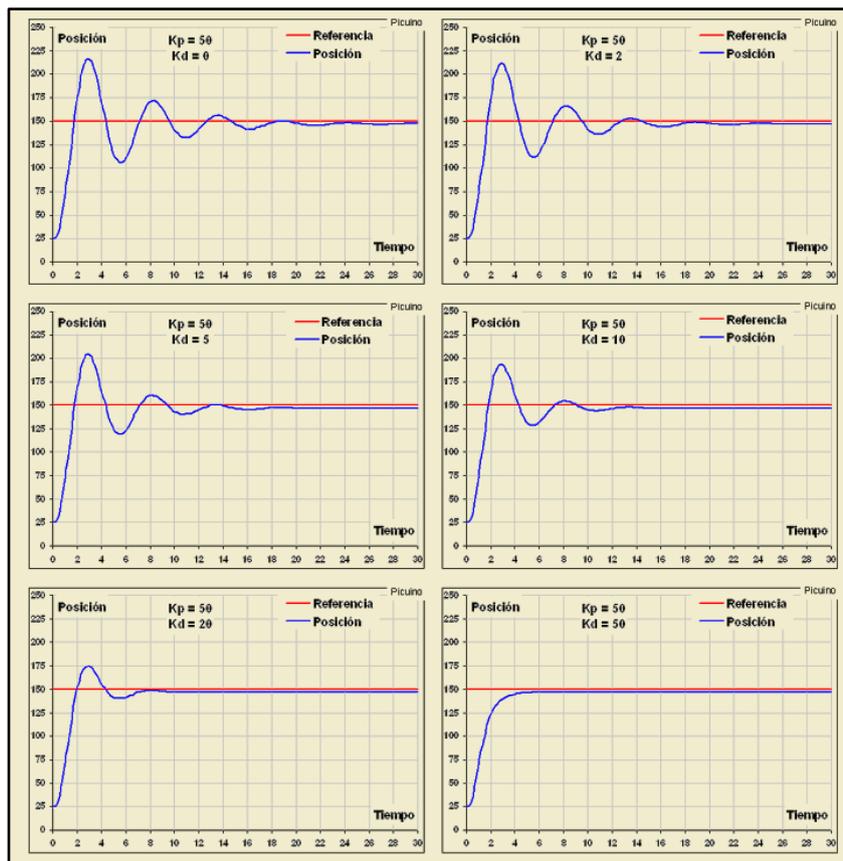


Figura N°07: Graficas del efecto de la acción de control derivativo.
Fuente: <http://www.picuno.com/es/arduprog/control-pid.html>

“En los gráficos anteriores puede verse como, al aumentar la acción derivativa K_d , se consigue disminuir las oscilaciones hasta el punto de que desaparecen para $K_d=50$. También puede apreciarse cómo la respuesta se

³⁴ Picuno, Programación con arduino, control automático, Recuperado de <http://www.picuno.com/es/arduprog/control-pid.html>

hace un poco más lenta al aumentar la constante derivativa. Con $K_d=0$ el sistema tarda 1.8 segundos en subir hasta el valor de referencia. Con $K_d=20$ el sistema tarda 2 segundos en subir hasta el valor de referencia. En este ejemplo la acción derivativa se ha escalado de forma que sus valores se encuentren entre 0 y 100. Un problema que presenta el control derivativo consiste en que amplifica las señales que varían rápidamente, por ejemplo el ruido de alta frecuencia. Debido a este efecto, el ruido de la señal de error aparece amplificado en el accionamiento de la planta. Para poder reducir este efecto es necesario reducir el ruido de la señal de error mediante un filtro paso bajos antes de aplicarla al término derivativo. Con este filtro la acción derivativa se encuentra limitada, por lo que es deseable reducir el ruido de la señal de error por otros medios antes de recurrir a un filtro paso bajos. Llegado a este punto, el sistema es rápido y estable, pero mantiene todavía un pequeño error en régimen permanente. Esto significa que la posición real del sistema no es exactamente la posición deseada. Para poder reducir este error se recurre a la tercera acción de control del regulador PID, la acción de control Integral³⁵

³⁵ Picuino, Programación con arduino, control automático, Recuperado de <http://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html>

2.2.4.2.3 ACCION DE CONTROL INTEGRAL

“Esta acción de control como su nombre indica, calcula la integral de la señal de error $e(t)$. La integral se puede ver como la suma o acumulación de la señal de error. A medida que pasa el tiempo pequeños errores se van sumando para hacer que la acción integral sea cada vez mayor. Con esto se consigue reducir el error del sistema en régimen permanente.

La desventaja de utilizar la acción integral consiste en que esta añade una cierta inercia al sistema y por lo tanto le hace más inestable.

Aumentar la acción integral K_i tiene los siguientes efectos:

1º.- Disminuye el error del sistema en régimen permanente.

2º.- Aumenta la inestabilidad del sistema.

3º.- Aumenta un poco la velocidad del sistema.

Esta acción de control servirá para disminuir el error en régimen permanente.”³⁶

³⁶ Picuino, Programación con arduino, control automático, Recuperado de <http://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html>

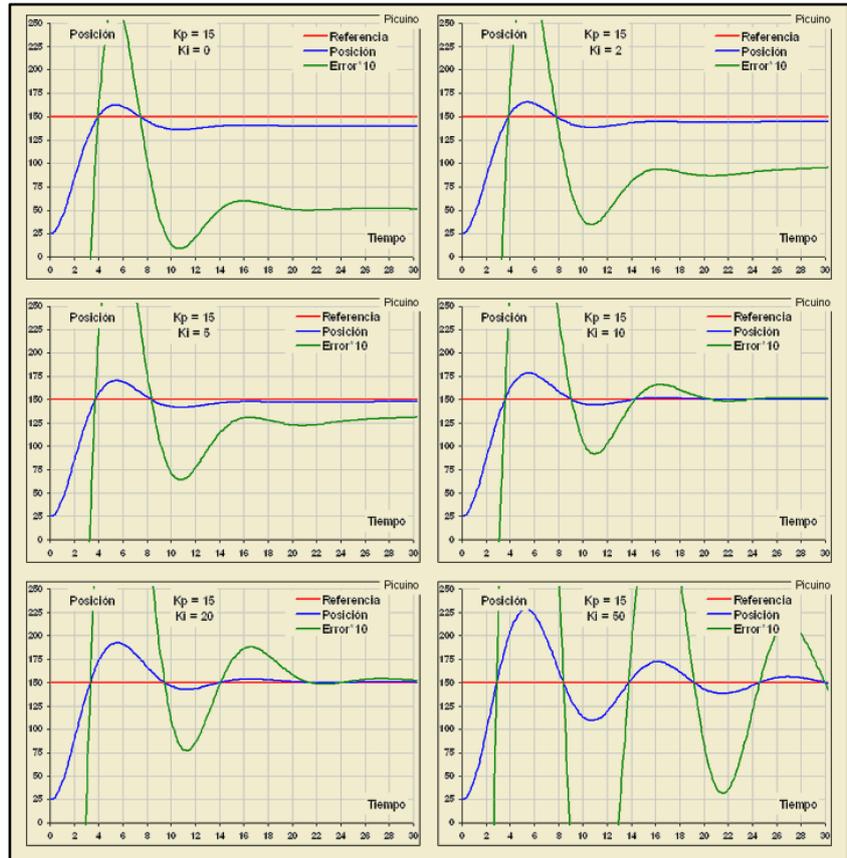


Figura N°08: Graficas del efecto de la acción de control integral.
Fuente: <http://www.picuno.com/es/arduprog/control-pid.html>

“En las gráficas anteriores se ha añadido una señal de error ampliada, de color verde, para apreciar mejor cómo se reduce el error a medida que aumenta la acción integral. Otro efecto visible es el aumento de la inestabilidad del sistema a medida que aumenta K_i . Por esta razón el control integral se suele combinar con el control derivativo para evitar las oscilaciones del sistema.”³⁷

³⁷ Picuno, Programación con arduino, control automático, Recuperado de <http://www.picuno.com/es/arduprog/control-pid.html>

2.2.4.3 ESTRUCTURA DEL PID:

"Consideremos un lazo de control de una entrada y una salida (SISO) de un grado de libertad:

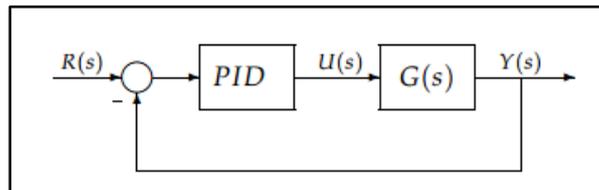


Figura N°09: Diagrama de bloques.

Los miembros de la familia de controladores PID incluyen tres acciones:

Proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Estos controladores son los denominados P, I, PI, PD y PID. ³⁸

2.2.4.3.1 ACCION DE CONTROL PROPORCIONAL

"Da una salida del controlador que es proporcional al error, es decir: $u(t) = K_P \cdot e(t)$, que descripta desde su función transferencia queda:

$$C_p(s) = K_p$$

Donde K_p es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set).

³⁸ Mazzone Virginia, Controladores PID, recuperado de <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>

$C_p(s)$ representa la función de transferencia entre la salida del controlador y la señal de error, dicha relación también se le conoce como el nombre de ganancia proporcional K_p y se puede deducir despejando la expresión $u(t) = K_p \cdot e(t)$.³⁹

2.2.4.3.2 ACCION DE CONTROL INTEGRAL

“Da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad C_i(s) = \frac{K_i}{s}$$

La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero. Por lo que se concluye que dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero.”⁴⁰

³⁹ Mazzone Virginia, Controladores PID, recuperado de <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>

⁴⁰ Mazzone Virginia, Controladores PID, recuperado de <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>

2.2.4.3.3 ACCION DE CONTROL PROPORCIONAL – INTEGRAL

“Se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Donde T_i se denomina tiempo integral y es quien ajusta la acción integral. La función de transferencia resulta:

$$C_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, y si fuera negativo la señal de control será decreciente. Este razonamiento sencillo nos muestra que el error en régimen permanente será siempre cero. Muchos controladores industriales tienen solo acción PI. Se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden. Lo que puede demostrarse en forma sencilla, por ejemplo, mediante un ensayo al escalón.”⁴¹

⁴¹ Mazzone Virginia, Controladores PID, recuperado de <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>

2.2.4.3.4 ACCION DE CONTROL PROPORCIONAL – DERIVATIVA

“Se define mediante:

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

Donde T_d es una constante denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que solo es eficaz durante periodos transitorios. La función transferencia de un controlador PD resulta:

$$C_{PD}(s) = K_p + sK_p T_d$$

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Aunque el control derivativo no afecta en forma directa al error en estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema y, por tanto, permite un valor

más grande que la ganancia K_p , lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable.”⁴²

2.2.4.3.5 ACCION DE CONTROL PROPORCIONAL – INTEGRAL – DERIVATIVA.

“Esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Y su función de transferencia resulta:

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

”⁴³

⁴² Mazzone Virginia, Controladores PID, recuperado de <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>

⁴³ Mazzone Virginia, Controladores PID, recuperado de <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>

2.2.4.4 SINTONIZACION DE CONTROLADORES

“En esta etapa del procesamiento de la señal se determinan los parámetros de control de acuerdo con algún conjunto de especificaciones.

La sintonización de los controladores Proporcional – Integral - Derivativo o simplemente controladores PID, consiste en la determinación del ajuste de sus parámetros (K_p , T_i , T_d), para lograr un comportamiento del sistema de control aceptable y robusto de conformidad con algún criterio de desempeño establecido. Para poder realizar la sintonización de los controladores, primero debe identificarse la dinámica del proceso, y a partir de ésta determinar los parámetros del controlador utilizando el método de sintonización seleccionado.”⁴⁴

El Controlador PID o controlador Proporcional-integral-derivativo. Brinda autorregulación al régimen transitorio de una señal o variable, disminuyendo los sobrepulsos y las sobreoscilaciones. También reduce el error permanente y establece una señal estacionaria sin perturbaciones igualando la señal de error a cero de manera progresiva y rápida. Esto lo consigue mediante determinado parámetros como la ganancia proporcional K_p , que se encarga de disminuir el error permanente y aumentar la velocidad de respuesta del sistema.

⁴⁴ Ingeniería Revista de la Universidad de Costa Rica, Alfaro Ruíz Víctor M, enero/diciembre 2013.

Las sobreoscilaciones y sobrepulsos son controladas por la ganancia derivativa K_d , mientras que el error permanente es suprimido en su totalidad por la ganancia integral K_i . Cada ganancia en una proporción desmedida llega a tener un efecto contraproducente y podría afectar la acción de las otras ganancias restantes del controlador PID, por ejemplo, el exceso de la ganancia proporcional K_p aumenta la inestabilidad del sistema, lo mismo ocurre con la ganancia integral K_i , por lo que es adecuada una correcta sintonización de controladores.

2.2.5 ACTUADORES:

“Es el elemento final de control, la parte de proceso que provoca físicamente la dinámica de todo el sistema. Su transmitancia se incluye generalmente en la función de transferencia del proceso $G(s)$, aunque en ocasiones se integra en la función de transferencia del controlador $G_c(s)$. Habitualmente consta de un adaptador de potencia y del elemento de actuación. La adaptación de potencia es necesaria porque el generador de consignas suele ser de baja potencia y por lo tanto, suficiente para alimentar directamente al actuador.”⁴⁵

“Normalmente, las acciones de control que debe suministrar el controlador a la planta o proceso para obtener el valor adecuado de

la variable e salida deben ser de una potencia considerable, especialmente en ambientes industriales.

Pensemos, por ejemplo, que si la planta es un motor de CC, las tensiones y la corriente con las que trabaja suelen ser de valores considerables. En estos casos, el controlador, que es en esencia un circuito electrónico de baja potencia, no puede proporcionar esos niveles tan grandes de tensión o corriente. Por lo tanto, en la mayoría de aplicaciones entre el controlador y la planta suele existir lo que conocemos como *actuador*.

En otras ocasiones el actuador permite transformar una magnitud eléctrica en otra magnitud física como fuerza, movimiento, etc. Este es el caso de plantas donde la acción de control no debe ser una magnitud eléctrica, sino una magnitud de distinta naturaleza. Por ejemplo, una válvula electroneumática es un dispositivo que permite transformar una tensión eléctrica en un giro (de cierre o de apertura) de la misma. En ocasiones, a los actuadores se les conoce también con el nombre de *control final*.

Un actuador es, por tanto, un dispositivo que permite transformar una magnitud eléctrica en otra no eléctrica (por ejemplo, mecánica) o bien permite la amplificación de un mismo tipo de energía.

⁴⁵ Angulo Bahon Cecilio; Raya Giner Cristóbal. Tecnología de sistemas de control. Ediciones UPC, Barcelona, pág. 32.

Al igual que sucede con los detectores y dispositivos sensores, el número de actuadores es inmenso y solo trataremos los más conocidos.

- Reles y contactores
- Solenoides y electroimanes
- Electroválvulas
- Actuadores electrohidraulicos
- Actuadores electroneumaticos”⁴⁶

Cuando hablamos de actuadores, nos referimos a los equipos y dispositivos de campo que están en contacto directo y tienen repercusión directa con el proceso (motores, Electrobombas, válvulas, etc).

Los actuadores, junto con los sensores, conforman el nivel base de un modelo estructural de un sistema automatizado. Este nivel base es denominado como nivel de proceso o planta, y se encuentran ubicados a los largo de toda la planta para realizar el proceso de producción.

⁴⁶ Duran Jose Luis; Martinez Herminio; Gamiz Juan; Domingo Joan; Grau Antoni, Automatismos eléctricos e industriales, Editorial MARCOMBO, 2012, Barcelona, pág. 54.

2.2.6 PLANTA - G(s):

“Son los componentes del sistema que hay que controlar. También se denomina *proceso*. En la planta se produce la transformación de la energía suministrada que se desea controlar. En general, la energía eléctrica suministrada al actuador se transforma en energía mecánica –motor--. En energía potencial –depósito de líquidos--, cinética –caudal impulsado por una tubería--,etc.”⁴⁷

“Se designará como planta a cualquier objeto físico que pueda ser controlado. Puede ser un equipo, quizás simplemente un juego de piezas de una máquina funcionando juntas, cuyo objetivo es realizar una operación determinada. Ejemplos de plantas son: horno de calentamiento, reactor químico, etc.”⁴⁸

2.2.7 SENSORES - H(s):

“La definición del concepto de sensor está íntimamente relacionada con la definición de transductor, ya que un sensor siempre hará uso de un transductor. No obstante. La principal diferencia entre un transductor y un sensor radica en que el sensor no solo cambia el dominio de la variable física medida, sino que además la salida del sensor será un dato útil para un sistema de medición. De este modo, un sensor se define como un dispositivo de entrada que provee una salida manipulable de la variable física medida.

A diferencia de un transductor, el sensor solo puede ser un dispositivo de entrada, ya que este último siempre será un intermediario entre la variable física y el sistema de medida. Así que en el caso de un sensor no basta con transformar la energía, este debe tener el tipo de dominio requerido.”⁴⁹

“Es el elemento que permite sensar la salida de la planta. En el lazo de control se suele situar en la realimentación. En ocasiones, su función de transferencia se incluye en la transmitancia del proceso $G(s)$. Los sensores se caracterizan por que transforman una observación física --nivel, caudal, velocidad, temperatura-- en una señal eléctrica. Constan de dos partes, el detector y un transductor

⁴⁷ Angulo Bahon Cecilio; Raya Giner Cristóbal. Tecnología de sistemas de control. Ediciones UPC, Barcelona, pag. 31.

⁴⁸ Pérez Mario Alberto; Pérez Hidalgo Analía; Pérez Berenguer Elisa, Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo, recuperado de <http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>

⁴⁹ Corona Ramirez Leonel G.; Abarca Jimenez Griselda S.; Mares Carreño Jesus, Sensores y actuadores aplicaciones con Arduino, Azcapotzalco Mexico D.F. Grupo editorial PATRIA SA de CV, 2014, cap. 1, pág. 17.

o transmisor. El detector transforma la observación física en una señal eléctrica –mA, pulsos--.⁵⁰

Son componentes captadores de señal, que junto a los actuadores conforman el nivel de planta. Detectan señales digitales y/o analógicas, enviando dichas señales al nivel de control de procesos, específicamente, hacia el módulo de entradas analógicas o digitales según sea el caso de la señal captada por el sensor, de los controladores lógico programables.

2.2.1 SEÑALES DE UN SISTEMA DE CONTROL

2.2.1.1 CONSIGNA $Y_{sp}(t)$:

“Es la referencia de la variable de proceso. También recibe los nombres de variable de referencia $-r(t)-$, Set Point –SP--, variable de proceso deseada $-c(t)-$, o set value –SV.”⁵¹

Conocida también como señal de entrada, señal de consigna, señal deseada, señal de referencia o Set Point. Determina el valor de la señal que se desea obtener a la salida del proceso.

⁵⁰ Angulo Bahon Cecilio; Raya Giner Cristóbal. Tecnología de sistemas de control. Ediciones UPC, Barcelona, Pag. 31.

⁵¹ Angulo Bahon Cecilio; Raya Giner Cristóbal. Tecnología de sistemas de control. Ediciones UPC, Barcelona, pág. 33.

2.2.1.2 SEÑAL DE ERROR - $e(t)$:

“Indica la discrepancia entre la consigna que se quiere alcanzar o mantener, y la variable de proceso, $e(t) = Y_{sp(t)} - Y(t)$.

En el ámbito industrial se representa por E.

La señal de error en un sistema de control es la señal resultante de restar la señal realimentada con la señal de entrada.”⁵²

2.2.1.3 SEÑAL DE CONTROL - $u(t)$:

“Indica la acción correctora determinada por el elemento controlador. También recibe el nombre industrial de Variable de control, controller output –CO--, “⁵³

Es la señal que se obtiene después de pasar por la etapa del controlador (Es en esta etapa donde se realiza en control PID de la señal y determinación de sus parámetros).

⁵² Angulo Bahon Cecilio; Raya Giner Cristóbal. Tecnología de sistemas de control. Ediciones UPC, Barcelona, pág. 33.

⁵³ Angulo Bahon Cecilio; Raya Giner Cristóbal. Tecnología de sistemas de control. Ediciones UPC, Barcelona, pág. 33.

2.2.1.4 VARIABLE MANIPULADA - $m(t)$:

Es la variable que se obtiene por consecuencia de la acción del actuador. y que actúa sobre la etapa de planta para así regular el proceso y asemejar lo mayor posible la variable controlada (señal de salida) al valor de consigna.

La variable manipulada es de diferente magnitud física que la señal de control, la cual posee magnitudes físicas como corriente (0-20mA; 4-20mA) y tensión (0-10V; -10v-0-10V), dichas magnitudes serán de baja potencia y pasaran por el proceso del actuador, convirtiendo la señal en otra, con diferente magnitud física y de mayor potencia llamada variable manipulada.

La variable manipulada debe ser de la misma naturaleza que la magnitud física de la variable controlada y la señal de referencia (flujo, presión, temperatura, caudal, nivel, etc)

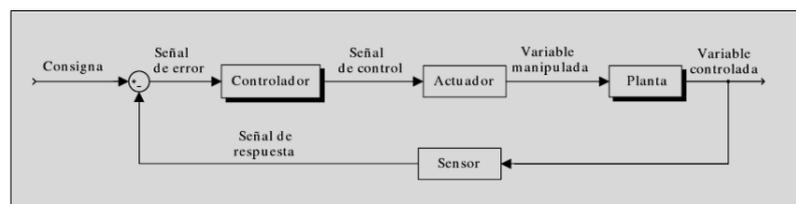


Figura N°10 Sistema de control de lazo cerrado
Fuente: Tecnología de sistemas de control, Angulo Bahon Cecilio;
Raya Giner Cristóbal.

2.2.1.5 VARIABLE DE PROCESO - $y(t)$:

“Es la señal de salida de la planta. Otros nombres utilizados son Process variable – PV, o simplemente salida. Si el sensor de medida se considera dentro de la planta, esta señal es idéntica a la señal de salida medida.”⁵⁴

También llamada “variable controlada”, es la señal de salida resultante de todo el proceso en el sistema de control. Si es un sistema de control de lazo cerrado entonces el proceso será un sistema realimentado que autorregule la señal de entrada comparándola e igualándola con la señal de salida a través de un sensor tantas veces sea posible de manera que la señal de error resulte cero.

2.2.1.6 VARIABLE MEDIDA - $y_m(t)$:

“Es la señal enviada por el sensor al medir la variable de proceso. También recibe el nombre de señal de salida medida – MV, por measured variable--.”⁵⁵

Es la señal que, una vez terminado el proceso de control, regresa hacia el comparador para restarse con la señal deseada hasta que el error sea cero y se obtenga un régimen estacionario. Lógicamente para que la señal de error sea

⁵⁴ Angulo Bahon Cecilio; Raya Giner Cristóbal. Tecnología de sistemas de control. Ediciones UPC, Barcelona, pág. 33.

⁵⁵ Angulo Bahon Cecilio; Raya Giner Cristóbal. Tecnología de sistemas de control. Ediciones UPC, Barcelona, pág. 31.

cero, la señal de salida debe tener el mismo valor de la señal de entrada o consigna.

2.2.1.7 PERTURBACIONES - $P(t)$:

“Es una señal no propia del comportamiento normal de la planta. Según las fuentes documentales que se consulten, se distinguen entre perturbación, ruido $-n(t)$, por noise--, o error de medida, y su inserción como señal en un diagrama de bloques puede realizarse en diversos puntos, pero siempre alterando el comportamiento genuino del sistema. En general se habla de un cambio de carga en el proceso, load change.”⁵⁶

⁵⁶ Angulo Bahon Cecilio; Raya Giner Cristóbal. Tecnología de sistemas de control. Ediciones UPC, Barcelona, Pág. 33.

2.3 MARCO CONCEPTUAL

- **Sistema de control:** El Control automático desempeña un papel importante en los procesos de manufactura, industriales, navales, aeroespaciales, robótica, económicos, biológicos, etc. Los tipos de control empleados para estos procesos serán descritos a continuación, sin embargo es necesario indicar algunos términos que son empleados en todo sistema de automatizado.
- **Señal de salida:** Es la variable que se desea controlar (posición, velocidad, presión, temperatura, etc.). También se denomina variable controlada. PROCESS VARIABLE.
- **Señal de referencia:** Es el valor que se desea que alcance la señal de salida. 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. OUTPUT.
- **Señal análoga:** Es una señal continua en el tiempo.
- **Señal digital:** Es una señal que solo toma valores de 1 y 0.
- **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.) es 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 -5 volts, 0-10 volts o 4-20mA.
- **Sistema de control de 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 de lazo abierto:**
Es estos sistemas de control la señal de salida no es monitoreada para generar una señal de control.”⁵⁷
- **Thinner:** también conocido como diluyente o adelgazador de pinturas es una mezcla de solventes de naturaleza orgánica derivados del petróleo que ha sido diseñado para disolver, diluir o adelgazar sustancias insolubles en agua, como la pintura, los aceites y las grasas.⁵⁸

⁵⁷ Amadori Aldo, El abc de la automatización algoritmo de control PID, Recuperado de <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/algoritmo-de-contro-pid.pdf>

⁵⁸ Solventes industriales, recuperado de <http://practica-uno.blogspot.pe/>

pH: Se trata de una unidad de medida de alcalinidad o acidez de una solución, más específicamente el pH mide la cantidad de iones de hidrógeno que contiene una solución determinada, el significado de sus sigla son, potencial de hidrogeniones, el pH se ha convertido en una forma práctica de manejar cifras de alcalinidad, en lugar de otros métodos un poca más complicados.⁵⁹

Cuando se obtiene mediante una medida de pH que un producto, sustancia o elemento es ácido, quiere decir que posee una alta o baja cantidad de iones de hidrógeno (dependiendo del nivel). Por su parte, que la medición arroje que una sustancia es alcalina (base), significa que no cuenta con estas concentraciones de iones de hidrógeno. Por lo tanto el pH no es más que el indicador del potencial de hidrógenos.⁶⁰

⁵⁹ Recuperado de <http://conceptodefinicion.de/ph/>

⁶⁰ Recuperado de <http://concepto.de/ph/#ixzz4lWYr7jIC>

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN Y DISEÑO DEL PROYECTO

3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA AUTOMATIZADO

El sistema de control proporcional integrador y derivativo a desarrollar como alternativa para mejorar la precisión de temperatura, será aplicado al proceso de elaboración de pinturas de la empresa Mara S.A., siendo más específicos se aplicara a la etapa de equilibrio de concentración, el cual presenta el siguiente esquema:

El esquema siguiente muestra el proceso de mezcla con calentamiento, se trata de adicionar inicialmente pintura en su estado de concentración puro a una tolva con agitación, hasta un nivel L1. Luego se pondrá en marcha el agitador e inmediatamente se adicionara el solvente (thinner), hasta un nivel L2.

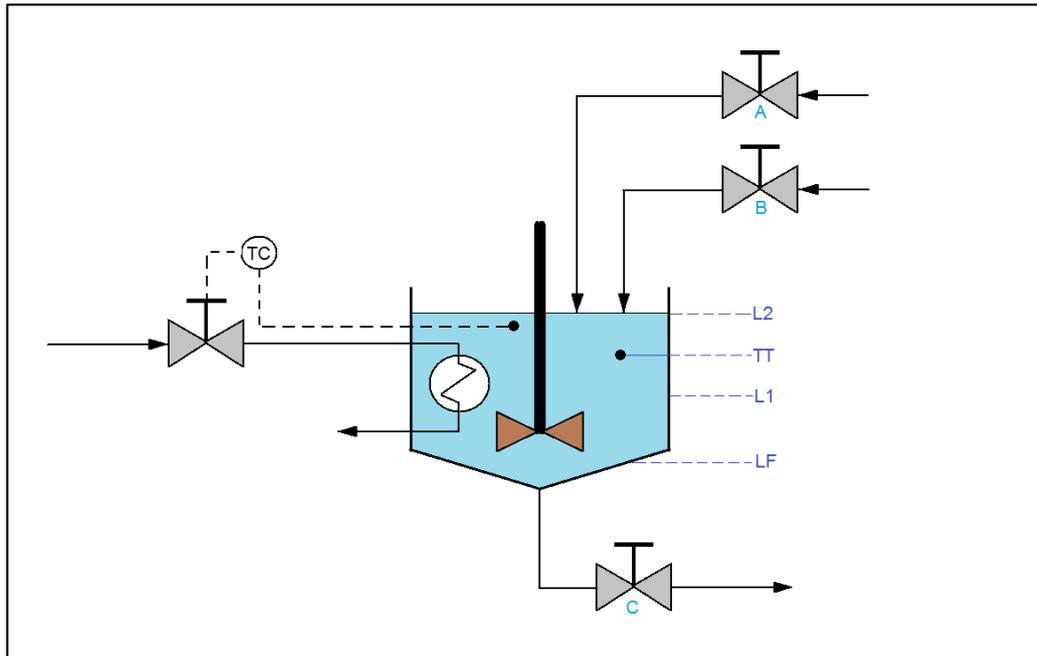


Figura N° 11: Esquema de la etapa de equilibrio de concentración

El siguiente paso es la puesta en marcha, de una resistencia, que al paso de corriente eléctrica, calienta la mezcla hasta una temperatura de consigna de 40°C, esto con la finalidad de con la finalidad de mejorar las características de concentración de la mezcla.

Actualmente el proceso solo hace uso de un sensor de temperatura para monitorear el valor actual de la variable, mas no realiza un proceso de compensación automática.

Las condiciones de esta etapa, señalan que la temperatura debe mantenerse durante 10 minutos, tiempo suficiente para alcanzar un valor de concentración de 0.8 (valor óptimo de concentración).

A continuación debe parar el sistema de agitación y proceder a la descarga de la mezcla hasta el nivel LF. Cabe resaltar que en la delimitación de la propuesta a desarrollar, esta específicamente relacionada al sistema de control de temperatura apoyado en un mecanismo llamado controlador proporcional, integrador y derivativo.

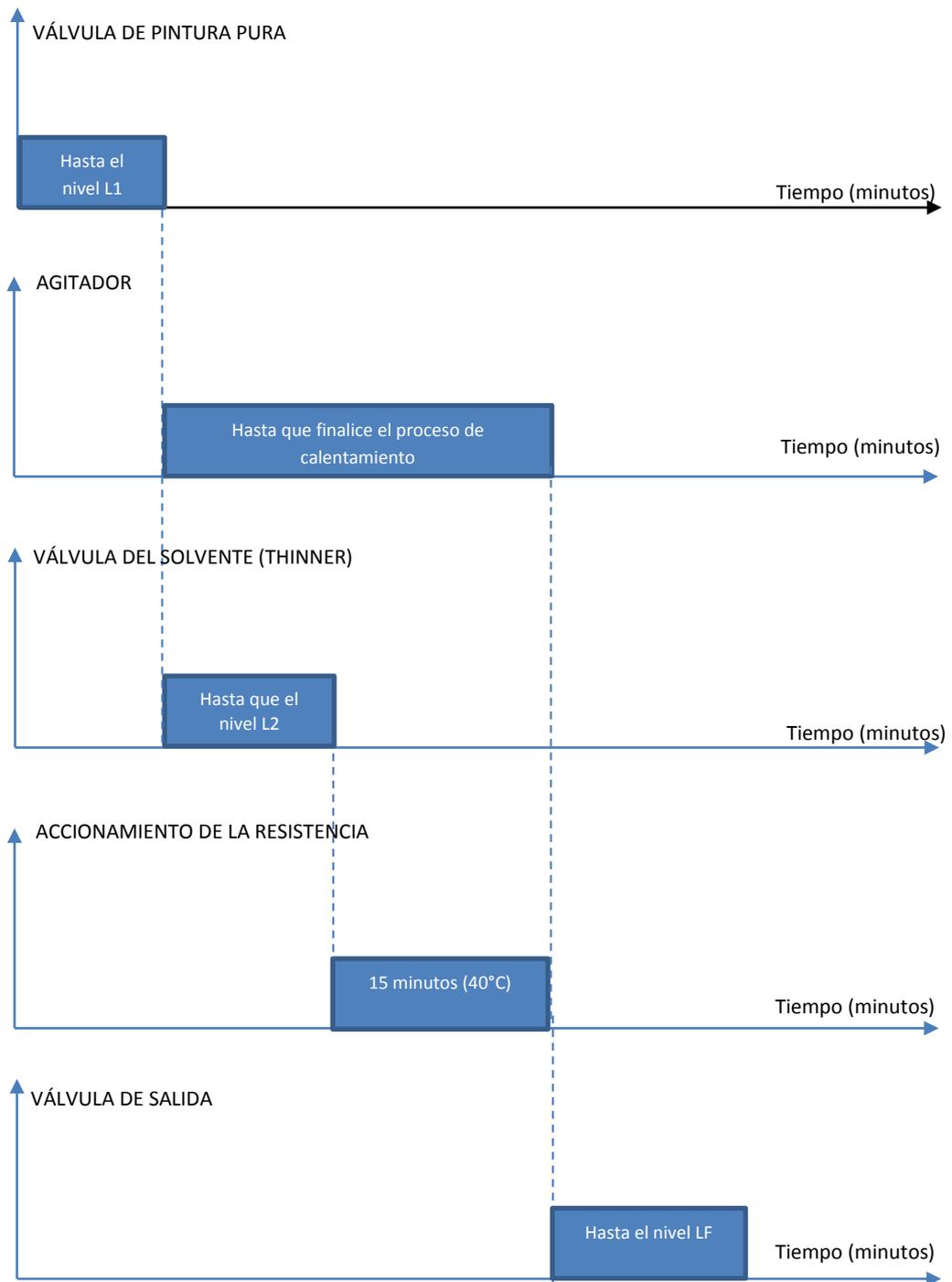


Figura N° 12: Esquema de accionamiento de los actuadores y del controlador

3.2 DESARROLLO DEL AUTOMATISMO

A continuación se procede al desarrollo del sistema de control de temperatura mediante el controlador proporcional, integrador y derivativo, para lo cual se hará uso de los siguientes componentes:

A. Controlador Proporcional - Integrador - Derivativo

Para el desarrollo del sistema de control de temperatura se usara el Controlador de Temperatura Digital serie TE4-RB10W TOKY.



Figura N° 13: Controlador de Temperatura Digital serie TE4-RB10W TOKY.

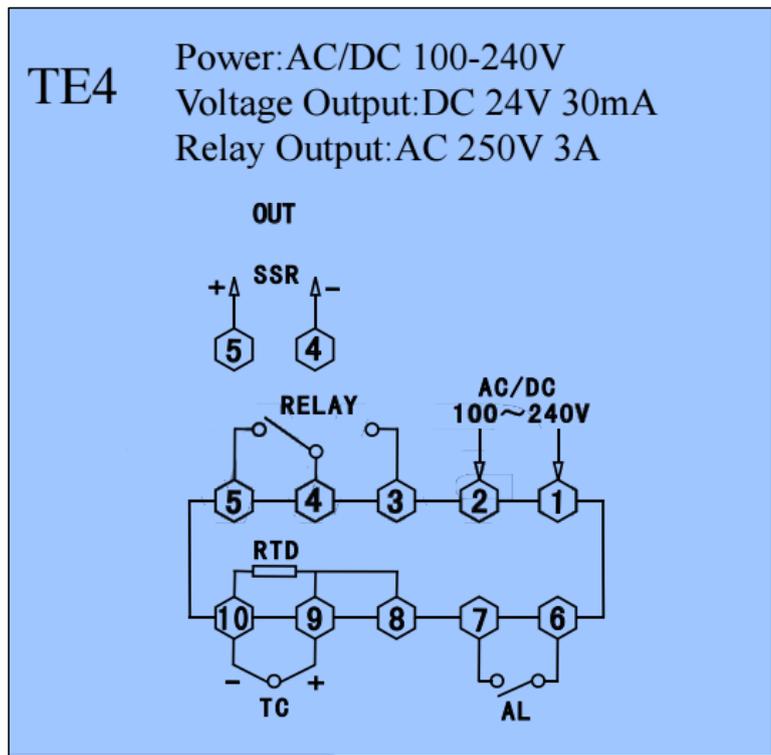


Figura N° 14: Diagrama del controlador de temperatura TE4-RB10W TOKY

Cuyas características principales son:

- Display: Rojo (valor de proceso) y verde (valor de ajuste)
- Indicación máxima hasta 9999°C, con 4 dígitos.
- Teclado de membrana (Keypad IP65)
- Tipo de entrada universal: RTDs (Pt100, Cu50, Cu100).
- Salidas: Relé SPDT 5A (250 VAC).
- Control: On/Off, PID, autosintonía.
- Modo de control: calentamiento
- Alimentación autorregulada de 85~260 VAC
- Precisión: 0.5% escala máxima, conversión analógica digital.

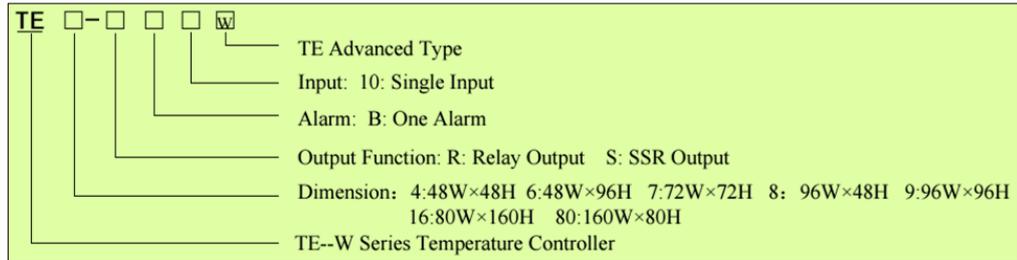


Figura N° 15: Descripción de nomenclatura del controlador de temperatura TE4-RB10W TOKY

B. Sensor de temperatura

El sensor de temperatura utilizado es la termocupla Pt100, ya que desde el punto de vista interface de conexión se acopla correctamente al controlador PID.

El sensor Pt100 es un sensor de temperatura. Consiste en un alambre de platino que a 0 °C tiene 100 ohms y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. El incremento de la resistencia no es lineal pero si creciente y característico del platino de tal forma que mediante tablas es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde.

C. Relé de Estado Solido

Un relé de estado sólido, es un dispositivo interruptor electrónico que conmuta el paso de la electricidad cuando una pequeña corriente es aplicada en sus terminales de control.

Los SSR consisten en un sensor que responde a una entrada apropiada (señal de control), un interruptor electrónico de estado sólido

que conmuta el circuito de carga, y un mecanismo de acoplamiento a partir de la señal de control que activa este interruptor sin partes mecánicas.

El relé puede estar diseñado para conmutar corriente alterna o continua. Los relés de estado sólido utilizan semiconductores de potencia como tiristores y transistores para conmutar corrientes hasta más de 100 amperios. Otras características a resaltar son: Voltaje de salida: 24 a 380 VAC, Corriente de salida: 40^a, Tensión de entrada: 3 - 32 VDC y Método de control: CC a CA

Los relés SSR pueden conmutar a muy altas velocidades (del orden de milisegundos) en comparación a los electromecánicos, y no tienen contactos mecánicos que se desgasten. Para este proyecto se hará uso del dispositivo relé en estado sólido *FOTEK SSR-40DA* con capacidad de 40A.



Figura N° 16: Relé en estado sólido *FOTEK SSR-40DA*

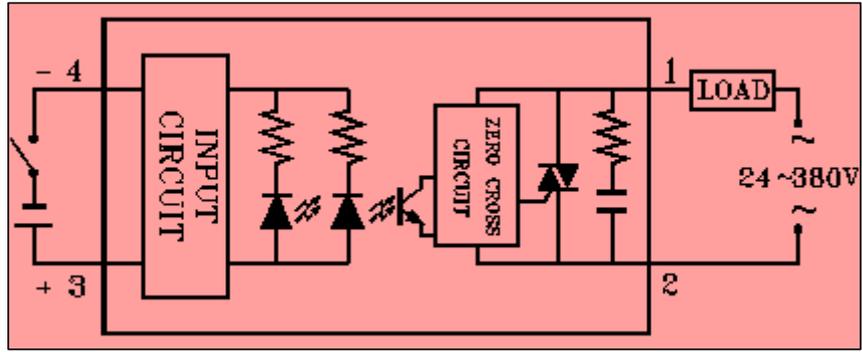


Figura N° 17: Diagrama de conexión del relé en estado sólido *FOTEK SSR-40DA*

A continuación se muestra el esquema del sistema de control de temperatura, mediante un controlador proporcional integrador y derivativo.

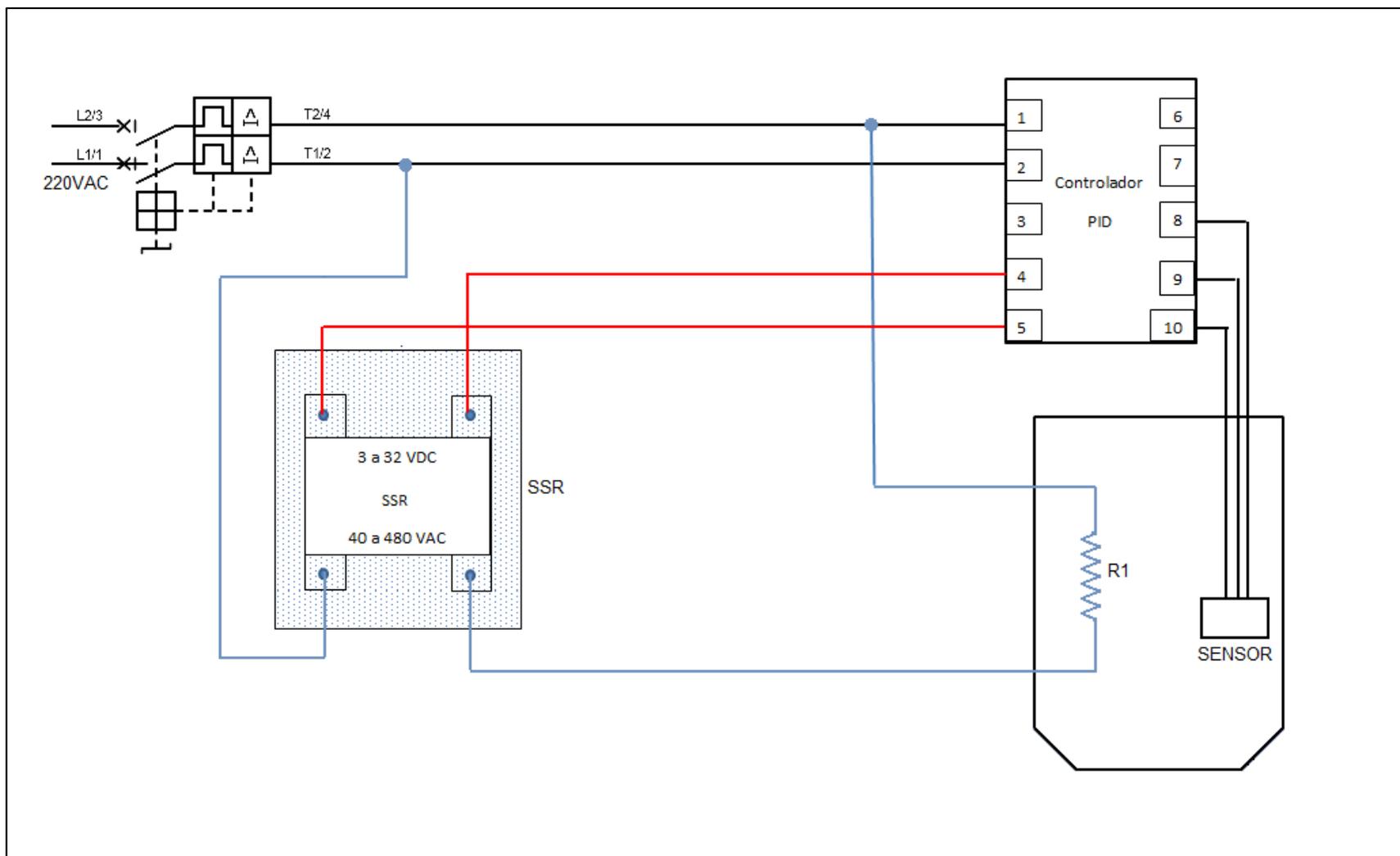


Figura N °18: Esquema del sistema de control de temperatura PID

3.3 REVISIÓN Y CONSOLIDACION DE RESULTADOS

Utilizando el sistema de control de temperatura implementado mediante controlador PID sobre el proceso de elaboración de pintura, se obtuvieron los siguientes resultados, prueba de diversos ensayos realizados sobre el proceso en funcionamiento:

ENSAYO SOBRE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA UTILIZANDO CONTROLADOR PID				
Número Medición	Instante de tiempo (Segundos)	Valor actual de la temperatura (°C)	Set Point (°C)	Error (°C)
0	0	0	40	40
1	10	10	40	30
2	20	17	40	23
3	30	25	40	15
4	40	32	40	8
5	50	37	40	3
6	60	39.9	40	0.1
7	150	40	40	0
8	300	40	40	0
9	450	40	40	0
10	600	40	40	0
11	750	40	40	0
12	900	40	40	0

TABLA N° 01: Datos obtenidos utilizando el controlador PID

De la tabla anterior se observa que, utilizando el controlador de temperatura proporcional integrador y derivativo, autosintonizable, se logra obtener una precisión de casi 100%, con error de 0 °C (cero grados Celsius), para un instante de tiempo de 60 segundos. Evidenciando que el controlador PID actúa de forma inmediata al detectar que la variable a controlar, en este caso la temperatura, esté fuera del valor de consigna pre establecido (set point igual a 40°C).

La siguiente figura muestra la precisión alcanzada por la variable a controlar en relación al valor de temperatura definido como valor óptimo para el proceso.

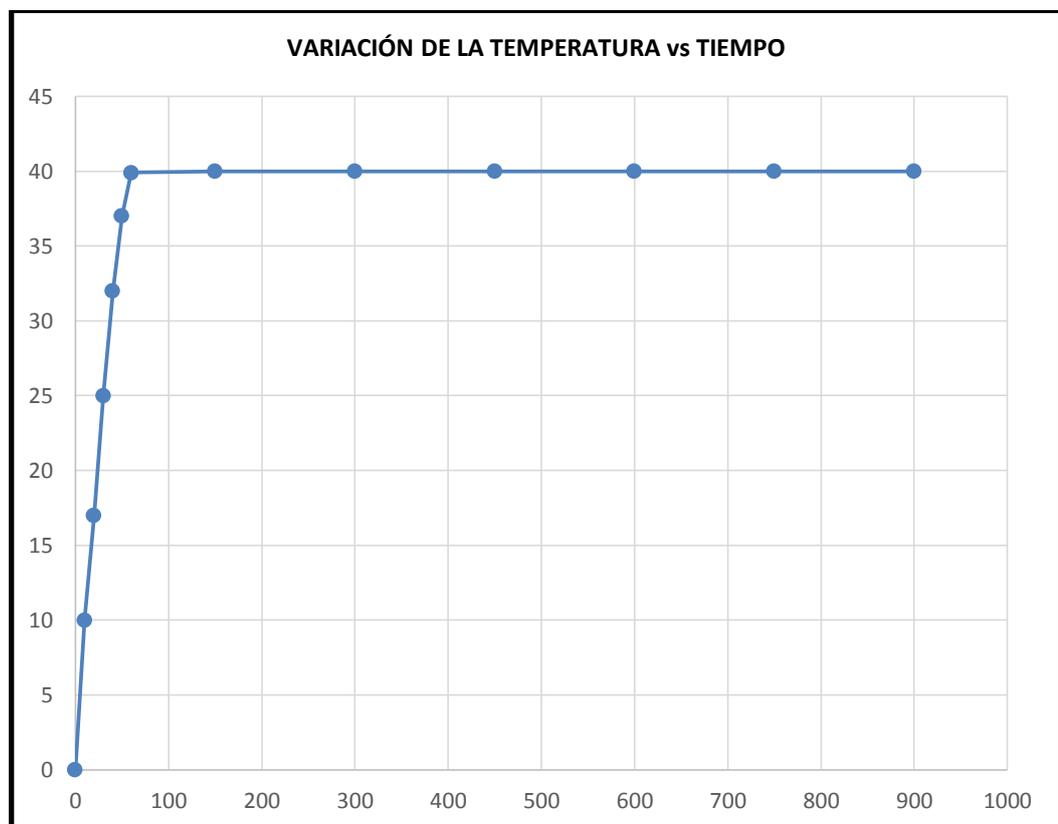


Figura N° 19: Curva del comportamiento de la variable controlada.

Cabe señalar que antes del proceso de desarrollo del sistema de control de temperatura mediante controlador PID, se procedió a registrar el comportamiento que presenta la temperatura, debido al proceso casi manual de fabricación de pintura.

ENSAYO SOBRE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA SIN UTILIZAR EL CONTROLADOR PID				
Número Medición	Instante de tiempo (Segundos)	Valor actual de la temperatura (°C)	Set Point (°C)	Error (°C)
0	0	0	40	40
1	10	5	40	35
2	20	12	40	28
3	30	18	40	22
4	40	25	40	15
5	50	32	40	8
6	60	35	40	5
7	150	47	40	-7
8	300	38	40	2
9	450	37	40	3
10	600	39	40	1
11	750	43	40	-3
12	900	44	40	-4

TABLA N° 02: Datos obtenidos sin utilizar el controlador PID

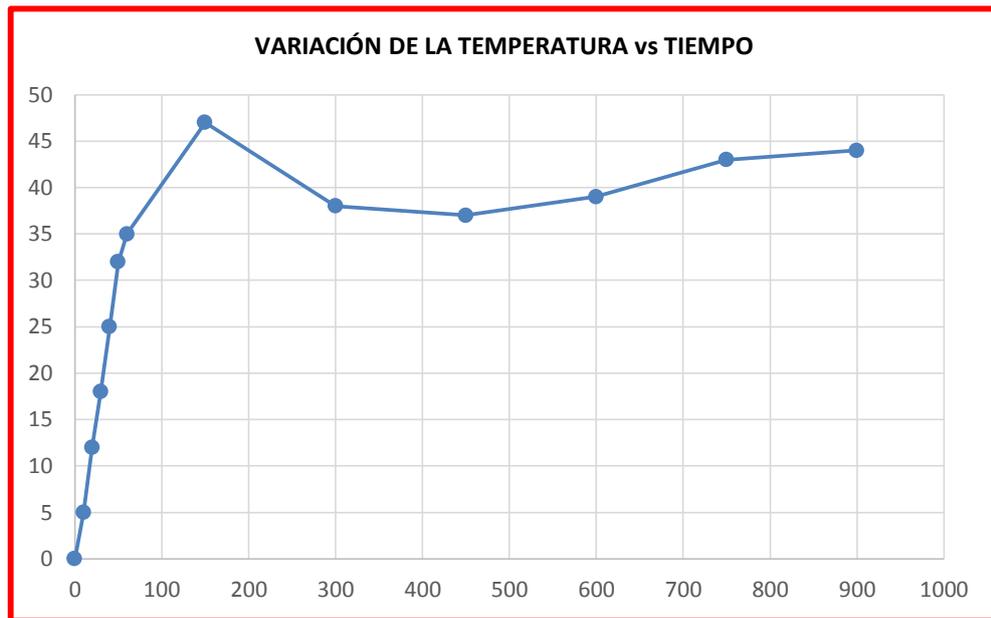


Figura N° 20: Curva de comportamiento de la variable controlada.

En este caso se deduce de la curva que la temperatura luego de 60 segundos oscila entre 35 °C y 47 °C, generando un error de casi por defecto de 5°C y por exceso de 7°C.

En relación al objetivo general planteado en el capítulo 1, se puede verificar que efectivamente se logra mejorar la precisión de la temperatura en el proceso de fabricación de pintura.

Es importante señalar que esta precisión se alcanza luego de un tiempo de 60s segundos de iniciado la etapa de calentamiento y activación automática del controlador PID.

CONCLUSIONES

- Se concluye que mediante el sistema de control proporcional, integrador y derivativo, se mejora la precisión de temperatura, alcanzado el valor de temperatura exactamente igual a la deseada en el proceso, con una precisión de casi el 100%, en un tiempo de 60 segundos.
- Se concluye que los elementos que permitieron detectar la variación de temperatura y modificarla, son el PT100 de 3 hilos, y el relé de estado sólido, con capacidad de accionamiento de corriente de 3 a 32 VDC a 40 a 480 VAC, respectivamente.
- Se concluye el tiempo de respuesta haciendo uso del sistema de control proporcional, integrador y derivativo, en el proceso de elaboración de pintura es de 60 segundos, tiempo tomado para alcanzar la temperatura de consigna y llevar al sistema a un estado estable.

RECOMENDACIONES

- En relación a la mejora de la precisión en alcanzar la temperatura deseada se recomienda utilizar un controlador lógico programable con capacidad de programación de la función PID, de tal forma que los mecanismos de autorregulación no se encuentren por separado, si no todo este integrado bajo un solo controlador.
- En relación a los elementos de que permiten detectar la variación de temperatura y modificarla, se recomienda utilizar sensores de mejor resolución, así como un disipador para el relé de estado sólido.
- Finalmente se recomienda hacer uso de un sistema de interface HMI a fin de que los operarios que tienen poco o casi nada de conocimientos sobre controladores PID, tengan una mejor accesibilidad al monitoreo y control del proceso de fabricación de temperatura.

BIBLIOGRAFÍA

1. Control automático de procesos industriales: Con prácticas de simulación y análisis por ordenador PC, Roca Alfredo, Editorial Díaz de Santos, 2014.
2. Capítulo I, Acciones de control, Recuperado de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/nunez_e_f/capitulo1.pdf
3. Angulo Bahon Cecilio; Raya Giner Cristóbal. Tecnología de sistemas de control. Ediciones UPC, Barcelona.

4. MAVAINSA control de procesos, Recuperado de
https://pastranamoreno.files.wordpress.com/2011/03/control_procesos-valvulas.pdf

5. Enríquez, G. 2000. El abc de la instrumentación en el control de procesos industriales. Editorial Limusa.

6. Capítulo 2: Sistemas de control, Recuperado de
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf?sequence=5>

7. Josep Balcells y Jose Luis Romeral. Libro “Autómatas Programables”. Editorial MARCOMBO, España, 1997.

8. Abarca Patricio, Sistemas de control automático, el abc de la automatización, recuperado de <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/sistemas-de-control-automatico.pdf>
9. Castiñeira Nestor Horacio, Tecnología-tecnica, recuperado de http://www.tecnologia-tecnica.com.ar/sistemadecontrol/index%20sistemasdecontrol_archivos/Pag e268.htm
10. Ing. Mario Alberto Perez. Ing. Analía Perez Hidalgo. Bioing. Elisa Perez Berenguer, Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo, recuperado de <http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>
11. Castiñeira Nestor Horacio, Tecnología-tecnica, recuperado de http://www.tecnologia-tecnica.com.ar/sistemadecontrol/index%20sistemasdecontrol_archivos/Pag e268.htm
12. Duran Jose Luis; Martínez Herminio; Gamiz Juan; Domingo Joan; Grau Antoni, Automatismos eléctricos e industriales, Editorial MARCOMBO, 2012, Barcelona.

13. Picuino, Programación con arduino, control automático, Recuperado de <http://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html>
14. Mazzone Virginia, Controladores PID, recuperado de <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>
15. Ingeniería Revista de la Universidad de Costa Rica, Alfaro Ruíz Víctor M, enero/diciembre 2013.
16. Duran José Luis; Martínez Herminio; Gamiz Juan; Domingo Joan; Grau Antoni, Automatismos eléctricos e industriales, Editorial MARCOMBO, 2012, Barcelona.
17. Leonel G. Corona Ramírez; Griselda S. Abarca Jiménez; Jesús Mares Carreño, Sensores y actuadores aplicaciones con Arduino, Azcapotzalco México D.F. Grupo editorial PATRIA SA de CV, 2014.
18. Amadori Aldo, El abc de la automatización algoritmo de control PID, Recuperado de <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/algoritmo-de-contro-pid.pdf>
19. Jiménez Escamilla Issac Salomón, Tesis: “Control de temperatura de un horno eléctrico mediante lógica difusa”, Universidad tecnológica de la mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, 2012

20. Benitez Mejia Diego Santiago, Tesis: Diseño y construcción de un sistema de control de nivel de líquido, escuela politécnica nacional de Mexico, 1994.
21. Avila Herrera Fernando; Carbajal Bernal Jorge Isaac; Mares Olivares Josue, Tesis: Control de velocidad y dirección de un robot de carreras autónomo, instituto politécnico nacional de mexico, 2011.
22. Parra Quispe Anibal Arturo, Tesis: Diseño e implementación de controladores PID industriales, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Peru, 2007.
23. Mario Alberto Perez.; Analía Perez Hidalgo; Elisa Perez Berenguer, Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo, recuperado de <http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>
24. Arbildo López Aurelio, El control de procesos industriales y su influencia en el mantenimiento, recuperado de [http://fresno.ulima.edu.pe/sf/sf_bdfde.nsf/OtrosWeb/Ing29Control/\\$file/02-ingenieria-produccion-ARBILDO.pdf](http://fresno.ulima.edu.pe/sf/sf_bdfde.nsf/OtrosWeb/Ing29Control/$file/02-ingenieria-produccion-ARBILDO.pdf)
25. Procesos Bio, Control de procesos industriales, recuperado de: <https://procesosbio.wikispaces.com/Control+de+procesos+industriales>

ANEXOS

Resistencia de inmersión para mezclas de pintura
Modelos NA. Resistencias monofásicas con 1 varilla forma 'U'

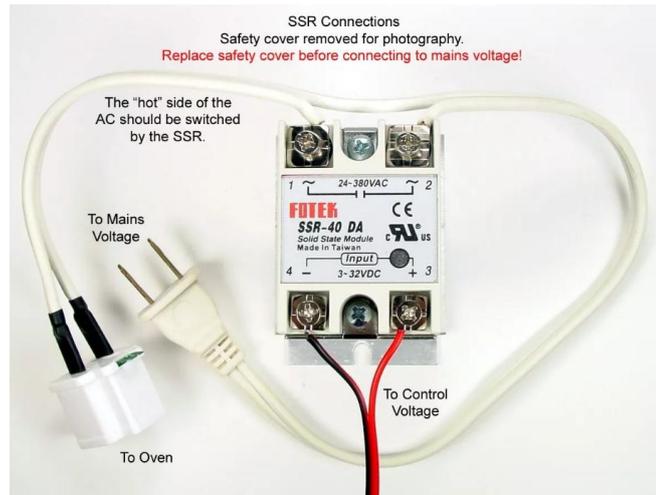


Características generales

- + Elementos tubulares en Cobre niquelado o acero inoxidable AISI 321 de Ø8 mm
- + Cabezales roscados de latón estampado.
- + Caperuzas de protección de poliamida auto extingible o de acero cromado trivalente, con grado de protección contra la humedad IP-40.
- + Opcionalmente, todos los modelos con tapón roscado de 1"1/4 pueden suministrarse con caja de conexiones de aluminio IP-66.
- + Soldadas con aleación de plata para tubo inox y con aleación de cobre para tubo de cobre.
- + Tensión normalizada ~230 V – Potencia de 830Watts.
- + Bajo pedido pueden fabricarse resistencias a medida según sus especificaciones:
- + Elementos tubulares en: AISI 316L, Incoloy ®-800 e Incoloy®-825 y Titanio
- + Cabezales en acero inoxidable o Titanio.

SENSOR DE TEMPERATURA

Pt 100 ohms										
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-190	22.78	22.35	21.93	21.50	21.08	20.66	20.23	19.81	19.38	18.96
-180	27.01	26.59	26.17	25.74	25.32	24.90	24.47	24.05	23.63	23.20
-170	31.24	30.81	30.39	29.97	29.55	29.13	28.70	28.28	27.86	27.44
-160	35.45	35.03	34.61	34.19	33.77	33.34	32.92	32.50	32.08	31.66
-150	39.65	39.23	38.81	38.39	37.97	37.55	37.13	36.71	36.29	35.87
-140	43.78	43.37	42.96	42.54	42.13	41.72	41.30	40.89	40.48	40.06
-130	47.90	47.49	47.08	46.67	46.26	45.85	45.43	45.02	44.61	44.20
-120	52.01	51.60	51.19	50.78	50.37	49.96	49.55	49.14	48.73	48.32
-110	56.11	55.70	55.29	54.88	54.48	54.07	53.66	53.25	52.84	52.43
-100	60.20	59.79	59.38	58.98	58.57	58.16	57.75	57.34	56.93	56.52
-90	64.23	63.83	63.43	63.02	62.62	62.22	61.81	61.41	61.01	60.60
-80	68.25	67.85	67.45	67.05	66.65	66.25	65.84	65.44	65.04	64.64
-70	72.26	71.86	71.46	71.06	70.66	70.26	69.86	69.46	69.06	68.66
-60	76.26	75.86	75.46	75.06	74.67	74.27	73.87	73.47	73.07	72.67
-50	80.25	79.85	79.45	79.06	78.66	78.26	77.86	77.46	77.06	76.66
-40	84.22	83.83	83.43	83.03	82.64	82.24	81.84	81.44	81.05	80.65
-30	88.18	87.79	87.39	87.00	86.60	86.21	85.81	85.41	85.02	84.62
-20	92.13	91.74	91.35	90.95	90.56	90.16	89.77	89.37	88.98	88.58
-10	96.07	95.68	95.29	94.89	94.50	94.11	93.71	93.32	92.92	92.53
0	100.00	99.61	99.22	98.82	98.43	98.04	97.65	97.25	96.86	96.47
0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.41
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.74	110.12	110.51	110.90	111.29
30	111.67	112.06	112.45	112.84	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.16
40	115.54	115.93	116.32	116.70	117.09	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01
50	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.48	122.86
60	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69
70	127.07	127.46	127.84	128.22	128.60	128.99	129.37	129.75	130.13	130.51
80	130.89	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.56	133.94	134.32
90	134.70	135.08	135.46	135.84	136.22	136.60	136.98	137.36	137.74	138.12
100	138.50	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.77	141.15	141.53	141.91
110	142.29	142.67	143.04	143.42	143.80	144.18	144.55	144.93	145.31	145.69
120	146.06	146.44	146.82	147.19	147.57	147.95	148.32	148.70	149.07	149.45
130	149.83	150.20	150.58	150.95	151.33	151.70	152.08	152.45	152.83	153.20
140	153.58	153.95	154.33	154.70	155.08	155.45	155.83	156.20	156.57	156.95
150	157.32	157.69	158.07	158.44	158.81	159.19	159.56	159.93	160.30	160.68
160	161.05	161.42	161.79	162.16	162.53	162.91	163.28	163.65	164.02	164.39
170	164.76	165.13	165.50	165.88	166.25	166.62	166.99	167.36	167.73	168.10
180	168.47	168.84	169.21	169.58	169.95	170.31	170.68	171.05	171.42	171.79
190	172.16	172.53	172.90	173.26	173.63	174.00	174.37	174.74	175.10	175.47
200	175.84	176.21	176.58	176.94	177.31	177.68	178.04	178.41	178.78	179.14
210	179.51	179.88	180.24	180.61	180.98	181.34	181.71	182.07	182.44	182.81
220	183.17	183.54	183.90	184.27	184.63	185.00	185.36	185.73	186.09	186.45
230	186.82	187.18	187.55	187.91	188.27	188.64	189.00	189.37	189.73	190.09
240	190.46	190.82	191.18	191.54	191.91	192.27	192.63	192.99	193.36	193.72
250	194.08	194.44	194.80	195.17	195.53	195.89	196.25	196.61	196.97	197.33
260	197.69	198.05	198.41	198.77	199.14	199.50	199.86	200.22	200.58	200.94
270	201.29	201.65	202.01	202.37	202.73	203.09	203.45	203.81	204.17	204.53
280	204.88	205.24	205.60	205.96	206.32	206.68	207.03	207.39	207.75	208.11
290	208.46	208.82	209.18	209.53	209.89	210.25	210.60	210.96	211.32	211.67
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9



mercado libre

También puede interesarte: bordadora, maquina coser industrial, maquina remalladora industrial, prensa excéntrica

Volver al listado | Industrias y Oficinas > Agropecuaria

Compartir | Vender uno igual

Safety cover removed for photography.
 Replace safety cover before connecting to mains voltage!

The "hot" side of the

Nuevo - 1 vendido

Rele Fotek Estado Solido Ssr40a-220vac

Tipo: industrial

S/. 28

12 cuotas de S/. 2³³

Más Información

Entrega a acordar con el vendedor

Lima

Consultar costos

Cantidad:

1

Comprar

Compra 100% protegida por el Programa de Protección al Comprador.

- ★ High Reliability by S.M.T. & TQC. (Surface Mounting Technology)
- ★ High Isolation over than 50MΩ / 500VDC
- ★ High Dielectric over than 2.5KV
- ★ Low Enable Current less than 7.5mA / 12VDC
CMOS IC or TTL Compatible.
- ★ Low EMI / EFI & Surge by Zero Cross Trigger Method.
- ★ High Surge Current Duration Over 10 Times of Rated Current / One Cycle
- ★ High Surge Voltage Duration by Snubber Circuit.
- ★ 表面貼焊技術及全面品質，提供最可靠的 SSR
- ★ 高絕緣阻抗超過 50MΩ / 500VDC
- ★ 高耐壓超過 2.5KV
- ★ 低觸發電流小於 7.5mA / 12VDC，可與 CMOS IC 及 TTL 匹配
- ★ 零點觸發方式避免電磁 / 高頻干擾
- ★ 高耐過電流，超過 10 倍額定電流 / 一週期
- ★ 具精密電路可吸收瞬間突波



Guiding of Model

Terminal Type

Ex. **SSR-40DAH**

① ② ③ ④ ⑤

- ① **Product 產品別**
SSR: SINGLE PHASE SOLID STATE RELAY
單相固態繼電器
STR: THREE PHASE SOLID STATE RELAY
三相固態繼電器
- ② **Output Current 輸出電流**
10 : 10A 25 : 25A
40 : 40A 50 : 50A
75 : 75A
- ③ **Input Voltage 輸入方式**
D: DC 3W ~ 32V <ON/OFF>
A: AC 80 ~ 250V <ON/OFF>
L: 4 ~ 20mA (linear)
V: VARIABLE RESISTER
- ④ **Output Voltage 輸出電壓**
A: AC VOLTAGE
D: DC VOLTAGE
- ⑤ **Output Voltage Range 輸出電壓範圍**
H : High Voltage Type < 90 ~ 480VAC >
Non: Standard Type < 24 ~ 380VAC >

PCB Type

Ex. **SSR-P03DA**

① ② ③ ④ ⑤

- ① **Product 產品別**
SSR : SINGLE PHASE SOLID STATE
- ② **Mounting Method 固定方式**
PCB: PCB TYPE
- ③ **Output Current 輸出電流**
03 = 3A
05 = 5A
- ④ **Input Method 輸入方式**
D : DC VOLTAGE
- ⑤ **Output Voltage 輸出電壓**
D : DC 5 ~ 60V
A : AC 24 ~ 280V

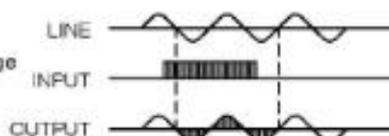
Control Method

Zero Cross Trigger Method

Output TURN ON or TURN OFF only on Zero Cross Point of sine wave, may avoid surge or EMI / RFI occurring.

Specially suited to control resistive, capacitive and Non - saturated inductive loads.

輸出只在正弦波的零點才會動作或復歸，可避免產生突波或 EM / RFI，特別適於控制阻感性、電容性和不飽和感性等負載。

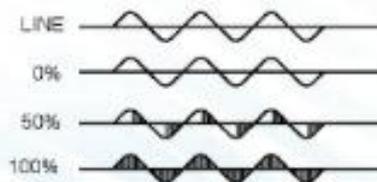


Variable Resistance Control Method

< Trimmer Control Method >

Power Output is Controlled by the Trigger Angle of Triac with Variable Resistor 250K Ω /110VAC, 500K Ω /220VAC

輸出功率以可變電阻 250K Ω /110VAC, 500K Ω /220VAC 控制 Triac 觸發角決定輸出功率。



Application Hints

Input	NPN	Output	NO	Input	PNP	Output	NO	Input	L.S.	Output	NO
Input	NPN	Output	NC	Input	PNP	Output	NC	Latch Circuit (AC to AC)			

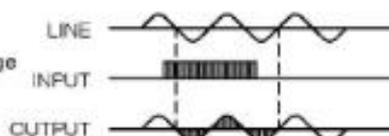
Control Method

Zero Cross Trigger Method

Output TURN ON or TURN OFF only on Zero Cross Point of sine wave, may avoid surge or EMI / RFI occurring.

Specially suited to control resistive, capacitive and Non - saturated inductive loads.

輸出只在正弦波的零點才會動作或復歸，可避免產生突波或 EM / RFI，特別適於控制阻抗性、電容性和不飽和感性等負載。

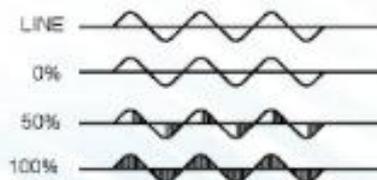


Variable Resistance Control Method

< Trimmer Control Method >

Power Output is Controlled by the Trigger Angle of Triac with Variable Resistor 250K Ω /110VAC, 500K Ω /220VAC

輸出功率以可變電阻 250K Ω /110VAC, 500K Ω /220VAC 控制 Triac 觸發角決定輸出功率。



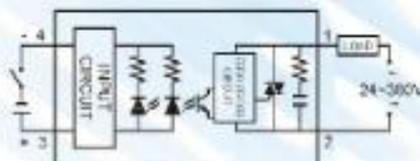
Application Hints

Input	NPN	Output	NO	Input	PNP	Output	NO	Input	L.S.	Output	NO
Input	NPN	Output	NC	Input	PNP	Output	NC	Latch Circuit (AC to AC)			

■ Specification

Type	Terminal Type					PCB Type
Model	SSR-10DA	SSR-25DA	SSR-40DA	SSR-25DA-H	SSR-40DA-H	SSR-P03DA
Rated Load Current	10A	25A	40A	25A	40A	3A
Input Data						
Operating Voltage	3~32VDC					
Min. ON / OFF Voltage	ON > 2.4V , OFF < 1.0V					
Trigger Current	7.5mA / 12V					
Control Method	Zero Cross Trigger					
Output Data						
Operating Voltage	24~380VAC		90~480VAC		24~380VAC	
Min. Block Voltage	600 VAC < Repetive >					
Voltage Drop	1.6 V / 25 C					
Max. Durted Current	135A	275A	410A	275A	410A	135A
Leakage Current	3.0mA	3.0mA	3.0mA	5.0mA	5.0mA	3.0mA
Response Time	ON < 10ms , OFF < 10ms					
General Data						
Dielectric Strength	Over 2.5KVAC / 1min.					
Isolation Strength	Over 50M Ω / 500VDC					
Operating Temperature	-20 C ~+60 C					
Housing Material	Intensive ABS					
Weight	Appr. 105g					Appr. 15g

Connection Diagram



FOTEK SSR SERIES HIGH CURRENT DC TO AC SOLID STATE RELAY

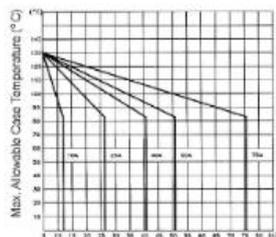
Specification

Type	Terminal Type			
Model	SSR-50DA	SSR-75DA	SSR-50DA-H	SSR-75DA-H
Rated Load Current	50A	75A	50A	75A
Input Data				
Operating Voltage	3~32VDC			
Min. ON / OFF Voltage	ON > 2.4V , OFF < 1.0V			
Trigger Current	7.5mA / 12V			
Control Method	Zero Cross Trigger			
Operating Data				
Operating Voltage	24~380VAC	90~480VAC		
Min. Blocking Voltage	600 VAC <Repetitive>			
Voltage Drop	1.6V / 25°C			
Max. Duration Current	550A	820A	550A	820A
Leakage Current Max.	6.0mA	6.0mA	6.0mA	6.0mA
Response Time	ON < 10ms , OFF < 10ms			
General Data				
Dielectric Strength	Over 2.5KVAC/1min.			
Isolation Strength	Over 50M Ω / 500VDC			
Operating Temperature	-20°C ~ +80°C			
Housing Material	Intensive ABS			
Weight	Appr. 125g			
Connection Diagram/Dimension				

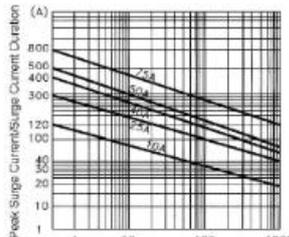
■ Curve of Characteristic

Max. Allowable Case Temperature
最高容許表面溫度

Peak Surge Current/Surge Current Duration
衝擊電流/承受次數

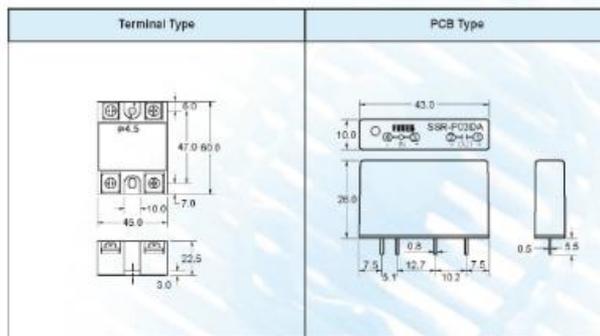


ON State Current (A) 動作電流



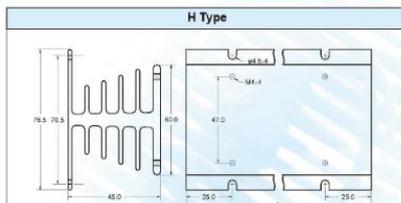
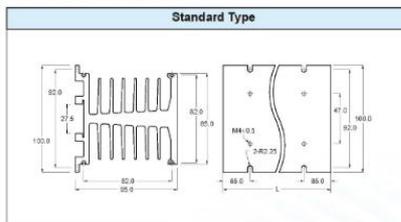
Surge Current Duration (Full cycles)

■ Dimension



17

■ Dimension < Heat Sink >



MODEL	LENGTH(L)mm	CURRENT DURATION	PCS OF SSR
HS-50H	50.0	10A MAX.	SIGLE
HS-100H	100.0	25A MAX.	TWICE
HS-150H	150.0	40A MAX.	THREE
HS-200H	200.0		FOUR

18