

**UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**“CONTROL PID APLICADO A UN SISTEMA DE TANQUES EN CASCADA,  
COMO ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN PARA EL CONTROL DE NIVEL DE  
LLENADO, EN UNA EMPRESA DE TINTES”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

Para optar el Título Profesional de

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER**

**RIVERA MONTOYA, MIKY YACKSON**

**Villa El Salvador  
2017**

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a todas aquellas personas que formaron parte de mi vida universitaria y que han hecho posible que pueda desarrollarme y culminar con éxito mis estudios profesionales.

## **AGRADECIMIENTO**

A los profesores de la Universidad Tecnológica de Lima Sur por sus aportes a nuestro conocimiento y crecimiento personal y a los compañeros con los cuales recorrimos este camino de aprendizaje.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	11
<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	
1.1. Descripción de la Realidad Problemática .....	14
1.2. Justificación del Problema .....	15
1.3. Delimitación del Proyecto .....	16
1.4. Formulación del Problema .....	16
1.5. Objetivos .....	17
1.5.1. Objetivo General .....	17
1.5.2. Objetivos Específicos .....	17
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 Antecedentes de la Investigación .....	18
2.2 Bases Teóricas .....	21
2.3 Marco Conceptual .....	69
<b>CAPÍTULO III: DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA</b>	
3.1 Diseño del Sistema de Control .....	75
3.2 Descripción del Sistema de control PID .....	77
3.3 Revisión y Consolidación de resultados .....	80
<b>CONCLUSIONES</b> .....	84
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	85
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	86
<b>ANEXOS</b> .....	89

## LISTADO DE FIGURAS

- Figura N° 01: Final de carrera.
- Figura N° 02: Sensores de temperatura.
- Figura N° 03: Fototransistores.
- Figura N° 04: Relé.
- Figura N° 05: Sistemas de control.
- Figura N° 06: Sistema de control de lazo abierto.
- Figura N° 07: Sistema de control de lazo cerrado.
- Figura N° 08: Control PID.
- Figura N° 09: Respuesta de la variable controlada A.
- Figura N° 10: Respuesta de la variable controlada B.
- Figura N° 11: Control PID de una planta.
- Figura N° 12: Sobreimpulso.
- Figura N° 13: Respuesta escalón unitario de una planta.
- Figura N° 14: Curva de respuesta en forma de S.
- Figura N° 15: Sistema de lazo cerrado con un Controlador Proporcional.
- Figura N° 16: Evolución de las señales de transmisión.
- Figura N°17: Transmisor Neumático.
- Figura N°18: Transmisor Electrónico.
- Figura N° 19: Trasmisor de Presión.
- Figura N° 20: Transmisor de Presión Rockwell Automation.
- Figura N° 21: Diagrama de Control por Realimentación.
- Figura N° 22: Diseño del sistema de control con PID.

Figura N° 23: Escalamiento entre el porcentaje de nivel de llenado y la salida en voltios de transmisor de presión.

Figura N° 24: Controlador PID.

Figura N° 25: Prototipo para el ensayo del control PID aplicado a un sistema de tanques en cascada para el control de nivel de llenado.

Figura N° 26: Generándose una perturbación en el Sistema de Control modificando el nivel de llenado pre establecido de 60%.

Figura N° 27: El Control PID muestra los niveles de valor deseado, valor medido, nivel máximo y porcentaje de error – 10%.

Figura N° 28: El Controlador PID detecta la variación y de inmediato envía una señal al actuador para conseguir reducir el error – 7%.

Figura N° 29: El Controlador PID busca que el proceso consiga estabilidad, es decir reduce el estado transitorio y aumenta el estado estacionario.

Figura N° 30: El Controlador PID busca que el proceso consiga estabilidad, es decir reduce el estado transitorio y aumenta el estado estacionario.

## LISTADO DE TABLAS

Tabla N° 01: Parámetros del Controlador PID por el método de la curva de reacción.

Tabla N° 02: Parámetros del Controlador PID por el método de oscilaciones sostenidas.

## 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 de temperatura, presión, caudal, porcentaje de llenado de algún tipo de fluido en tanques, etc, y al tener que mantener esta variable dentro de rangos pre establecidos, para garantizar la estabilidad del proceso industrial.

El control de nivel de tanques son procesos utilizados en aplicaciones industriales (subestaciones de almacenamiento y distribución del acueducto, procesos químicos, entre otros) y residenciales (llenado del tanque del sanitario, del tanque aéreo de almacenamiento, entre otros), los cuales son operados de forma manual o automática. En las grandes industrias o en los procesos donde se requiere precisión, el control y la automatización del proceso es la herramienta más eficiente a la hora de comparar los resultados.

En teoría se conoce que la forma rápida, eficiente e instantánea de hacer control a un proceso, es a través del control automático. En los procesos donde se requiere mantener constante el nivel de tanques, bien sea para asegurar mezclas perfectas, evitar daños en la etapa de succión de motobombas, evitar reboses de tanques, o simplemente asegurar flujos constantes a la salida del tanque, se recurre al monitoreo del nivel del tanque para controlar el flujo de entrada o de



salida al tanque, asegurando de esta forma, que el nivel permanezca siempre en un valor deseado.

En ese sentido en el presente proyecto de ingeniería describo un sistema de tanques en cascada, que utiliza controlador Universal PID como alternativa de solución para el control de nivel de llenado, para un segmento del proceso de calibración de tintes de la empresa Blue Chemicals, Motivo por el cual he dividido mi proyecto en 3 capítulos.

En el Capítulo I, describo el planteamiento del problema, que está basado en los diversos eventos en los cuales se produjo rebose de Tanque, generando pérdidas económicas a la empresa, siendo las causas principales el control manual existente y el deficiente uso tecnológico en lo que respecta control de nivel de llenado de un tanque abierto.

En el Capítulo II, describo el marco teórico en la cual se sustenta mi propuesta de solución, referente a los sistemas de control automático realimentado, aplicado a sistemas de tanques en cascada. Estas bases teóricas a la cual me refiero están relacionadas con los controladores PID y su relación con los sensores y actuadores.

Finalmente en el Capítulo III, desarrollo la propuesta de solución, realizando inicialmente un análisis de las características del Sistema de Control, para luego proponer el Diseño del Sistema de control PID y finalmente presento una revisión

y consolidación de resultados basados en la respuesta estacionaria y transitoria de la variable controlada.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1 DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA**

La empresa Blue Chemicals se dedica al procesamiento de insumos que permitan generar tintes, para luego utilizarlo en el área textil. En una de las etapas de producción de tinte se requiere trabajar con un tanque abierto de agua, cuyo control del nivel de altitud se realiza de forma manual, generándose en muchas ocasiones eventos relaciones al rebose del tanque, o tintes con características no deseadas, al no tener precisión en el control de nivel del fluido en el tanque.

Estas situaciones generan pérdidas económicas a la empresa, por utilizar los insumos de manera inadecuada y por una insatisfacción del cliente al no responder a sus expectativas deseadas con respecto al color específico solicitado.

En ese sentido puedo señalar que el problema principal es que actualmente en la empresa Blue Chemicals existe un insuficiente uso de la tecnología en lo que respecta al control de nivel de llenado de tanques abiertos, que permitan evitar reboses de tanques, asegurando de esta forma, que el nivel permanezca siempre en un valor deseado.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

En la actualidad los procesos industriales se pueden automatizar mediante la integración en un sistema de control, de sus elementos captadores de señal y sus actuadores. Esta integración libera al operario de una actuación física directa, continua y repetitiva en la planta o proceso y al mismo tiempo permite una supervisión y autorregulación del mismo en tiempo real, ante cualquier tipo de perturbación, por lo que garantiza obtener materia prima de calidad.

La tecnología se encuentra en constante cambios simplificando estructuras y mejorando procesos. Los sistemas de control y adquisición de datos, en la actualidad constituyen la herramienta más utilizada en las grandes industrias a nivel mundial, para llevar información en tiempo real del estado y funcionamiento de equipos y así optimizar las respuestas del sistema.

Por tal razón en este proyecto de ingeniería se realiza una propuesta de un Control PID aplicado a un sistema de tanques en cascada, como alternativa de solución para el control de nivel de llenado.

En ese sentido el proyecto se justifica en que eliminará situaciones que generan pérdidas económicas a la empresa tales como como el rebose de fluido en el tanque, y mejorará la calidad del producto (tinte) al utilizar los insumos de manera adecuada, generando una satisfacción del cliente.

### **1.3 DELIMITACIÓN DEL PROYECTO**

#### **1.3.1 ESPACIAL**

El proyecto se desarrollará en la empresa Blue Chemicals, que se ubica en la Av. Industrial 373, Urb. Industrial, Panamericana Norte, en el distrito de Independencia. El controlador PID solo se aplicara al tanque asociado al nivel de llenado de agua, ya que el proceso de para generar tintes también presentan otros sub procesos, que pueden ser materia de próximos estudios.

#### **1.3.2 TEMPORAL**

La investigación comprende el periodo de Octubre de 2016 a Enero de 2017.

### **1.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cómo controlar el nivel de llenado de un sistema de tanques en cascada mediante el Control PID, en una empresa de Tintes?

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 OBJETIVO GENERAL**

Controlar el nivel de llenado de un sistema de tanques en cascada mediante el Control PID, en una empresa de Tintes.

### **1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar si es posible y de qué manera se puede integrar los sensores y actuadores de un sistema de tanques en cascada, para controlar el nivel de llenado, en una empresa de Tintes.
- Comprobar si es posible y de qué manera el control de nivel de llenado de un sistema de tanques en cascada a través de un controlador PID.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

Moscoso (2014), en su tesis titulada “Automatización del sistema de alimentación de agua hacia calderas usando un control PID, con una alternativa en control FUZZY en el entorno grafico LABVIEW”, para optar el título de Ingeniero Mecánico y Eléctrico en la Universidad Católica de Santa María de Arequipa concluye que: “Se desarrolló un sistema de Control PID para el Sistema de Alimentación de Agua hacia Calderas de Agroindustrial del Perú. Se implementó en un PLC S7- 300 SIEMENS, programando bloques los cuales se explicaron físicamente mostrando un óptimo desempeño cumpliendo el objetivo de esta tesis, de controlar de forma automática el proceso, actualmente sigue trabajando de forma automática. Esto ayudo a facilitar el control de este proceso, evitando errores humanos que podían existir y manteniendo al sistema siempre trabajando de acuerdo

a la necesidad de la planta. Se cuenta con indicadores los cuales muestran al operario de sala calderas, el estado de cada bomba y la presión que se mantiene en la línea, manejando mejor los recursos”.<sup>1</sup>

Poma (2014), en su tesis titulada “Diseño e implementación de un sistema de control automático para una máquina texturizadora en la planta de fibras textiles ENKADOR”, para optar el título de Ingeniero Electrónico y Control en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, concluye que: “ Actualmente el mercado brinda diferentes opciones al momento de comprar un PLC, para realizar una adecuada elección es importante considerar el tipo y número de entradas y salidas que se requiere para la adquisición de datos y control del sistema, el protocolo e interfaz físico de comunicación que se utilizara, tipo de instalación y si se precisa de funciones especiales como: PID, contadores rápidos, etc. También hay que considerar la marca y el aspecto económico como un factor de selección”.<sup>2</sup>

Tejada (2016), en su tesis titulada “Diseño e implementación de prototipo de control de flujo y temperatura para sistema “HVAC” aplicando control multivariable cascada”, para optar el título de Ingeniero Mecánico y Eléctrico en la Universidad Católica de Santa María de Arequipa, concluye

---

<sup>1</sup> MOSCOSO, F. (2014). Automatización del sistema de alimentación de agua hacia calderas usando un control PID, con una alternativa en control FUZZY en el entorno grafico LABVIEW. (Tesis de Pre Grado). Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú.

<sup>2</sup> POMA, M. (2014). Diseño e implementación de un sistema de control automático para una máquina texturizadora en la planta de fibras textiles ENKADOR. (Tesis de Pre Grado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.



que: “El módulo de control de temperatura y flujo será calibrado todas sus partes y después puesto en funcionamiento la cual será considerado su diseño para un uso didáctico, demostrativo y la programación de la lógica de control y el tipo de comunicación estarán orientadas hacia el uso dentro de un ambiente industrial con equipos actuadores de más capacidad en kilowatts de mayor potencia y por medio de este prototipo sea de ayuda para mejor entendimiento del proceso”.<sup>3</sup>

Acedo (2003), en su libro titulado “Control avanzado de procesos”, señala que: “Cuando se conecta un controlador a un proceso, se crea un lazo cerrado de control con realimentación. Esta realimentación puede ser positiva o negativa y la diferencia es esencial para el comportamiento del lazo. Cada controlador dispone de un sistema para cambiar la acción de control, el cual define la dirección en la señal de salida del controlador en función de los cambios en la medida de la variable de proceso”.<sup>4</sup>

Angulo & Raya (2004), en su libro titulado “Tecnologías de sistemas de control”, señala que: “Pese al creciente desarrollo de nuevos algoritmos de control, más del 90% de los reguladores sobre procesos continuos que se hallan en funcionamiento en el mercado continúan utilizando una ley de control básica del tipo PID”.<sup>5</sup>

---

<sup>3</sup> TEJADA, J. (2016). Diseño e implementación de prototipo de control de flujo y temperatura para sistema “HVAC” aplicando control multivariable cascada. (Tesis de Pre Grado). Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú.

<sup>4</sup> ACEDO, J. (2003). Control Avanzado de Procesos. Madrid, España: CASTILLA DE SANTOS.

<sup>5</sup> ANGULO, C. (2004). Tecnologías de sistemas de control. Barcelona, España: POLITEXT

Mandado (2009), en su libro titulado “Autómatas Programables y Sistemas de Automatización”, señala que: “Los controladores PID se utilizan en el 95% de los sistemas de control continuo que existen en la industria [ASTR 06] [MORI 07] debido en gran parte a su simplicidad y a que es posible utilizar un procedimiento de prueba y error para seleccionar la proporción en la que se combinan las tres acciones P,I y D sin que el usuario tenga que tener un dominio profundo de la teoría de control. Debido a ello en muchas ocasiones el usuario no explota toda la capacidad de control de este tipo de controladores”.<sup>6</sup>

## **2.2. BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1 SISTEMAS DE CONTROL**

La ingeniería de control se basa en los fundamentos de la teoría de la realimentación y el análisis de sistemas lineales, e integrar los conceptos de las teorías de redes y de comunicación. Por lo tanto, la ingeniería de control no está limitada de la ingeniería, sino que es igualmente aplicable a las ingenierías aeronáuticas, química, mecánica, del medio ambiente, civil y eléctrica. Por ejemplo un sistema de control incluye a menudo componentes eléctricos, mecánicos y químicos. Además, al aumentar el conocimiento de la dinámica de los sistemas comerciales, sociales y políticos, también incrementa la capacidad de control de esos sistemas.




---

<sup>6</sup> MANDADO, E. (2009). Autómatas Programables y Sistemas de Automatización. Barcelona, España: MARCOMBO.

El objeto de todo proceso industrial será la obtención de un producto final, de unas características determinadas de forma que cumpla con las especificaciones y niveles de calidad exigidos por el mercado, cada día más restrictivos. Esta constancia en las propiedades del producto sólo será posible gracias a un control exhaustivo de las condiciones de operación, ya que tanto la alimentación al proceso como las condiciones del entorno son variables en el tiempo. La misión del sistema de control de proceso será 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.

El sistema de control nos permitirá una operación del proceso más fiable y sencilla, al encargarse de obtener unas condiciones de operación estables, y corregir toda desviación que se pudiera producir en ellas respecto a los valores de ajuste.

Las principales características que se deben buscar en un sistema de control serán:

-  Mantener el sistema estable, independiente de perturbaciones y desajustes.
-  Conseguir las condiciones de operación objetivo de forma rápida y continua.
-  Trabajar correctamente bajo un amplio abanico de condiciones operativas.

- ✚ Manejar las restricciones de equipo y proceso de forma precisa.

La implantación de un adecuado sistema de control de proceso, que se adapte a las necesidades de nuestro sistema, significará una sensible mejora de la operación. Principalmente los beneficios obtenidos serán:

- ✚ Incremento de la productividad.
- ✚ Mejora de los rendimientos.
- ✚ Mejora de la calidad.
- ✚ Ahorro energético.
- ✚ Control medioambiental.
- ✚ Seguridad operativa.
- ✚ Optimización de la operación del proceso/ utilización del equipo.
- ✚ Fácil acceso a los datos del proceso.

### **2.2.1.1 CARACTERISTICAS DEL PROCESO**

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.

## **2.2.1.2 COMPONENTES DE LA AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

### **A. SENSORES**

Para realizar las mediciones de magnitudes mecánicas, térmicas, eléctricas, físicas, químicas, etc, se emplean dispositivos comúnmente llamados sensores y/o transductores.

Son los componentes que forman el nivel más bajo de un sistema de automatización (nivel de entrada y salida), estos componentes también son llamados elementos captadores de señal. La información capturada en este nivel se procesa en los niveles superiores. Los sistemas de control trabajan con esta información y como consecuencia deben ser flexibles ante cualquier variación que se produzca.

Estos dispositivos se instalarán en el lugar apropiado para medir esa magnitud, estado, nivel, etc. y es necesario conocer su modo de operación para poder instalar, configurar o mantener sistemas que los incorporen.

Existen gran cantidad de sensores para medidas de todo tipo y por tanto, se pueden clasificar de muchas formas distintas:



Según el tipo de salida que proporcionan:


- Analógicos: Entregan una salida de nivel variable en función del parámetro que midan, por ejemplo, un sensor de temperatura de  $-20^{\circ}$  a  $+50^{\circ}$  con salida 0-10V.
- Binarios: Entregan un nivel 'todo' o 'nada' (1/0), por ejemplo el estado de una puerta (abierta/cerrada).
- Digitales: Dan la información relativa a la medida con un protocolo de comunicaciones específico que el fabricante facilita: por ejemplo el sensor de temperatura y humedad STH-11



Según su estructura interna, tipo de sensor:

- Pasivos: No precisan de alimentación: Resistencias que cambian de valor según luz o temperatura.

- Activos: Tienen circuitos electrónicos que alimentan y necesitan una fuente de energía.

 Según el tipo de parámetros que son capaces de detectar:

- Mecánicos: Detectan parámetros relacionados con acciones mecánicas, contactos, aceleración, etc.
- Ambientales: Medidas de temperatura, humedad, pluviometría, velocidad del viento, etc.

Ámbitos en que aplican

 Seguridad de personas y bienes

- Sensores de presencia (volumétricos, detectores de infrarrojos, detectores radar, barreras laser, etc.).
- Detectores de rotura de cristales (alertas de robo).
- Detectores de vibración / sísmicos (en banca para detectar 'butroneros').
- Pulsadores de 'socorro' en viviendas o en empresas.
- Detectores de humos / incendios.

- Detectores de inundación. (En aseos, sótanos, almacenes, etc.)
- Detectores de gas (Fugas butano, gas ciudad, niveles altos de CO<sub>2</sub>, CO – humo de vehículos, etc).



#### Sistemas de climatización

- Sensores de temperatura (exterior, interior, zona, aire expulsado, aire recuperado, enfriadoras, agua calderas, etc.) •
- Sensores de humedad (humedad exterior e interior para cálculo de calor latente / sensación de calor).
- Sensores de presión absoluta y diferencial (verificación de filtros, presiones de vapor, etc.) •
- Sensores de flujo de aire / agua (para monitorizar ventiladores en marcha, bombas, consumo de energía, etc.).



#### Relacionados con el clima

- Sensores de radiación solar.
- Velocidad y dirección del viento (anemómetro y veleta).



- Pluviometría y lluvia. (detectores de lluvia y de cantidad de lluvia).
- Presión atmosférica (para predicción del tiempo, barómetro).

## TIPOS

✚ SENSORES BINARIOS, TODO/NADA, '1'/'0', DE DOS ESTADOS DISCRETOS:

Nos dan información del tipo Si/No, 0/1, existen desde los más simples a sistemas más complicados, pero solo nos ofrecen dos estados discretos. Interruptores, pulsadores, microrruptores, sensores finales de carrera, etc.



FIGURA N° 01: FINAL DE CARRERA

Son sistemas mecánicos simples en los que se abren o cierran dos contactos y al hacerlo

establecen dos niveles eléctricos diferentes del tipo todo/nada.

#### SENDORES DE TEMPERATURA:

Son muy usados en multitud de sistemas. Los hay de diferentes tipos, rangos de medida, forma física, etc. Vamos a ver algunos de ellos aunque hay infinidad de tipos.

Los sensores no se suelen presentar tal y como los hemos visto en las imágenes anteriores, sino que se adaptan a las necesidades físicas de las magnitudes a medir: tubos de aireación, depósitos de agua, motores, hornos, etc.

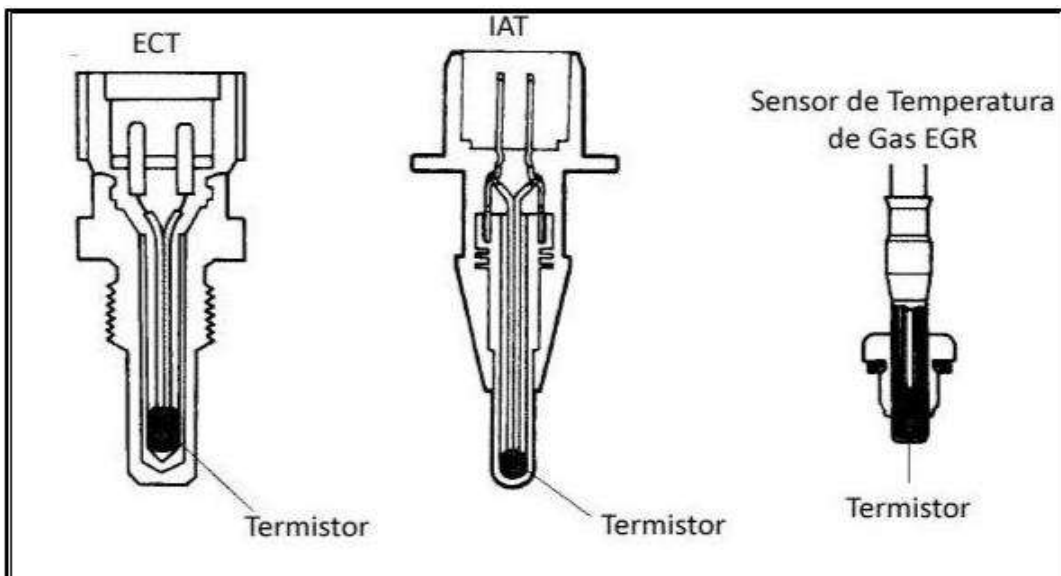


FIGURA N° 02: SENSORES DE TEMPERATURA

## ☚ SENSORES DE NIVEL DE LUZ

Suelen estar relacionados con sistemas de control de iluminación, para detectar si es necesario activarlos. La mayoría de ellos se basan en dos tipos de tecnologías:

- Resistencias variables en función del nivel de luz (LDR).
- Dispositivos semiconductores a los que afecta la luz (fotodiodos, fototransistores, CCD, etc).



FIGURA N° 03: FOTOTRANSISTORES

## ☚ SENSORES DE HUMEDAD

Suelen estar relacionados con sistemas de control de aire acondicionado, información climática (humedad de aire) y control agrícola (humedad del suelo). También los hay para medir humedad en madera y otros materiales.

Existen multitud de sensores, los de humedad del suelo se basan sobre todo en la conductividad del terreno y los de humedad del aire en sistemas capacitivos o semiconductores con electrónica asociada.

#### **SENSORES DE PRESIÓN (AIRE Y LÍQUIDOS)**

Suelen estar relacionados con sistemas de control de aire acondicionado y calefacción, información climática, sistemas de bombeo, aeronáutica, laboratorios, mecánica, etc. Muchos se basan en la deformación de cápsulas presurizadas miniatura, existen también medidores de 'presión diferencial', que miden la diferencia de presión entre dos zonas.

#### **SENSORES PARA DOMÓTICA E INMÓTICA**

Usados para aplicaciones específicas, podemos destacar los siguientes sistemas de detección:

- Detectores de presencia: Usados para gestión de energía y para sistemas de seguridad.

- De infrarrojos, microondas, mixtos, por cambio de imagen, laser, etc.

Usados para aplicaciones específicas, podemos destacar los siguientes sistemas de detección:

- Otros detectores de intrusión: Usados para gestión de energía y para sistemas de seguridad.
- Apertura de puertas, persianas, ventanas, rotura de cristales, vibración, pisadas en suelo, etc.

Usados para aplicaciones específicas, podemos destacar los siguientes sistemas de detección:

- Detectores de humos / incendios: Seguridad en hogar y edificios inteligentes.

Usados para aplicaciones específicas, podemos destacar los siguientes sistemas de detección:

- Detectores gases tóxicos, peligrosos y contaminación: Seguridad en hogar y edificios inteligentes.

## **B. ACTUADORES**

Reciben la señal del controlador y actúan sobre el elemento final de control, de acuerdo a la señal recibida.

Los actuadores se pueden clasificar según el tipo de energía empleada en el accionamiento.

Un porcentaje muy elevado de actuadores solo tienen dos estados: marcha y paro, abrir/cerrar, etc., estos actuadores se manejan mediante señales digitales 0/1.

### **TIPOS**

#### ACTUADORES 0/1 – MARCHA/PARO – TODO/NADA:

Son los más comunes en los sistemas de control, en muchos casos, los sistemas de control llevan incorporado un dispositivo que permite este mando de equipos externos con órdenes marcha/paro. Los elementos más comunes para realizar este mando son los

relés y los contactores. Estos dispositivos se gobiernan desde el control con tensiones y corrientes pequeñas propias de la electrónica y permiten el mando de tensiones diferentes (CC y AC) con intensidades superiores.

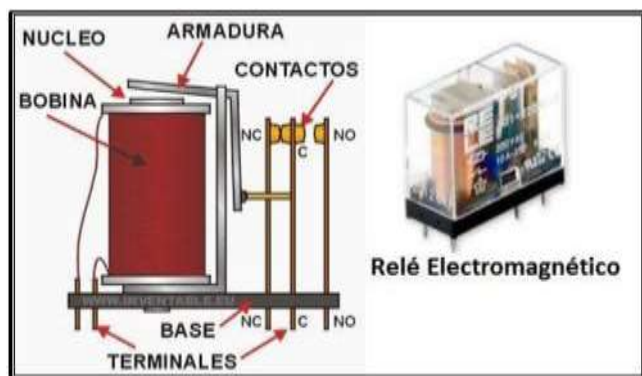


FIGURA N° 04: RELÉ

- RELÉ: Es un componente con un electroimán que al aplicarle corriente produce un movimiento mecánico que cierra circuitos a los que podemos conectar equipos externos.
- CONTACTOR: En caso de precisar corrientes mayores y mandos de más potencia recurriremos a los 'contactores', se basan en el mismo principio de los relés aunque soportan corrientes superiores por sus características constructivas.

En caso de sistemas domóticos (persianas, luces, sirena, etc.), suele bastar con pequeños relés:

- Control iluminación de jardín, habitaciones, etc.
- Abrir o cerrar electroválvulas de riego, agua, gas, etc.
- Motores de persianas, toldos, bombas de agua, etc.
- Calefacción, aire acondicionado, etc.
- Sirena alarma (luz y sonora).
- Monitorización video.

En el caso de inmótica se suele trabajar con potencias más elevadas y es común necesitar contactores, en estos casos se puede usar el pequeño relé de un sistema de control para activar el contactor que sea preciso por la potencia del equipo a controlar.

- Resistencias calefactoras.
- Bombas de agua caliente o fría para calefacción.
- Sistemas de iluminación de planta, garaje, aparcamientos, farolas, etc.



- Compresores, ventiladores, enfriadoras, unidades de azotea, etc (sistemas de clima).
- Gestión de energía, ahorro energético.
- Controles de accesos peatonales y de vehículos.
- Alarmas sonoras y luminosas, etc.
- Gestión de agua caliente sanitaria (ACS) en hoteles, hospitales, etc.

#### 🚦 ACTUADORES CON NIVELES INTERMEDIOS Y AJUSTABLES

A veces es necesario que se activen sistemas con valores diferentes a todo/nada, por ejemplo, un motor con diferentes velocidades, iluminación ajustable en intensidad, etc. Para ello, precisamos actuadores que respondan a salidas típicas de control con valores variables. Como vimos anteriormente las salidas con valores ajustables más usadas son 0-10V, 0-5V, 0-20mA y 4-20mA. Por ejemplo, un actuador para controlar el nivel de iluminación (dimmer) de unas lámparas fluorescente se

puede controlar con tensión 0- 10V, correspondiendo 0V a apagado, 10V para que estén totalmente encendidos y los valores intermedios para niveles de luz intermedios.

Esta serie de operaciones de medida, comparación, calculo y corrección, constituyen una cadena cerrada constituyen ciclo cerrado. El conjunto de elementos que hacen posible este control reciben el nombre de bucle de control.

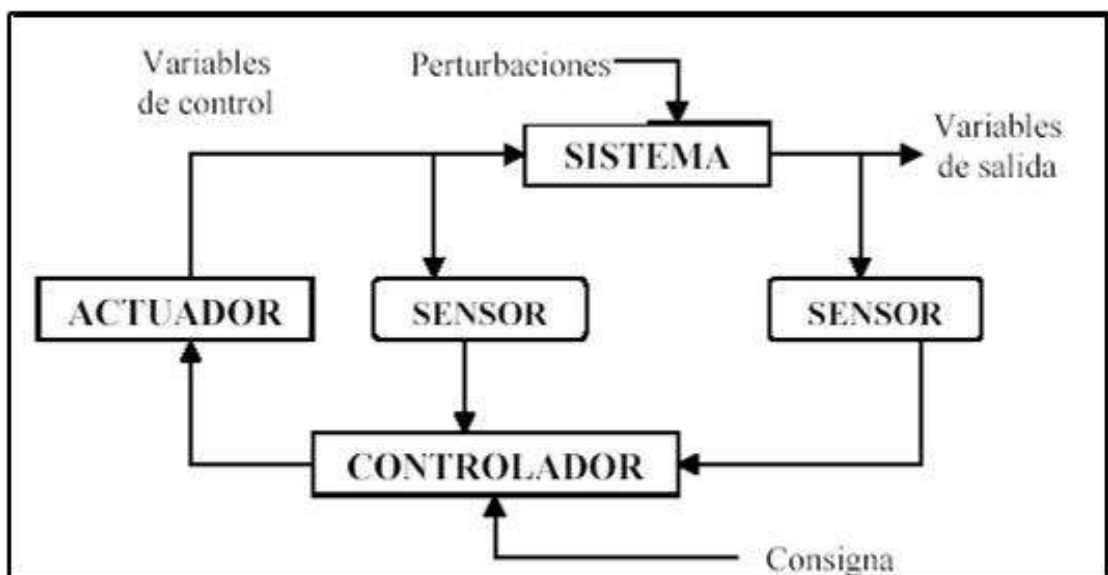


FIGURA N° 05: SISTEMAS DE CONTROL

Los sistemas de control se clasifican en sistemas de lazo abierto (o no automático) y sistemas de lazo cerrado

(retroalimentados o automáticos). Para llevar a cabo dicha clasificación, se hace la siguiente definición:

### 2.2.1.3 SISTEMA DE CONTROL DE LAZO ABIERTO

Es aquel sistema en el cual la acción de control es, en cierto modo, independiente de la salida. Este tipo de sistemas por lo general utiliza un regulador o actuador con la finalidad de obtener la respuesta deseada.

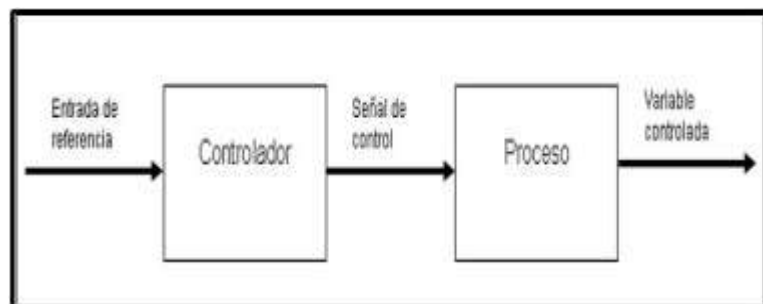


FIGURA N° 06: SISTEMA DE CONTROL DE LAZO ABIERTO

La capacidad que tales sistemas tienen para ejecutar una acción con exactitud depende de su calibración, pues en la calibración establece una relación entre la entrada y la salida con el objetivo de obtener en el sistema la exactitud deseada. Los sistemas de control de lazo abierto son económicos aunque comúnmente inexactos, ya que estos no son sensibles a las perturbaciones; por eso, el sistema de control abierto es útil cuando se tiene la seguridad que no existen perturbaciones que afecten su comportamiento. El uso

de este tipo de controladores se debe a su simplicidad y economía

Estos sistemas se caracterizan por:

- ✚ Ser sencillos y de fácil concepto.
- ✚ Nada asegura su estabilidad ante una perturbación.
- ✚ La salida no se compara con la entrada.
- ✚ Ser afectado por las perturbaciones. Estas pueden ser tangibles o intangibles.

La precisión depende de la previa calibración del sistema.

#### **2.2.1.4 SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO**

Es aquel sistema en el cual la acción de control depende de la salida. Dicho sistema utiliza un sensor que detecta la respuesta real para compararla, entonces, con una referencia a manera de entrada. Por esta razón, los sistemas de lazo cerrado se denominan sistemas retroalimentados. La propiedad de retroalimentación permite que la salida del sistema o cualquier variable del mismo sean comparadas con la entrada al sistema o con cualquier componente del sistema para que se tomen las acciones más adecuadas. Entonces, un sistema de

control retroalimentado tiene como objetivo mantener una relación preestablecida entre la salida y la entrada de referencia, comparando ambas y utilizando la diferencia como variable de control.







**FIGURA N° 07: SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO**

El control en lazo cerrado es imprescindible cuando se da alguna de las siguientes circunstancias:

- ✚ Cuando un proceso no es posible de regular por el hombre.
- ✚ Una producción a gran escala que exige grandes instalaciones y el hombre no es capaz de manejar.
- ✚ Vigilar un proceso es especialmente difícil en algunos casos y requiere una atención que el hombre puede perder fácilmente por cansancio o despiste, con los consiguientes riesgos que ello pueda ocasionar al trabajador y al proceso.

Sus características son:

-  Ser complejos, pero amplios en cantidad de parámetros.
-  La salida se compara con la entrada y le afecta para el control del sistema.
-  Su propiedad de retroalimentación.
-  Ser más estable a perturbaciones y variaciones internas.

Un ejemplo de un sistema de control de lazo cerrado sería el termo tanque de agua que utilizamos para bañarnos.





Otro ejemplo sería un regulador de nivel de gran sensibilidad de un depósito. El movimiento de la boya produce más o menos obstrucción en un chorro de aire o gas a baja presión. Esto se traduce en cambios de presión que afectan a la membrana de la válvula de paso, haciendo que se abra más cuanto más cerca se encuentre del nivel máximo.

### **2.2.2 TIPOS DE CONTROL**




Se puede hacer una clasificación de los sistemas de control atendiendo al procedimiento lógico usado por el controlador del

sistema para regular la evolución del proceso. Los principales tipos de control utilizados en los procesos industriales serán:

## NORMALES

-  Sistemas de realimentación. (Feed-back): Proporcional,
-  Integral, Derivativo Sistema anticipativo (Feed-Foward)
-  Sistema en cascada (Cascade)
-  Sistema selectivo (Over-Ride)

## AVANZADOS

-  Control de restricciones (Constraint Control)
-  Control del modelo de referencia (Model Reference Control)
-  Optimización de unidades.

### 2.2.2.1 CONTROLADOR PID

Este controlador es con frecuencia el más usado y uno de los que ofrecen mayor precisión dentro de la regulación automática. El controlador recibe su nombre ya que es una combinación de una acción de control proporcional, una acción de control integral y una acción de control derivativa por lo que se denomina acción de control proporcional- integral - derivativo o PID. El algoritmo del cálculo del control PID requiere de tres parámetros distintos: el proporcional, el integral y el derivativo. El valor proporcional determina la reacción

del error actual. El integral genera una corrección proporcional a la integral del error, esto asegura que aplicado un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero. El derivativo determina la reacción del tiempo en el que el error se produce.

Los controladores PID se recomiendan para procesos con constante de tiempo larga en los que no hay ruido del exterior. Además, ellos son de gran utilidad cuando se regulan procesos industriales como en el control de nivel, presión, flujo, temperatura, posición y velocidad.

Como se ha visto existen una gran cantidad de controladores, sin embargo estos controladores clásicos tienen deficiencias que llegan a dificultar el control de procesos cuando se presentan perturbaciones o ruido, por tal motivo se requieren controladores inteligentes.

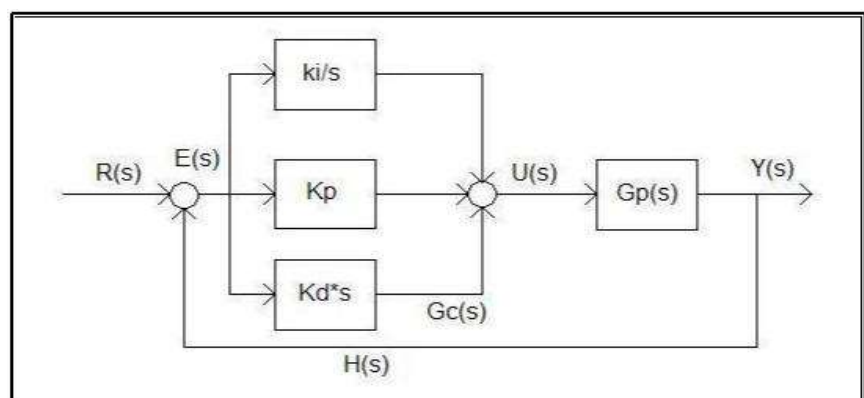


FIGURA N° 8: Control PID



Ramírez (2013). Algunas aplicaciones pueden solo requerir de uno o dos modos de los que provee este sistema de control. Un controlador PID puede ser llamado también PI, PD, P o I en la ausencia de las acciones de control respectivas. Los controladores PI son particularmente comunes, ya que la acción derivativa es muy sensible al ruido, y la ausencia del proceso integral puede evitar que se alcance al valor deseado debido a la acción de control. Actualmente en el ambiente laboral se usan formas modificadas del control PID, como por ejemplo el control I-PD y el control PID con dos grados de libertad. La utilidad de los controladores se aplica de gran manera a la mayoría de los sistemas de control. En particular, cuando el modelo matemático de la planta no se conoce y por lo tanto, no se puede emplear métodos de diseño analítico, es cuando los controladores PID resultan más útiles.

En el campo de control de procesos es bien conocido que los esquemas de un control PID sencillo y los complejos demuestran una gran utilidad para el control

satisfactorio, pero no en todos los casos presente un control optimo del sistema.<sup>7</sup>

### 2.2.2.1.1 ESTRUCTURA DEL PID

✚ P: acción 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:

$$C_p(s) = K_p$$

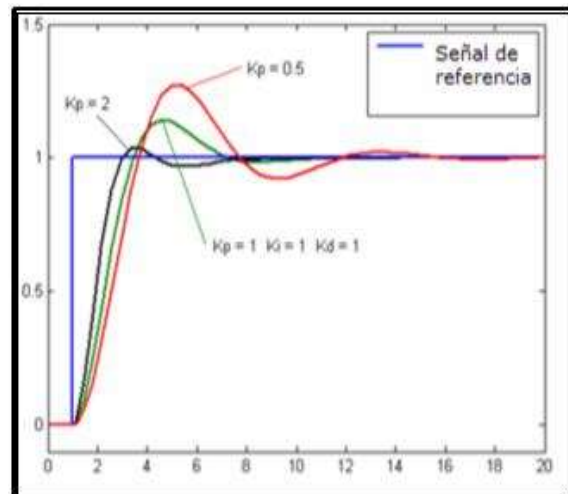


FIGURA N° 09: RESPUESTA DE LA VARIABLE CONTROLADA A

---

<sup>7</sup> RAMIREZ M. (2013). Diseño e implementación de un controlador PID de temperatura controlado a distancia para un prototipo de incubadora (Tesis de Pre Grado). Universidad de Santa María, Arequipa, Perú.

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).



I: acción 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.

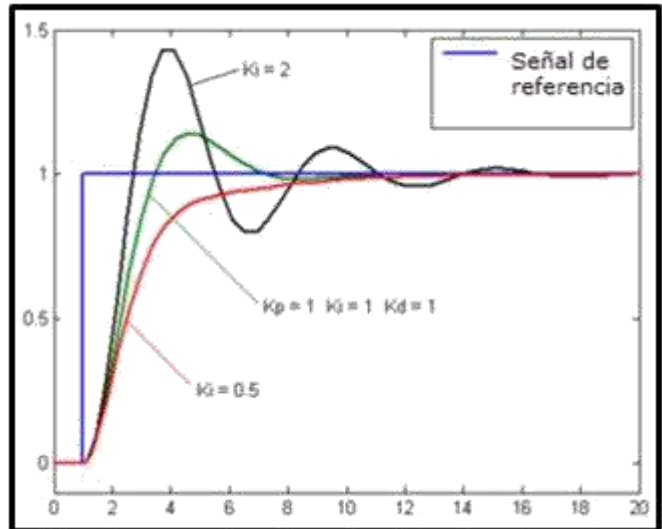


FIGURA N° 10: RESPUESTA DE LA VARIABLE CONTROLADA B

✚ PI: acción 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 negativa 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.

 PD: acción 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 períodos 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 de estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema y, por tanto, permite un valor más grande que la

ganancia K, lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable.

✚ PID: acción 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 transferencia resulta:

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

## REGLAS DE SINTONÍA DE CONTROLADORES PID

Control PID de plantas

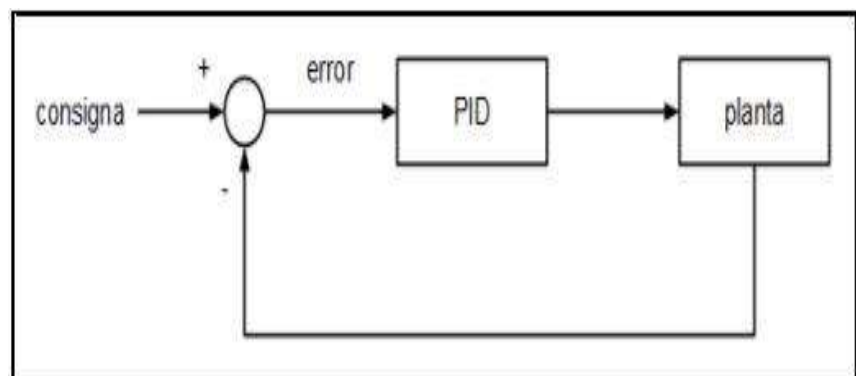


FIGURA N° 11: CONTROL PID DE UNA PLANTA

El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de comportamiento dadas se conocen como sintonía del controlador. Ziegler y Nichols sugirieron reglas para sintonizar los controladores PID lo que significa dar valores a ( $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ ) basándose en las respuesta escalón experimentales o en el valor de  $K_p$  que produce estabilidad marginal cuando solo se usa la acción de control proporcional. Las reglas de Ziegler-Nichols, que se presentan a continuación son muy convenientes cuando no se conoce el modelo matemático de las plantas, pero también se puede aplicar al diseño de sistemas de modelos matemáticos conocidos.

### **REGLAS DE ZIEGLER-NICHOLS PARA SINTONIZAR CONTROLADORES PID**

Salas (2008) Ziegler y Nichols propusieron unas reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional  $K_p$ , del tiempo integral  $T_i$  y del tiempo derivativo  $T_d$ , con base en las características de respuesta transitoria de una planta específica. Tal determinación de los parámetros de los controladores PID o de la sintonización de los controles PID la realizan los ingenieros en el sitio mediante experimentos sobre la planta.<sup>8</sup> Existen dos métodos denominados reglas

---

<sup>8</sup> SALAS J. (2008) Control difuso PID de un sistema de control para una grúa puente (Tesis Pre Grado). Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú.



de sintonización de Ziegler-Nichols. En ambos se pretende obtener un 25% de sobrepaso máximo en la respuesta escalón.

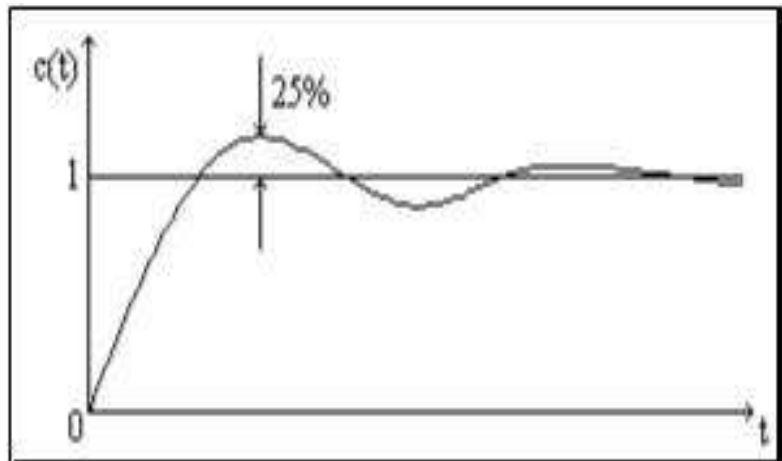


FIGURA N° 12: SOBREPULSO

- ✚ Primero Método: En el primer método, la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental. Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener forma de S. Si la respuesta no exhibe una curva con forma de S, este método no es pertinente. Tales curvas de respuesta escalón se generan experimentalmente o a partir de una simulación dinámica de la planta.

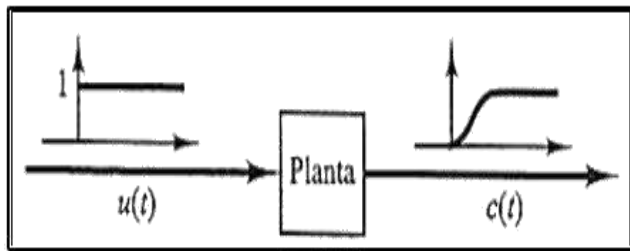


FIGURA N° 13: RESPUESTA ESCALÓN UNITARIO DE UNA PLANTA

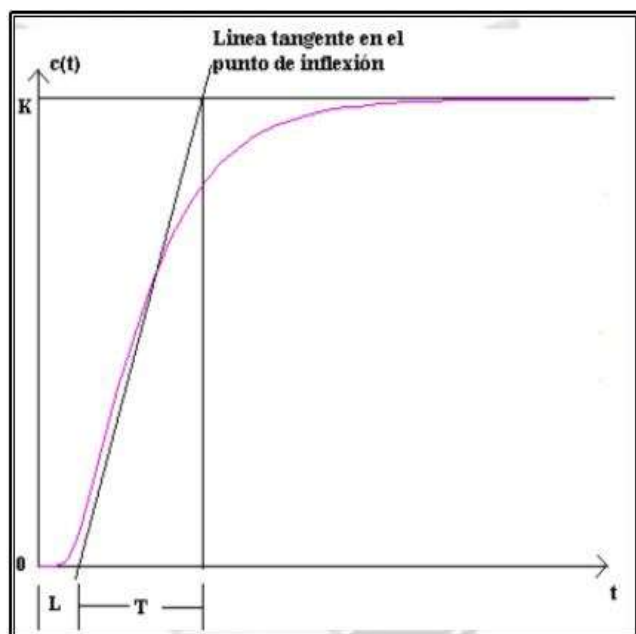


FIGURA N° 14: CURVA DE RESPUESTA EN FORMA DE S

Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores de  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  de acuerdo con la fórmula que aparece en la siguiente Tabla 1

Tabla 1 Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta (Primer Método).

**TABLA N° 01: PARÁMETROS DEL CONTROLADOR PID POR EL MÉTODO DE LA CURVA DE REACCIÓN**

Tipo de Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$T/L$	$\alpha$	0
PI	$0.9T/L$	$L/0.3$	0
PID	$1.2T/L$	$2L$	$0.5L$

Observe que el controlador PID sintonizado mediante el primer método de las reglas de Ziegler-Nichols produce:

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

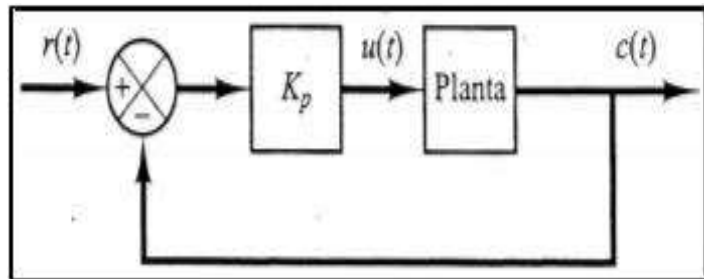
$$G_c(s) = 1.2 \frac{T}{L} \left( 1 + 0.5 L s + \frac{1}{2 L s} \right)$$

$$G_c(s) = 0.6 T \frac{\left( s + \frac{1}{L} \right)^2}{s}$$

Por lo tanto el controlador PID tiene un polo en el origen y un cero.  $S = -1/L$

- Segundo Método: En el segundo método, primero establecemos  $T_i = 0$  y  $T_d = 0$ . Usando sólo la acción de control proporcional se incrementa  $K_p$  de 0 a un valor crítico  $K_{cr}$  en donde la salida exhiba primero oscilaciones sostenidas. Si la salida no presenta

oscilaciones sostenidas para cualquier valor que pueda tomar  $K_p$ , no se aplica este método. Por tanto, la ganancia crítica  $K_{cr}$  y el periodo  $P_{cr}$  correspondiente se determinan experimentalmente. Ziegler-Nichols sugirieron que se establecieran los valores de los parámetros  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  de acuerdo con la fórmula que aparece en la siguiente Tabla 2



**FIGURA N° 15: SISTEMA DE LAZO CERRADO CON UN CONTROLADOR PROPORCIONAL**

Tabla 2 Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la ganancia crítica  $K_{cr}$  y periodo crítico  $P_{cr}$  (Segundo Método)

**TABLA N° 02: PARÁMETROS DEL CONTROLADOR PID POR EL MÉTODO DE OSCILACIONES SOSTENIDAS**

Tipo	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5K_{cr}$	inf	0
PI	$0,45K_{cr}$	$P_{cr}/1,2$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Ogata (2010). Se debe observar que el controlador PID sintonizado mediante el segundo método de las reglas de Ziegler-Nichols produce:

$$\begin{aligned}
 G_c(s) &= K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\
 &= 0,6K_{cr} \left( 1 + \frac{1}{0,5P_{cr}s} + 0,125P_{cr}s \right) \\
 &= 0,075K_{cr}P_{cr} \frac{\left( s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s}
 \end{aligned}$$

Por lo tanto, el controlador PID tiene un polo en el origen y cero doble en  $S=-4/P_{cr}$

Si se conoce la función de transferencia de la planta, se calcula la respuesta escalón unitario o la ganancia crítica  $K_{cr}$  y el periodo crítico  $P_{cr}$ . Sin embargo, la utilidad real de las reglas de sintonización de Ziegler-Nichols se vuelve evidente cuando no se conoce la dinámica de la planta, por lo que no se cuenta con enfoques analíticos o gráficos para el diseño de controladores. En general, para aquellas plantas con una dinámica complicada y sin integradores, se han aplicado las reglas de sintonización de Ziegler-Nichols. Sin embargo, si la planta tiene un integrador, en algunos casos estas reglas no son pertinentes. Para ilustrar una situación

en las que las reglas de Ziegler-Nichols no se aplican, consideremos el caso donde un sistema de control con realimentación unitaria tiene una planta cuya función de transferencia es de la siguiente manera: <sup>9</sup>

$$G(s) = \frac{s+2}{s} \frac{s+3}{s+1} \frac{s+3}{s+5}$$

### 2.2.3 TRANSMISORES

Los transmisores captan la variable de proceso a través del elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática, electrónica, digital, óptica, hidráulica o por radio. La señal neumática es de 3 a 15 psi (libras por pulgada cuadrada) (equivale a 0,206-1,033 bar o 0,21-1,05 kg/cm<sup>2</sup>) adoptada en Estados Unidos y los países de habla inglesa, o 0,2-1 bar (20-100 kPa) empleada en los países que utilizan el sistema métrico decimal. La señal electrónica normalizada es de 4 a 20 mA de corriente continua, si bien se utilizan de 1 a 5 mA c.c., de 10 a 50 mA c.c. y de 0 a 20 mA c.c. La señal digital consiste una serie de impulsos en forma de bits. Cada bit consiste en dos signos, el 0 y el 1 (código binario), y representa el paso (1) o no (0) de una señal a través de un conductor. Si la señal digital que maneja el microprocesador del

---

<sup>9</sup>OGATA K. (2010). Ingeniería de Control Moderna, Madrid, España: PEARSON.

transmisor es de 32 bits entonces puede enviar 32 señales binarias (0 y 1) simultáneamente.

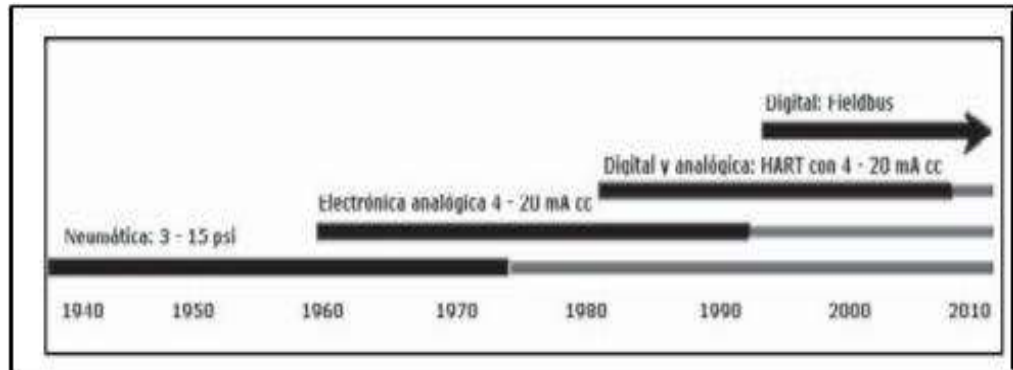


FIGURA N° 16: EVOLUCIÓN DE LAS SEÑALES DE TRANSMISIÓN

La señal hidráulica se utiliza cuando son necesarias presiones elevadas para el accionamiento de pistones hidráulicos en elementos finales de control. Las señales de radio se emplean para la transmisión en ambientes hostiles (altas temperaturas, terrenos muy accidentados) y a grandes distancias (industria del petróleo). Las necesidades de los usuarios son el motor que impulsa el desarrollo de la instrumentación. Entre estas necesidades se encuentran:

- ✚ Aumento de la productividad.
- ✚ Aumento de la calidad del proceso.
- ✚ Repetibilidad de características de los productos fabricados. Es decir, el cliente no recibe un producto con mayor calidad de la indicada en sus especificaciones ni debe reclamar por recibir un producto de peor calidad de la especificada (normas ISO 9000).





- ✚ Reducción de los costes de fabricación (ahorro energético, etc.).
- ✚ Seguridad (se evitan malas maniobras que pueden causar pérdidas de producto).
- ✚ Normalización de los instrumentos.

La evolución de las señales de transmisión hacia la digital, propiciada por la irrupción de los microprocesadores, ha permitido satisfacer dichas necesidades. Las señales neumática y electrónica se utilizan cada vez menos en beneficio de la señal digital, por las ventajas que ésta ofrece en exactitud, en facilidad de comunicaciones y en grabación de la memoria histórica de las variables de proceso. La señal neumática ha quedado prácticamente relegada a su uso en las válvulas de control y en los posicionadores electro-neumático y dígito-neumático. Dentro de la evolución de la instrumentación cabe destacar la aparición en 1983, por parte de la Norma Honeywell, del primer transmisor digital denominado "inteligente" (smart transmitter), término que indica que el equipo tiene incorporadas funciones adicionales que se añaden a las propias de la medida y transmisión exclusiva de la variable. Y en 1986 aparece en el mercado el primer aparato que transmite directamente una señal digital al receptor, al que pronto sigue el transmisor digital de temperatura. A partir de esta fecha se desarrollaron, rápidamente, una serie de protocolos digitales con el objetivo de comunicarse con el instrumento local o remotamente y



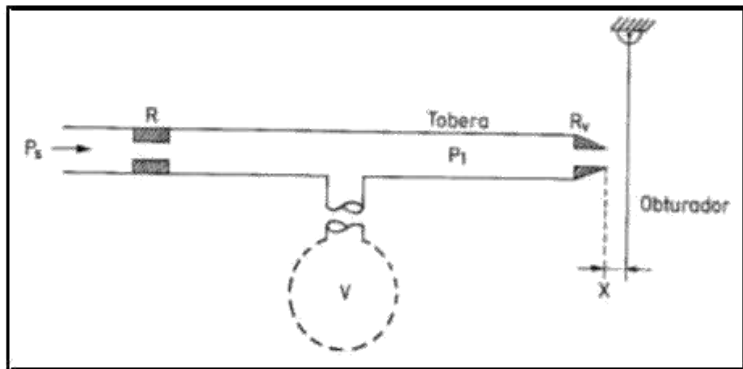
aprovechar, al máximo, todas las potencialidades que ofrecen los microprocesadores. Este desarrollo ende hacia la creación de protocolos abiertos que permitan el intercambio de instrumentos de diferentes fabricantes.

La exactitud que se consigue con las diferentes señales de transmisión es:

-   $\pm 0,5\%$  en los transmisores neumáticos.
-   $\pm 0,3\%$  en los transmisores electrónicos.
-   $\pm 0,15\%$  en los transmisores "inteligentes" con señal de salida de 4 a 20 mA c.c.
-   $\pm 0,1\%$  en los transmisores digitales.

### **2.2.3.1 TRANSMISORES NEUMÁTICOS**

Los transmisores neumáticos se basan en el sistema tobera-obturador que, mediante bloques amplificadores con retroalimentación por equilibrio de movimientos o de fuerzas, convierte el movimiento del elemento primario de medición a una señal neumática de 3-15 psi (libras por pulgada cuadrada) o bien su equivalente en unidades métricas 0,2-1 bar (0,2-1 Kg/cm<sup>2</sup> ) (20-100 kPa), siendo su exactitud del orden del  $\pm 0,5\%$ .



**FIGURA N°17: TRANSMISOR NEUMÁTICO**

Los transmisores neumáticos, al tener el diámetro de la tobera muy pequeño, del orden de 0,1 a 0,2 mm, son susceptibles de mal funcionamiento debido a las partículas de aceite o polvo que puedan tapar la tobera. Este problema de mantenimiento, unido al hecho de que no pueden guardar las señales de planta, hace que se utilicen cada vez menos.

### **2.2.3.2 TRANSMISORES ELECTRÓNICOS**

Basados en detectores de inductancia, o utilizando transformadores diferenciales o circuitos de puente de Wheatstone, o empleando una barra de equilibrio de fuerzas, convierten la señal de la variable a una señal electrónica de 4-20 mA c.c. Su exactitud es del orden del  $\pm 0,5\%$ .

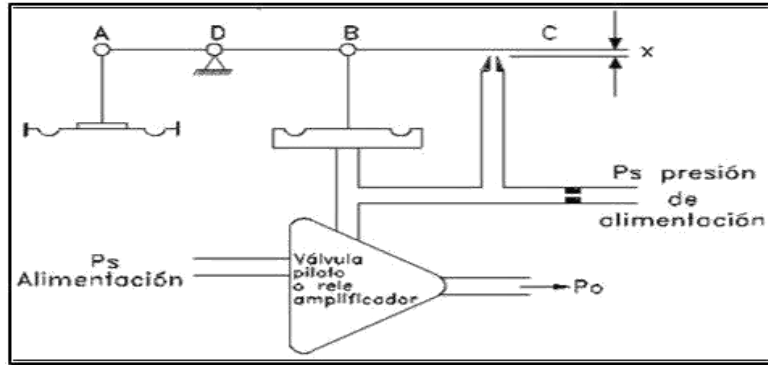


FIGURA N°18: TRANSMISOR ELECTRÓNICO

Análogamente a los instrumentos neumáticos, no pueden guardar las señales de planta, y además son sensibles a vibraciones, por cuyo motivo su empleo ha ido disminuyendo. El transmisor electrónico se alimenta con una fuente de 24 V c.c. y un circuito de dos hilos. El receptor dispone de una resistencia de 250 OHMS conectada en los bornes de entrada. De este modo, si la señal de salida del transmisor varía de 4 mA c.c. a 20 mA c.c., se obtendrán las siguientes tensiones en los bornes de entrada al receptor:  $250 \text{ ohmios} \times 4 \text{ mA c.c.} = 1.000 \text{ mV} = 1 \text{ V}$   $250 \text{ ohmios} \times 20 \text{ mA c.c.} = 5.000 \text{ mV} = 5 \text{ V}$

Es decir, de 1 V c.c. a 5 V c.c. y no se pierde tensión en la línea ya que la resistencia de 250 OHMS está conectada justo a la entrada del receptor.

### **2.2.3.3 TRASMISOR DE PRESIÓN**

En general, los transmisores de presión o de presión diferencial son elementos vitales en las instalaciones de aire comprimido. La mayoría de ellos se pueden encontrar instalados en el interior de compresores, secadores, montados sobre las tuberías de aire comprimido, depósitos acumuladores o filtros de línea y en sistemas de control como los PLC.

Hoy en día, en las plantas de aire comprimido y gases, no solo nos limitamos a ver los valores de presión en una determinada línea, sino que hay que usar ese valor en sistemas de control integrados que realizan trabajos o determinadas acciones con ese valor. Para ello, hay que enviarles esa medida de presión y se hace mediante una señal eléctrica.

Los transmisores de presión son en realidad sensores de presión. Otras denominaciones como transductores de presión, son también admitidas, pero se debe tener cuidado con este aspecto porque algunos fabricantes denominan transductor de presión a los equipos que envían señales en voltios y no en mAmp.

El valor eléctrico más frecuente en este tipo de equipos es de 4 a 20 mA, usando un cable de dos hilos como se muestra en la siguiente figura.



FIGURA N° 19: TRASMISOR DE PRESIÓN

Aunque la señal más usada es en mA, también se pueden encontrar aplicaciones que trabajan con señales en voltios. Las más frecuentes son de 1-5 voltios ó 0-10 voltios con cables de 3 hilos, pero también se utilizan 0-100 milivoltios con cables de 4 hilos.

### **FUNCIONAMIENTO**

El principio fundamental es conseguir que el valor de presión manométrica de un sistema de aire comprimido sea convertido en un valor eléctrico que permita ser usado en cualquier equipo de control. Para ello, los diferentes fabricantes han desarrollado equipos basados en los siguientes sistemas:

## SENSORES RESISTIVOS

Estos sensores se basan en la medida de la variación de la resistencia inducida por la deformación en función de la presión. Para ello se utiliza una membrana que se puede deformar de manera controlada en función de la presión. Esta membrana incorpora unos conductores eléctricos que se deforman, al igual que la membrana que los soporta, generando un aumento o reducción de la resistencia, cuyo valor es medido usando un puente Wheatstone.

## SENSORES PIEZORESISTIVOS

El principio de la medida con sensores piezoresistivos es similar al de los sensores resistivos. La diferencia reside en la utilización de semiconductores como conductores en vez de metal y la deformación provoca en este caso una variación de la resistencia específica.

## SENSORES CAPACITIVOS


Este principio está basado en la medición de la capacidad de un condensador que varía en función de la aproximación a la superficie activa. Para ello se utiliza una membrana con dos placas metálicas

que constituyen el condensador. La deformación de la membrana, inducida por la presión, reduce la distancia entre las dos placas, aumentando la capacidad y manteniendo igual la superficie y la constante dieléctrica.

## **SENSORES PIEZOELÉCTRICOS**

El principio de los sensores piezoeléctricos se basa en un efecto físico que sucede en unos pocos cristales no conductivos como el cuarzo. Cuando se comprime el cuarzo se produce una polarización eléctrica en superficies opuestas. La deslocalización de la estructura cristalina con carga eléctrica genera un momento dipolar que se refleja en una (aparente) carga de superficies. La intensidad de la carga es proporcional a la fuerza empleada por la presión y la polaridad depende de la dirección. La tensión eléctrica generada por la carga de la superficie puede captarse y amplificarse.

### **TIPOS:**

 Transmisores de presión manométrica: Se utilizan para la lectura directa de la presión en una línea de aire comprimido o en algún punto de control de un compresor, secador, etc.

- ✚ Transmisores de presión diferencial: Se utilizan para medir la diferencia de presión que existe entre dos puntos. Lo más habitual es verlos instalados en los filtros de línea, filtros separadores de los compresores o en los secadores de adsorción.

Es habitual en determinados proyectos de ingeniería, que se solicite para los transmisores de presión que dispongan de un protocolo HART. El protocolo HART (Highway Addressable Remote Transducer) es abierto y de uso común en los sistemas de control. Se emplea para la configuración remota y supervisión de datos en los instrumentos de campo.

Como curiosidad, comentar que este protocolo fue desarrollado por Rosemount Inc. en 1980. Posteriormente, en 1993 fueron liberados sus derechos, depositándolo en la Fundación de Comunicación Hart con la idea de poder ser usado de forma libre y gratuita por cualquier fabricante de instrumentos.

Con este protocolo, desde los sistemas de control distribuido, se puede acceder al instrumento de campo usando el lazo de corriente de 4 a 20 mA para



modificar los datos de configuración y parámetros del instrumento.

Los transmisores de presión tienen diferentes formas y tamaños, según la aplicación para la que sean requeridos. Se adjuntan algunas fotos del fabricante Rockwell Automation.



FIGURA N° 20: TRANSMISOR DE PRESIÓN ROCKWELL AUTOMATION.

Estos transmisores se emplean para medir diferentes tipos de gases, incluso fluidos. Lógicamente, en el aire comprimido son requeridos para medir la presión de aire y para ello es importante considerar algunos valores a tener en cuenta cuando necesitemos seleccionar un instrumento de campo como éste:

- ✚ Tipo de transmisor. Presión manométrica o diferencial.
- ✚ Tipo de fluido a medir. Habitualmente aire comprimido.
- ✚ Rango de presión de trabajo.
- ✚ Temperatura del aire comprimido.
- ✚ Temperatura ambiente.
- ✚ Tipo de señal eléctrica de comunicación, 4 a 20 mA, 1 a 5 voltios, etc.
- ✚ Protección para intemperie. En algunos casos se requiere IP 65.
- ✚ Solicitar el protocolo Hart, solo si es requerido por el usuario.
- ✚ El transmisor se puede solicitar con pantalla de lectura local o simplemente como instrumento de medición sin lectura.
- ✚ Colector de descarga (manifold) si lo requiere la aplicación del usuario final.

### 2.3. MARCO CONCEPTUAL

- ✚ **Señal de salida:** Es la variable que se desea controlar posición, velocidad, presión, temperatura, etc. También se denomina variable controlada.
- ✚ **Señal de referencia:** Es el valor que se desea que alcance la señal de salida.

- ✚ **Error:** Es la diferencia entre la señal de referencia y la señal de salida real.
- ✚ **Señal de control:** es la señal que produce el controlador para modificar la variable controlada de tal forma que se disminuya, o elimine, el error.
- ✚ **Señal análoga:** Es una señal continua en el tiempo.
- ✚ **Señal digital:** Es una señal que solo toma valores de 1 y 0. La computadora solo envía y/o recibe señales digitales.
- ✚ **Conversor análogo/digital:** Es un dispositivo que convierte una señal analógica en una señal digital (1 y 0).
- ✚ **Conversor digital/análogo:** Es un dispositivo que convierte una señal digital en una señal analógica (corriente o voltaje). **Planta:** Es el elemento físico que se desea controlar.
- ✚ **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 como presión, flujo, temperatura, etc. En una señal eléctrica codificada ya sea en forma analógica o digital. También es llamado transductor. Los sensores, o transductores, analógicos envían, por lo regular, señales normalizadas de 0 a 5 voltios, 0 a 10 voltios o 4 a 20 mA.
- ✚ **Sistema de control en lazo cerrado:** Es aquel en el cual continuamente se está monitoreando la señal de salida para

compararla con la señal de referencia y calcular la señal de error, la cual a su vez es aplicada al controlador para generar la señal de control y tratar de llevar la señal de salida al valor deseado. También es llamado control realimentado.

✚ **Sistema de control en lazo abierto:** En estos sistemas de control la señal de salida no es monitoreada para generar una señal de control.

✚ **Abierto:** Se refiere a un componente, o cable de conexión, que tiene un circuito abierto. Equivale a una resistencia tiende a infinito.

✚ **Absoluto Cero:** Menor temperatura posible de una sustancia.

✚ Cero Absoluta en la escala Kelvin, que equivale a  $-273^{\circ}\text{C}$ .

✚ **AC:** Corriente Alterna Acelerador de Partículas: Aparato utilizado para conseguir, por medio de campos eléctricos, magnéticos o ambos combinados, la aceleración de partículas atómicas, subatómicas o núcleos ligeros con carga eléctrica, hasta alcanzar altas energías.

✚ **Acoplamiento Directo:** Conexión directa con conductores en vez de utilizar un condensador de acoplamiento entre etapas. Para obtener éxito, debemos asegurarnos que las tensiones de continua de los dos puntos que se van a conectar son aproximadamente las mismas que antes de que se haga la conexión directa.

✚ **Aislante:** Cualquier material que conduce mal el calor o la electricidad y que se emplea para suprimir su flujo.

✚ **Ampere:** Unidad de corriente eléctrica. Es la intensidad de la corriente que, al circular por dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y colocados a la distancia de un metro uno de otro en el vacío, origina entre dichos conductores una

fuerza de dos diez millonésimas de newtonio por cada metro de conductor.

✚ **Amplificador:** Circuito que puede aumentar la variación pico a pico de la tensión, la corriente o la potencia de una señal.

✚ **Aproximación Ideal o Teórica:** Es el circuito más simple equivalente a un dispositivo que es posible obtener. Incluye sólo algunas de las propiedades básicas del dispositivo e ignora muchas otras de menor importancia.

✚ **Frecuencias Medias:** Ésta se ha definido como  $10f_1$  a  $0,1f_2$ . En este intervalo de frecuencias. la ganancia de tensión es igual a la ganancia máxima de tensión con un margen de un 0.5%.

✚ **Blindaje:** Protección electromagnética, magnética o electrostática constituida por una pantalla metálica por lo general conectada eléctricamente al armazón de un aparato o a un punto de masa.

✚ **Bloqueo (estado de):** Estado de un dispositivo semiconductor (diodo, transistor, tiristor, triac, etc.) que trabaja en conmutación y que ofrece una resistencia prácticamente infinita. Este estado corresponde al de un interruptor abierto.

✚ **Bus:** Dispositivo no cíclico cuyo fin es asegurar las transferencias de información simultáneas entre diferentes subconjuntos de un sistema informático según sus especificaciones físicas y lógicas comunes. Se aplica también a toda línea de conexión que une varios componentes, subconjuntos o hardware para permitir la aportación de energía y la circulación de informaciones entre ellos

- ✚ **Calibración:** El proceso para ajustar un instrumento de medida mediante patrones estándares. Caloría: cantidad de energía térmica requerida para aumentar un gramo de agua desde 1°C a 15°C.
- ✚ **Carga Activa:** Se refiere al uso de un transistor bipolar o MOS como resistencia. Se hace para ahorrar espacio u obtener resistencias difíciles de conseguir con resistencias pasivas.
- ✚ **Circuito Discreto:** Circuito cuyos componentes, como resistencias, transistores, condensadores, etc., se sueldan o se conectan mecánicamente de alguna otra manera.
- ✚ **Coeficiente de Temperatura:** Relación de cambio de una variable con respecto a la temperatura.
- ✚ **Comparador:** Circuito o dispositivo que detecta cuándo la tensión de entrada es mayor que un valor límite predeterminado. La salida es una tensión alta o bien una tensión baja. El límite predeterminado se llama punto de conmutación.
- ✚ **Condensador:** Dispositivo que almacena carga eléctrica. En su forma más sencilla, un condensador está formado por dos placas metálicas (armaduras) separadas por una lámina no conductora o dieléctrico. Al conectar una de las placas a un generador, ésta se carga e induce una carga de signo opuesto en la otra placa.
- ✚ **Entrada:** Promedio de las dos corrientes de entrada a un amplificador diferencial o a un amplificador operacional.
- ✚ **Digital:** Área de la electrónica que estudia los sistemas electrónicos que procesan señales eléctricas que toman sólo dos valores asignados a los dígitos 0 y 1, y reciben el nombre de señales digitales.

- ✚ **Tensión:** Conjunto de dos dipolos conectados en serie y recorridos por la misma corriente, donde el potencial en los terminales de uno de ellos es una fracción del potencial en los terminales del conjunto.
- ✚ **Resistencia:** Propiedad de un objeto o sustancia que hace que se resista u oponga al paso de una corriente eléctrica. La resistencia de un circuito eléctrico determina, según la llamada ley de Ohm, cuánta corriente fluye en el circuito cuando se le aplica un voltaje determinado. La unidad de resistencia es el ohmio, que es la resistencia de un conductor si es recorrido por una corriente de un amperio cuando se le aplica una tensión de 1 voltio.

## **CAPÍTULO III**

### **DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA**

#### **3.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL**

Con el objetivo de controlar el nivel de llenado de un sistema de tanques en cascada mediante el Control PID, en la empresa de Tintes Blue Chemicals, se procedió a identificar los elementos que intervienen en el proceso y tome como referencia el diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado, ya que el sistema de control a diseñar es de tipo automático. (Ogata, 2010).

En ese sentido los elementos del sistema de control son:

- ✚ Sensor: Transductor de presión.(salida de 0 a 10 voltios)
- ✚ Planta: Sistema de tanques en cascada (tanque de 1000 litros)
- ✚ Controlador Automático: Controlador Universal PID
- ✚ Actuador: Válvula reguladora manualmente



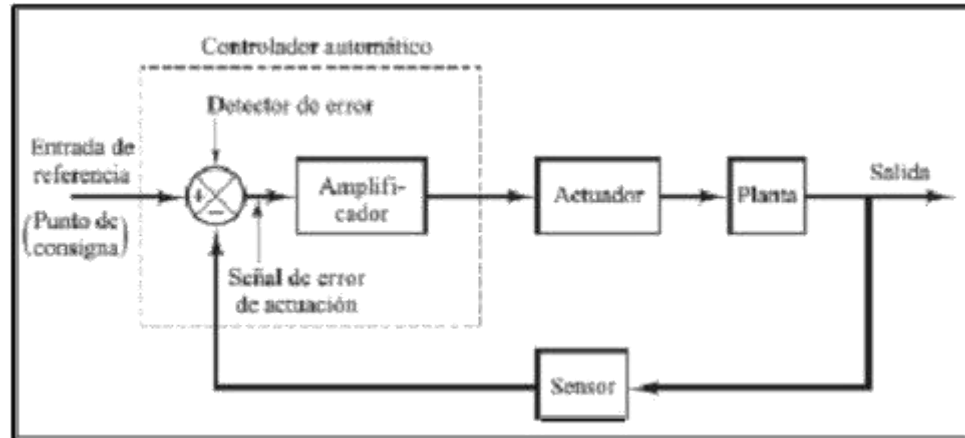


FIGURA N° 21: DIAGRAMA DE CONTROL POR REALIMENTACIÓN

Y las señales que intervienen en el proceso son:

- ✚ Señal de consigna: 60% (valor óptimo del porcentaje de llenado)
- ✚ Señal de salida: Nivel de llenado
- ✚ Señal de error: Diferencia entre el nivel de llenado actual y el nivel deseado definido en el Set - Point.
- ✚ Señal de Control: Es la señal que se obtiene a la salida del controlador PID (su rango va desde 0 a 10 voltios).

En ese sentido el diseño del sistema de control PID propuesto para el llenado de tanques en cascada es:

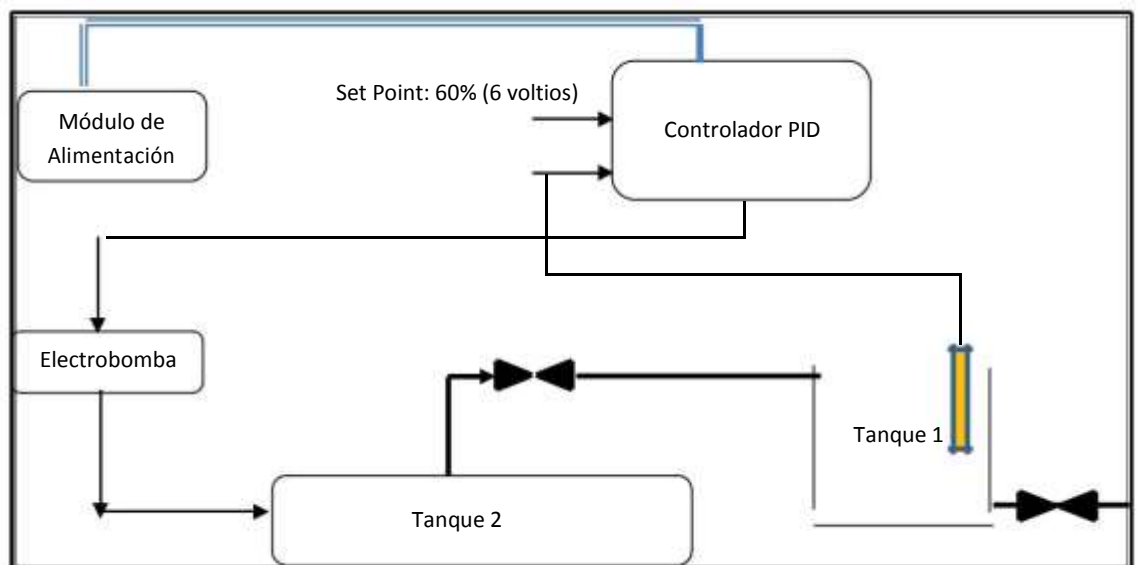
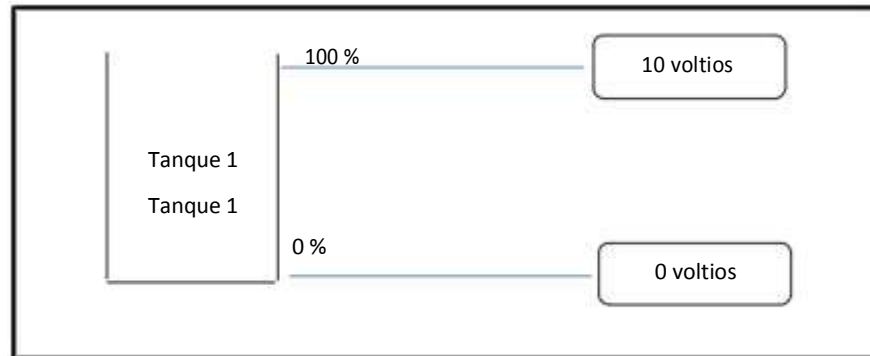


FIGURA N° 22: DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL CON PID

Además, con la finalidad de hacer un escalamiento entre el nivel de llenado del tanque y la señal eléctrica que proporciona el transmisor de presión, se realizó la siguiente equivalencia:



**FIGURA N° 23: ESCALAMIENTO ENTRE EL PORCENTAJE DE NIVEL DE LLENADO Y LA SALIDA EN VOLTIOS DE TRANSMISOR DE PRESIÓN**

### **3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL PID**

Inicialmente describiré con mayor detalle las características del controlador PID, luego describiré el módulo de alimentación, para finalmente realizar la descripción del sistema de control de nivel de llenado de tanques en cascada.

El controlador universal PID, presenta 2 terminales de entrada y un terminal de salida. El primer terminal de entrada se le asigna el nombre de **Set Point** ( $w$ ), el segundo terminal de entrada recibe el nombre de variable controlada ( $x$ ) y el terminal de salida se le asigna el nombre de señal de control ( $y$ ).

El controlador PID universal presenta dos entradas regulables de 0 voltios a  $U_{ref}$  (10 Voltios) y de  $-U_{ref}$  a  $U_{ref}$  voltios, cualquiera de estas entradas

se utiliza para configurar el Set Point o valor de consigna para el nivel de llenado del tanque 1.



FIGURA N° 24: CONTROLADOR PID

Así también los valores que proporcionaron una mejor respuesta ante las perturbaciones fueron:  $K_p=300$ ,  $t_d= 70$  y  $t_i =10$ . La constante  $K_p$  optimiza la respuesta de la variable controlada ante las perturbaciones, es decir reduce el tiempo de respuesta. La constante de tiempo derivativa elimina los sobresaltos o sobre impulsos que sufre la variable controlada (nivel de llenado del tanque 1) y la constante de tiempo integrativa elimina el error en estado estacionario que presenta la variable controlada, consiguiendo así que el sistema se autorregule por sí mismo ante cualquier perturbación.

En cuanto al sistema control PID aplicado a un sistema de tanques en cascada, como alternativa de solución para el control de nivel de llenado, en una empresa de tintes, queda esquematizado de la siguiente forma:

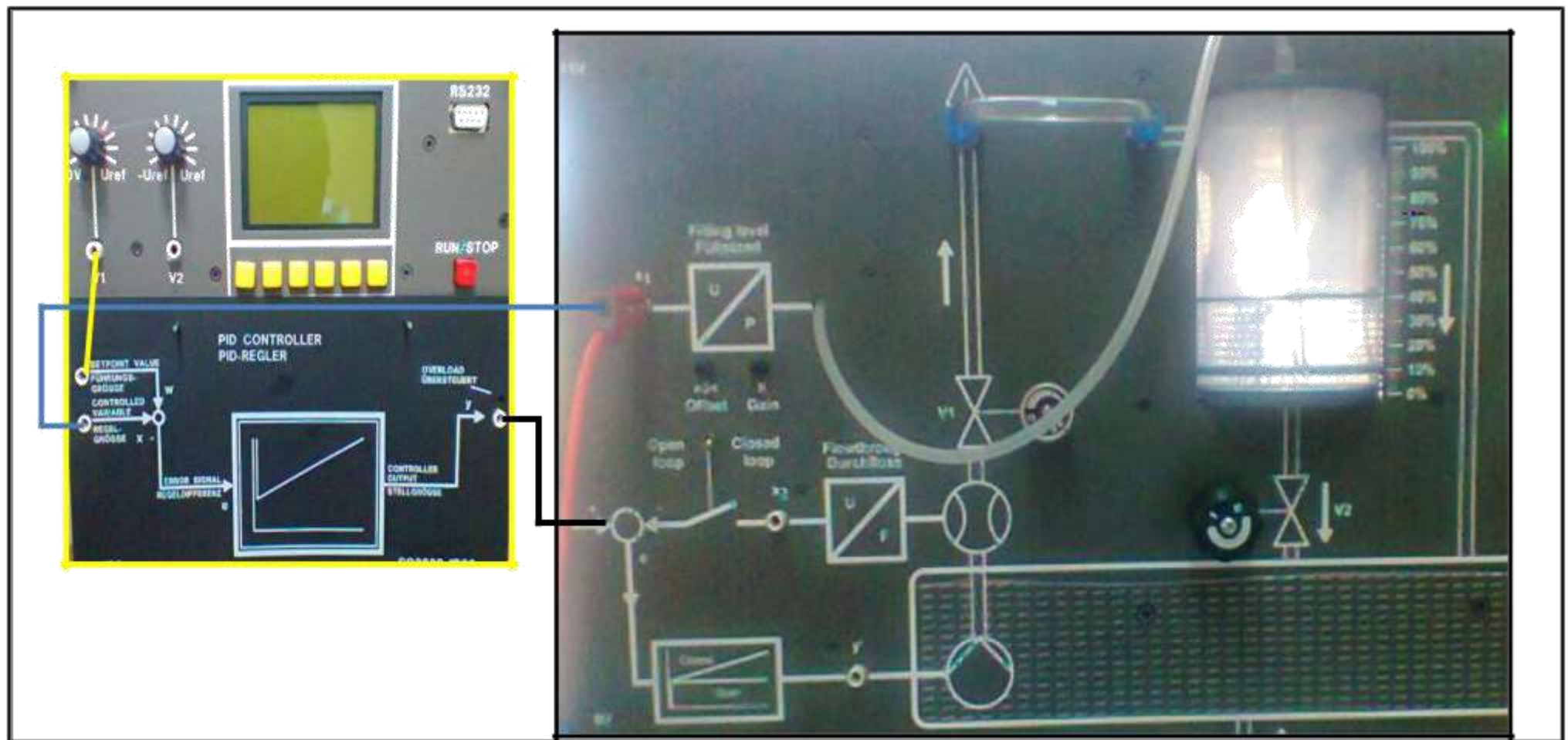


FIGURA N° 25: PROTOTIPO PARA EL ENSAYO DEL CONTROL PID APLICADO A UN SISTEMA DE TANQUES EN CASCADA PARA EL CONTROL DE NIVEL DE LLENADO

Teniendo en cuenta que el valor de consigna del nivel de llenado es de 600 litros (60% del nivel total de llenado), el set point en el controlador PID se configura a 6 Voltios ya que debido al escalamiento 0 voltios equivale a 0% y 10 voltios equivale a 100%.

Cuando el transmisor de presión detecte alguna variación fuera del valor de consigna, de inmediato se genera una señal de error que es procesada por el controlador PID, el cual dependiendo si la señal de error está lejano a su valor de consigna hará que la electrobomba con mayor potencia traslade el agua del tanque en cascada 2 al tanque 1, y cuando ya esté próximo al valor de consigna lentamente ira disminuyendo su potencia, hasta llegar a cero.

De esta forma el sistema de control autorregula el nivel de llenado evitando así rebose de tanque o que no se tenga el nivel adecuado de insumo (agua) para generar un producto de calidad.

### **3.3 REVISIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE RESULTADOS**

A continuación se muestran los resultados obtenidos en referencia al comportamiento de la variable controlada con respecto al tiempo. Las curvas representan un estado transitorio y un estado estacionario del nivel de llenado, alcanzando así la estabilidad establecida a través del controlador PID.



FIGURA N° 26: GENERÁNDOSE UNA PERTURBACIÓN EN EL SISTEMA DE CONTROL, MODIFICANDO EL NIVEL DE LLENADO PRE ESTABLECIDO DE 60%



FIGURA N° 27: EL CONTROL PID MUESTRA LOS NIVELES DE VALOR DESEADO, VALOR MEDIDO, NIVEL MÁXIMO Y PORCENTAJE DE ERROR – 10%





FIGURA N° 28: EL CONTROLADOR PID DETECTA LA VARIACIÓN Y DE INMEDIATO ENVIA UNA SEÑAL AL ACTUADOR PARA CONSEGUIR REDUCIR EL ERROR – 7%



FIGURA N° 29: EL CONTROLADOR PID BUSCA QUE EL PROCESO CONSIGA ESTABILIDAD, ES DECIR REDUCE EL ESTADO TRANSITORIO Y AUMENTA EL ESTADO ESTACIONARIO



**FIGURA N° 30: EL CONTROLADOR PID BUSCA QUE EL PROCESO CONSIGA ESTABILIDAD, ES DECIR REDUCE EL ESTADO TRANSITORIO Y AUMENTA EL ESTADO ESTACIONARIO**



## CONCLUSIONES

- ✚ Se concluye que si es posible controlar el nivel de llenado de un sistema de tanques en cascada mediante el Control PID, en una empresa de Tintes.
- ✚ Se concluye que si es posible integrar los sensores y actuadores de un sistema de tanques en cascada, esto es integrando estos elementos al controlador PID.
- ✚ Se concluye que si es posible comprobar el control de nivel de llenado de un sistema de tanques en cascada a través de un controlador PID, esto es mediante el análisis curvas de la variable controlada.

## RECOMENDACIONES

- ✚ Se recomienda analizar desde el punto de vista respuesta a la perturbación el control de nivel de llenado mediante un Controlador Lógico Programable.
- ✚ Se recomienda realizar estudios con sensores de ultrasonido en lugar de sensores de presión, comparando precisión en la detección de las variaciones u oscilaciones de la variable controlada ante cualquier tipo de perturbación.
- ✚ Finalmente se recomienda implementar este prototipo en la empresa de tintes Blue Chemicals para el control de nivel de llenado de tanques en cascada.

## BIBLIOGRAFÍA

- **MOSCOSO, F.** (2014). Automatización del sistema de alimentación de agua hacia calderas usando un control PID, con una alternativa en control FUZZY en el entorno grafico LABVIEW. (Tesis de Pre Grado). Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú.
  
- **POMA, M.** (2014). Diseño e implementación de un sistema de control automático para una máquina texturizadora en la planta de fibras textiles ENKADOR. (Tesis de Pre Grado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
  
- **TEJADA, J.** (2016). Diseño e implementación de prototipo de control de flujo y temperatura para sistema “HVAC” aplicando control multivariable cascada. (Tesis de Pre Grado). Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú.
  
- **ACEDO, J.** (2003). Control Avanzado de Procesos. Madrid, España: CASTILLA DE SANTOS.
  
- **ANGULO, C.** (2004). Tecnologías de sistemas de control. Barcelona, España: POLITEXT
  
- **MANDADO, E.** (2009). Autómatas Programables y Sistemas de Automatización. Barcelona, España: MARCOMBO.

- **RAMIREZ M.** (2013). Diseño e implementación de un controlador PID de temperatura controlado a distancia para un prototipo de incubadora (Tesis de Pre Grado). Universidad de Santa María, Arequipa, Perú.
  
- **SALAS J.** (2008) Control difuso PID de un sistema de control para una grúa puente (Tesis Pre Grado). Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú.
  
- **OGATA K.** (2010). Ingeniería de Control Moderna, Madrid, España: PEARSON.

## BIBLIOGRAFÍA ELECTRÓNICA

- <http://www.sapiensman.com/tecnoficio/docs/doc61.php>
- <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5113/1/T2298.pdf>
- <http://www.dui.uagrm.edu.bo/Informacion/Expociencia2014/1480.pdf>

## **ANEXO**

## PARÁMETROS DE LA PLANTA

- **Sensor:** Dispositivo de medición, el cual es un transmisor de presión diferencial con capacidad para 100psi. El elemento de medición utilizado es un transmisor de presión diferencia Honeywell ST3000 serie 900, modelo STD930. Este dispositivo permite obtener a la salida una señal de corriente de 0 a 10 voltios.
  
- **Planta:** Sistema sobre el cual se requiere hacer el control de nivel. Consta de dos tanques acoplados mediante tubería PVC de 1". El líquido cuyo nivel se desea controlar es agua. Asimismo se emplearon dos tanques previamente contruidos, como medidas de adecuación fue necesaria la instalación de una válvula de paso manual, además de arreglos como el corte de los tanques ya que cada uno tenía una altura de aproximadamente 1.50m y cierre de orificios utilizados para diferentes fines. Luego de la válvula manual, se instaló la válvula proporcional encargada de realizar la acción de control. Para ello se adecuó la tubería mediante el uso de codos de PVC para que la salida de líquido coincidiera con la altura del primer tanque. Para realizar el acople entre los dos tanques, se instaló una tubería de 1" con una válvula de paso manual.

La medición se realiza mediante un sensor piezo-resistivo. Este elemento permite obtener presión diferencial entre 0 y 100psi. Para su uso, fue necesario realizar el cálculo de la máxima presión que se podría obtener en

el tanque sobre el cual deseaba realizar la acción de control (tanque de salida), mediante la ecuación que representa la ley básica de la hidrostática.

$$P = d * g * h$$

Donde P es la presión estática medida por el dispositivo, al tiempo que d representa la densidad del líquido medido, h su altura y g la fuerza de gravitación universal. Así se determinó que la máxima presión posible sería de 100psi; por tal motivo fue indispensable hacer un ajuste del límite superior al mínimo posible, siguiendo las indicaciones del fabricante. Este ajuste de configuración se obtuvo mediante calibración externa empleando el módulo de comunicación HART del dispositivo.

PARÁMETROS		DESCRIPCIÓN
<b>Límite Superior</b>	Psi	100
	bar	7
<b>Rango mínimo</b>	Psi	0
	bar	0