

# **“Diseño e Implementación de un Sistema de Control para un Reactor Químico de Resinas Fenólicas”**

**MSc. Vicky Salazar , MSc. Víctor Sotelo Neyra**

Universidad Nacional de Ingeniería

Sección del Postgrado FIEE

Lima, Perú, L27

srengineeringsolutions@speedy.com.pe, vsotelo@varitek.us

## **Extracto**

En este documento se realiza el diseño e implementación de un sistema de control para un reactor químico, en el cual la parametrización, registro y monitoreo del sistema se efectúa mediante una computadora haciendo uso de un sistema SCADA (Sistema de Control y adquisición de datos) y el control propiamente dicho está a cargo de un microcontrolador de alta performance. Este sistema es capaz de realizar diferentes procesos (“recetas”) para la fabricación de diversos productos químicos. En la presente tesis centramos el estudio en el proceso de fabricación de la resina fenólica tipo novolaca, la misma que se utiliza en grandes cantidades en la industria química peruana, resina que se debe de importar, ya que en el Perú todavía no se fabrica.

La tesis abarca la fabricación de un reactor químico, modelo experimental el que debe ser automatizado para implementar el sistema de control. El reactor fabricado consta de un recipiente de acero inoxidable donde se realizarán las reacciones químicas, sistemas de calentamiento - enfriamiento, condensadores, paletas de agitación, bombas de agua y succión, además

posee sensores de temperatura y actuadores - motores, bombas y electroválvulas - los cuales sirven para automatizar el mismo, cumpliendo los requerimientos necesarios para poder realizar la fabricación de resinas fenólicas.

Durante la ejecución del presente trabajo diseñamos también tarjetas electrónicas acondicionadoras de señal y de control para poder comunicar el microcontrolador con los sensores y actuadores.

El reactor químico automatizado junto con el sistema de control podrá ser utilizado como un reactor de investigación en las entidades educativas o en los laboratorios de la industria, ya que tiene una gran flexibilidad en la ejecución de los diferentes procesos.

## **INTRODUCCIÓN**

Hoy en día el Control de Procesos ha tomado bastante importancia en la Automatización Industrial debido a que los parámetros a controlar interactúan entre sí y deben mantenerse con una exactitud elevada y con una rápida velocidad de respuesta. Por otro lado en muchos casos los parámetros deben ser controlados siguiendo una trayectoria determinada.

A muchas secuencias de control de procesos se les asigna la denominada "Receta", la cual debe ser la estrategia óptima para el control de dicho proceso.

A través del tiempo, el Control de Procesos ha ido adquiriendo cada vez mayor importancia, de manera que se han ido desarrollando diferentes algoritmos de control más y más sofisticados, los cuales deben ser empleados según la aplicación a controlar.

El presente trabajo de Tesis consiste en el “Diseño e Implementación de un Sistema de Control para un Reactor Químico”, en el cual la parametrización, registro y monitoreo del sistema se realizará mediante una computadora y el control propiamente dicho lo realizará un microcontrolador de alta performance. Este sistema deberá ser capaz de realizar diferentes “recetas” para la fabricación de diversos productos químicos. Este documento se centrará en el estudio del proceso de fabricación de Resinas Fenólicas, ya que este producto es bastante utilizado en la industria química peruana y deben importarlo. Si se lograra producir en forma óptima este producto, nos permitiría bajar los precios del mismo y reducir su importación.

A la vez este reactor automatizado, por su gran flexibilidad en la definición de las recetas y su control, podrá ser utilizado como un reactor de investigación en las entidades educativas y/o en los laboratorios de la industria.

## **OBJETIVOS DE LA TESIS**

El objetivo principal de este trabajo de tesis es diseñar e implementar un sistema de control para un reactor químico. Otra de las finalidades es la fabricación de resinas fenólicas haciendo uso de este sistema de control y del reactor químico implementado. Para lograr ambos propósitos, en el desarrollo de la presente tesis se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. Construcción e implementación de un reactor químico.
2. Descripción y definición del proceso (“receta”) de fabricación de resinas fenólicas.
3. Definición de los algoritmos más adecuados para el control de los procesos implicados en la fabricación de las resinas fenólicas.
4. Implementación de la estrategia de control en el microcontrolador.
5. Desarrollo del software SCADA (Software de Control y Adquisición de Datos) en la computadora para la parametrización, control y supervisión del sistema de control del reactor químico.

## **ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO**

En los primeros capítulos se hace referencia a todos los temas relacionados con el diseño e implementación del sistema de control de un reactor químico, para dar al lector un enfoque global de los temas investigados para la ejecución del presente trabajo.

En el capítulo 2 se explica la teoría sobre el Control de Procesos. El reactor automatizado será capaz de fabricar diversos productos químicos, dependerá del usuario la formulación de la receta indicada para el producto determinado, por lo que hablar sobre el control de procesos es interesante para introducir al lector en el tema. Además se hace una explicación sobre los tipos de control y algoritmos implementados.

En el capítulo 3 se desarrolla todo lo referente a los reactores químicos, generalidades, características, tipos de reactores, clasificación, etc.

El capítulo 4 trata sobre los Sistemas de Control existentes, sistemas de control mediante computadoras, haciendo uso de tarjetas de adquisición de datos, y/o mediante microcontroladores. Este capítulo también describe que es un Sistema SCADA, sus características, ventajas, hace mención a los más conocidos y al implementado en el desarrollo del presente trabajo.

En el capítulo 5 se explica lo que es una resina fenólica, su utilidad y su proceso de fabricación.

El capítulo 6 describe el reactor químico implementado para el desarrollo de la presente tesis, explicando asimismo toda la parte mecánica, eléctrica y electrónica, así como la integración entre las mismas. También se describe el programa realizado en el microcontrolador y finalmente el Software SCADA desarrollado para que el usuario pueda manejar el sistema de control del reactor químico de una manera sencilla, esto a través de sus respectivos diagramas de flujo.

En el capítulo 7 se describe toda la instrumentación utilizada en el desarrollo de la tesis, sensores, actuadores y sus respectivas interfaces, tarjetas acondicionadores de señal y el microcontrolador utilizado.

En el capítulo 8 se describe las pruebas realizadas durante la implementación del sistema de control así como la puesta en marcha del mismo.

El capítulo 9 muestra las conclusiones obtenidas luego de realizar el presente trabajo y menciona las recomendaciones necesarias, así como las mejoras que se pueden realizar.

Al final del trabajo se anexan los programas del microcontrolador y del Software EXSCADA.

## **CONTROL DE PROCESOS**

### **2.1 DEFINICIÓN DE UN PROCESO**

Proceso es una palabra, que tiene diferentes significados de acuerdo al área de trabajo en la que se le aplique. En la industria o la tecnología, un proceso es un método o procedimiento seguido para obtener un resultado, el tipo de resultado esperado ayuda a definir el tipo de proceso a considerar.

Un proceso puede ser el conjunto de pasos que gobiernan una transformación química o la combinación de sustancias para obtener nuevos productos, también puede ser, el conjunto de reglas que define una conversión física, mezcla o separación de diversas sustancias bajo efectos de calor o presión. Por ejemplo la conversión de madera a papel blanco se obtiene a través de una serie de procesos químicos haciendo uso de sustancias químicas bajo presión y a una temperatura relativamente alta.

Para un ingeniero que desea construir una planta para producir productos químicos con fines comerciales, pues un proceso viene a ser una secuencia de pasos a seguir para la preparación del producto o la colección de equipos, reactores, tuberías, tanques, columnas de destilación, condensadores, etc., en donde los fenómenos químicos o físicos ocurrirán para la preparación del producto final. Por lo tanto el término “proceso”, para efectos de la presente tesis, se refiere a la “receta” a seguir y a los “utensilios” a utilizar para obtener un nuevo producto.

Un proceso puede ser relativamente simple como en una olla donde se calienta agua hasta obtener vapor, o complejo como una planta petroquímica, la clave principal para obtener un producto con las especificaciones deseadas es poseer una adecuada “receta” y disponer de un buen sistema de control. El tipo de proceso elegido para un producto en particular dependerá de los requerimientos de producción y de las cantidades a producir. Para algunos productos los procesos tipo “batch” son ideales, para otros productos, los procesos continuos son económicamente factibles.

### **Procesos “Batch”**

Los procesos batch son aquellos en donde se realizan sucesivas operaciones físicas o químicas dentro de un mismo reactor o tanque. Un proceso batch se opera de acuerdo a una receta, se mezclan ingredientes dentro de un reactor hasta obtener un producto con las características deseadas.

Los procesos batch se utilizan mayormente para los siguientes productos:

- a) Productos que son producidos bajo diferentes formulaciones pero en cantidades pequeñas, como por ejemplo productos farmacéuticos, perfumes, detergentes, etc.
- b) Productos costosos con mercados limitados o tiempo de vida cortos, como perfumes.

- c) Productos que requieren de una larga fermentación o tiempo de maduración en condiciones sin disturbios, como el vino, la cerveza, el whisky, etc.

Además, muchos procesos químicos se inician en un proceso tipo batch hasta que la demanda del producto crezca y se justifique la obtención de equipos únicamente dedicados a la fabricación del mismo.

Un proceso tipo batch tiene como mínimo dos formas de preparar un producto: la receta batch y la secuencia batch.

Una receta batch consiste en una lista de parámetros como la temperatura de reacción, las cantidades de productos químicos, el tiempo y la presión de reacción y un perfil de condiciones de operación relacionadas con el tiempo.

La secuencia batch define todos los estados necesarios del proceso y el orden en el cual los estados deben proseguir.

Existen tres modos básicos de operación de un proceso batch: manual, semiautomática y automática. En el modo manual, la secuencia es dada por el operador a través de comandos o manipulando equipos desde una consola de operación, presionando botones de arranque o parada para las diversas operaciones. En el modo semiautomático, cada secuencia es iniciada por el operador de modo separado, pero luego el proceso continúa de forma automática siguiendo varios pasos, haciendo uso de controladores como por ejemplo los Controladores de Lógica Programable - "PLC". En el modo automático, cada una de las secuencias es inicializada, o se puede repetir sin intervención del operador, todo dependerá de los parámetros, es decir de la "receta" programada al inicio del proceso.

La ventaja principal de un proceso tipo batch es que el mismo equipo puede ser usado para producir diferentes productos sucesivamente una vez que el recipiente sea limpiado para la siguiente receta. La desventaja es que no se puede producir en grandes cantidades por limitaciones de espacio y que es

necesario la limpieza frecuente de los equipos para la preparación del siguiente producto.

### **Proceso Continuo**

En un proceso continuo un producto es fabricado continuamente día tras día sin interrupciones, excepto por reparaciones de emergencias o por mantenimientos programados periódicamente. Las materias primas ingresan al proceso de manera constante y pasan por una serie de transformaciones sucesivas hasta que el producto queda terminado.

El tipo de control requerido es diferente que un proceso tipo batch. Los controladores deben asegurar que el proceso de operación se mantenga sin perturbaciones durante todo el tiempo que dure el mismo. Mayormente la temperatura, presión, flujo, etc. se mantienen constantes o con variaciones controladas a lo largo del proceso.

### **Proceso Semicontinuo**

Este tipo de proceso es el menos utilizado. Es usualmente requerido para aplicaciones específicas y repetitivas. Como su nombre lo dice, este proceso comparte características de los dos anteriores tipos de proceso, batch y continuo, y requiere dispositivos de control así como temporizadores y controladores programables.

Algunos tipos de procesos (como limpieza de gas, filtros líquidos o centrífugas, tratamiento de agua, etc.) son semicontinuos o cíclicos porque sus tareas son repetitivas por naturaleza. La función de este tipo de proceso es en su mayoría separar componentes del agua, aire, etc.

## **2.2 CONCEPTOS BÁSICOS DEL CONTROL DE PROCESOS**

Un proceso requiere de un número de eventos para tomar lugar en una secuencia en particular de la manera más eficiente y económica. Estos

eventos serán eficientes sólo si los resultados de un evento precedente son siempre predecibles y repetitivos, de tal modo debe requerirse de un mínimo esfuerzo para pasar al siguiente paso de una manera óptima.

En un proceso ideal, todas las entradas son constantes en calidad (por ejemplo, composición, temperatura y presión) y en cantidad. Cada paso del proceso tiene parámetros fijos y constantes, como porcentaje de calentamiento, características de fluido constante, etc. El proceso funciona correctamente y produce siempre productos de calidad. En la realidad los procesos nunca son ideales y nunca funcionan en un estado constante durante largos períodos de tiempo. Existe toda clase de perturbaciones en las condiciones de operación del proceso, alimentación de la materia prima, proporciones de flujo, condiciones climáticas, y así sucesivamente; debido a estas variaciones dinámicas, las propiedades deseadas del producto final varían.

Las variaciones pueden ocurrir de manera brusca (por ejemplo, cuando la materia prima de una composición es sustituida de repente por otra en un proceso) o de manera lenta cuando poco a poco se va reemplazando las proporciones de la materia prima hasta quedarse con la deseada. Algunas variaciones son dadas por la naturaleza, como por ejemplo la temperatura del ambiente durante el día o durante el año. Otras variaciones son instantáneas y ocurren solo por tiempos muy cortos. Las variaciones en el producto son causadas no solo por fuerzas externas sino también por deterioración de la maquinaria que fabrica el producto como bombas, tanques, intercambiadores de calor, etc. Si un proceso se deja que funcione por si mismo sin una supervisión y sin una manipulación de sus variables, puede que sea afectado de tal manera que se deba parar la producción lo que originaría pérdidas en la planta, por lo que se debe tomar acciones preventivas.

Hoy en día los procesos industriales no son capaces de funcionar sin el uso de sistemas automáticos de control los cuales monitorean las variaciones que se manifiestan y reaccionan cambiando los parámetros que deben controlar. Los procesos deben ser controlados por varias razones:

1. Para eliminar o reducir el error humano mientras se opera una planta, por consiguiente se da mayor seguridad a los operarios y calidad al producto final.
2. Para reducir la cantidad de trabajo y los costos de mano de obra, los cuales incrementan el costo del producto.
3. Para minimizar el consumo de energía.
4. Para mejorar la calidad del producto.
5. Para reducir el tamaño de la planta y la capacidad de los almacenes.
6. Para disminuir los niveles de contaminación en el proceso de producción.

Los sistemas automáticos de control permiten al operador liberarse de las tareas tediosas y repetitivas de monitoreo y ajuste manual de los parámetros del proceso y les permite tener más tiempo para supervisar las condiciones de operación de las máquinas, realizar tareas de mantenimiento y trabajar en la optimización de las operaciones de la planta.

El diseño de un proceso siempre se inicia asumiendo que el proceso operará bajo condiciones balanceadas, es decir que funcionará siempre bajo las condiciones diseñadas. Un proceso se dice que se encuentra en condiciones balanceadas cuando la suma de todos los fluidos entrantes es igual a la suma de todos los fluidos salientes. Lo mismo se aplica para la energía entrante y saliente. Cualquier cambio en las condiciones de una de las entradas sea de material o de energía y que no este acompañado de una variación apropiada a la salida, desbalanceará el proceso.

Un desequilibrio del proceso se manifestará de varias maneras. De repente en el cambio del nivel de un tanque, en la variación de una temperatura, etc. Algunos procesos tienen una capacidad inherente para limitar los efectos de las variaciones externas, es decir que en caso el proceso se desequilibre, los parámetros se configuran automáticamente para regresar al mismo a un estado balanceado. La habilidad inherente de auto balancear el proceso con certeza, es llamada "auto regulación"

La mayoría de procesos no son totalmente inmunes a las perturbaciones externas a pesar de ser autorregulables. Incluso en los mejores diseños y en los procesos relativamente nuevos no se puede mantener el modo de operación deseado indefinidamente. Es por consiguiente necesario asegurar que el balance de materiales y de energía entre las entradas y las salidas permanezcan bajo control siempre. Un control automático puede ser definido como un mecanismo que monitorea los valores de las variables de un proceso y opera para mantener a esta variable lo más similar a la predefinida. Así. La función principal de un control de procesos automático es manipular la relación de material o energía para mantener las variables del proceso sin desviaciones considerables.

Finalmente se puede concluir, que el objetivo del sistema de control automático de un proceso es utilizar la variable manipulada para mantener la variable controlada en el setpoint a pesar de las perturbaciones.

## **2.3 ESTRATEGIAS TRADICIONALES DE CONTROL DE PROCESOS**

### **Lazo de Control de un Proceso**

En la figura 01 se ilustra un tanque de agua caliente que recibe agua con una temperatura variable, probablemente dependiendo de la estación del año o de otro factor, la temperatura no es constante. El tanque sin embargo tiene como salida agua caliente a una temperatura fija, la cual se mantiene constante debido al ingreso de vapor caliente por las tuberías del tanque. La cantidad de vapor inyectado dependerá de la diferencia entre la temperatura leída y el setpoint ingresado al inicio del proceso. Un sensor de temperatura ubicado en el interior del tanque permite a un controlador obtener la temperatura del tanque y ordenar la apertura o cierre de la válvula de vapor con la finalidad de mantener la temperatura constante. El conjunto de elementos que contribuyen al control automático de la temperatura de salida es conocido como un lazo de control. La combinación de funciones como medición de temperatura, transmisión de la medición, la comparación entre la

medición y el setpoint, la decisión de la acción correctiva para otras variables y la implementación actual de la acción correctiva a través de la válvula de control son conocidos como “lazo de control”

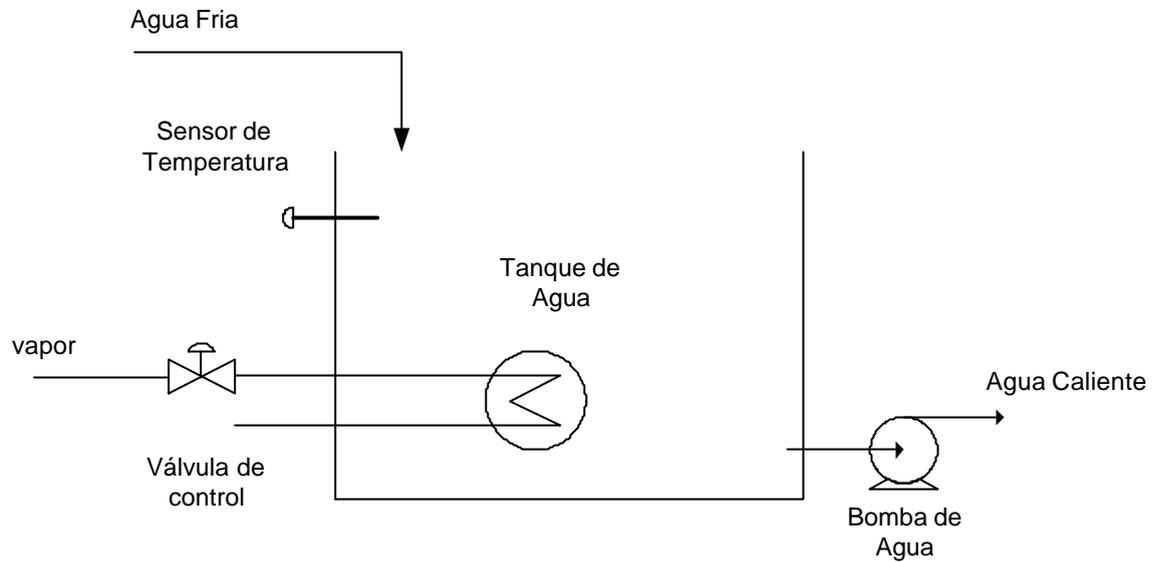


Figura 01: Tanque de agua y Lazo de control de temperatura

La figura 02 presenta mediante un diagrama de bloques la relación entre las diversas señales.

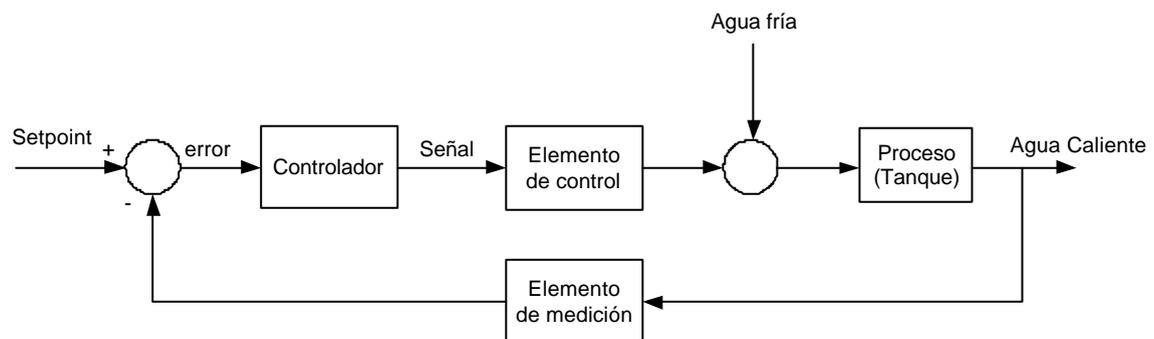


Figura 02. Diagrama de bloques del lazo de control de un tanque de agua

## Elementos de Control

Cada lazo de control consiste de por lo menos 4 elementos fundamentales, los cuales trabajan juntos para controlar variables deseadas.

1. Un sensor
2. Un elemento de transmisión
3. Un controlador
4. Un elemento de control final (Actuador)

El sensor es la unidad que detecta el cambio en el proceso realizando la medición. En el ejemplo anterior es el sensor de temperatura.

Un elemento de transmisión recibe la señal del sensor y la convierte en una señal diferente la cual puede ser transmitida hacia el controlador, también se conocen como circuitos acondicionadores de señal.

La señal recibida del elemento de transmisión es comparada con un valor predeterminado (setpoint) dentro de un controlador, el cual a través de funciones programadas envía señales hacia el elemento de control final para realizar cambios en el proceso.

El elemento de control final puede ser una unidad modulada, la cual cambiará proporcionalmente de acuerdo a la señal recibida del controlador (señal analógica) o también puede ser un elemento de dos posiciones on/off. El lazo de control finaliza en el elemento de control final.

### **Lazo Abierto y Lazo Cerrado**

Los sistemas de control se clasifican en sistemas de lazo abierto y de lazo cerrado. La distinción la determina la acción de control, que es la que activa al sistema para producir la salida.

Un sistema de control de lazo abierto es aquel en el cual la acción de control es independiente de la salida. Un sistema de control de lazo cerrado es aquel en el que la acción de control es en cierto modo dependiente de la salida.

Los sistemas de control de lazo abierto tienen rasgos sobresalientes. La habilidad que éstos tienen para ejecutar una acción con exactitud está

determinada por su calibración. Calibrar significa establecer o restablecer una relación entre la entrada y la salida con el fin de obtener del sistema la exactitud deseada. Estos sistemas no tienen el problema de la inestabilidad, que presentan los de lazo cerrado.

Los sistemas de control de lazo cerrado se llaman comúnmente sistemas de control por realimentación.

Por ejemplo, un tostador automático es un sistema de control de lazo abierto, que está controlado por un regulador de tiempo. El tiempo requerido para hacer tostadas, debe ser anticipado por el usuario, quien no forma parte del sistema. El control sobre la calidad de la tostada (salida) es interrumpido una vez que se ha terminado el tiempo, el que constituye tanto la entrada como la acción de control.

Otro ejemplo sería, el de un mecanismo de piloto automático y el avión que controla, los cuales forman un sistema de control de lazo cerrado (por realimentación). Su objetivo es mantener una dirección específica del avión, a pesar de los cambios atmosféricos. El sistema ejecutará su tarea midiendo continuamente la dirección instantánea del avión y ajustando automáticamente las superficies de dirección del mismo (timón, aletas, etc.) de modo que la dirección instantánea coincida con la especificada. El piloto u operador, quien fija con anterioridad el piloto automático, no forma parte del sistema de control.

El lazo de control realimentado simple sirve para ilustrar los cuatro elementos principales de cualquier lazo de control explicados en el ítem anterior. Ver figura 03.

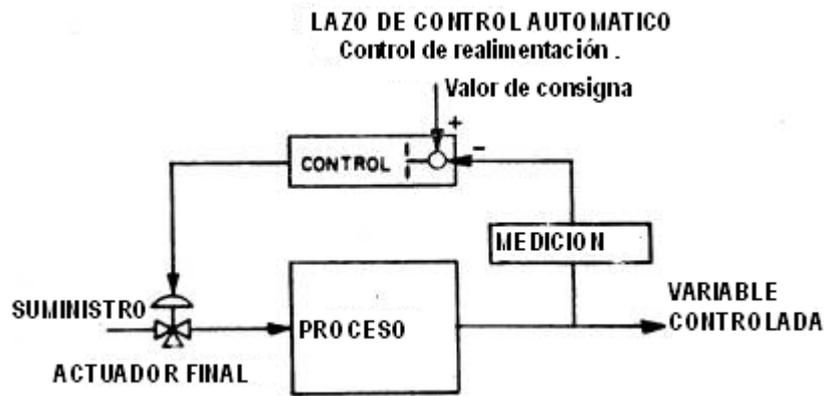


Figura 03. Lazo de control realimentado.

La medición debe ser hecha para indicar el valor actual de la variable controlada por el lazo.

La realimentación es la propiedad de un sistema de lazo cerrado que permite que la salida (o cualquier otra variable controlada del sistema) sea comparada con la entrada al sistema (o con una entrada a cualquier componente interno del mismo con un subsistema) de manera tal que se pueda establecer una acción de control apropiada como función de la diferencia entre la entrada y la salida.

Generalmente se dice que existe realimentación en un sistema cuando existe una secuencia cerrada de relaciones de causa y efecto entre las variables del sistema. El concepto de realimentación está claramente ilustrado en el mecanismo del piloto automático del ejemplo dado. La entrada es la dirección especificada, que se fija en el tablero de control del avión y la salida es la dirección instantánea determinada por los instrumentos de navegación automática. Un dispositivo de comparación explora continuamente la entrada y la salida. Cuando los dos coinciden, no se requiere acción de control. Cuando existe una diferencia entre ambas, el dispositivo de comparación suministra una señal de acción de control al controlador, o sea al mecanismo de piloto automático. El controlador suministra las señales apropiadas a las superficies de control del avión, con el fin de reducir la diferencia entre la entrada y la salida. La realimentación se puede efectuar por medio de una

conexión eléctrica o mecánica que vaya desde los instrumentos de navegación que miden la dirección hasta el dispositivo de comparación.

Una ventaja del sistema de control de lazo cerrado es que el uso de la retroalimentación hace que la respuesta del sistema sea relativamente insensible a perturbaciones externas y variaciones internas de parámetros del sistema. De este modo, es posible utilizar componentes relativamente imprecisos y económicos, y lograr la exactitud de control requerida en determinada planta, cosa que sería imposible en un control de lazo abierto

Desde el punto de vista de la estabilidad, en el sistema de control de lazo abierto, ésta es más fácil de lograr, ya que en él, la estabilidad no constituye un problema importante. En cambio, en los sistemas de lazo cerrado, la estabilidad sí es un problema importante, por su tendencia a sobre corregir errores que pueden producir oscilaciones de amplitud constante o variable.

Los rasgos más importantes que la presencia de un control de lazo cerrado imparte a un sistema son:

- a) Aumento de la exactitud, la habilidad para reproducir la entrada fielmente.
- b) Reducción de la sensibilidad de la salida, correspondiente a una determinada entrada, ante variaciones en las características del sistema.
- c) Efectos reducidos de la no linealidad y de la distorsión.
- d) Aumento del intervalo de frecuencias (de la entrada) en el cual el sistema responde satisfactoriamente.
- e) Tendencia a la oscilación o a la inestabilidad.

## **Algoritmos de Control**

El hardware dentro de un elemento de control puede ser construido o configurado de muchas maneras para obtener diferentes relaciones entre la respuesta del controlador y el error detectado en el proceso. La relación entre

el error y la salida del controlador es llamada “acción” o “modo”. A esta relación también se le puede determinar “algoritmo de control”. Dependerá del algoritmo programado o elegido para obtener una mejor respuesta ante una señal errada.

Los modernos controladores industriales están diseñados para producir uno o la combinación de los siguientes modos de control:

1. Control On – off (dos posiciones)
2. Control Proporcional
3. Control Derivativo
4. Control Integral

En la industria se utilizan mayormente combinaciones de estos modos de control como, proporcional integral, o proporcional integral derivativo.

Un algoritmo de control reconoce la existencia, el tamaño, dirección y la velocidad de la señal de error y actúa para determinar el cambio en la salida del controlador para minimizar el error.

### **Control ON-OFF**

El control ON-OFF es el más simple y el más económico modo de control de lazo cerrado. Los controladores ON-OFF comparan la señal medida con la dada en el setpoint y dan la orden al actuador para moverse de una posición determinada a otra posición determinada. Las posiciones del actuador, como una válvula en una línea de vapor de un tanque de calor, son totalmente abierto o totalmente cerrado. Un controlador ON-OFF no puede hacer correcciones precisas y no se logra llevar al proceso a un estado estable.

Por ejemplo en un control de temperatura de un refrigerador, si la temperatura medida es mayor a la temperatura de setpoint entonces se apagará el compresor, y en caso que la temperatura real sea menor que la temperatura de setpoint entonces el compresor deberá encenderse.

## Control Proporcional

Este tipo de control es el más simple. La señal de salida del controlador (la acción correctiva) es igual a una constante multiplicada por la diferencia entre la señal medida de la variable a controlar y el setpoint deseado, a lo cual se añade un valor constante. La siguiente ecuación representa el modo de control proporcional:

$$\text{Salida} = K_p e + p_o$$

Donde:

$K_p$  = la constante de proporcionalidad o la ganancia proporcional

$e$  = el error o diferencia entre el setpoint y el valor de la variable medida

$p_o$  = la salida del controlador cuando no existe diferencia entre el setpoint y la variable medida.

Sin importar el mecanismo en sí ni la potencia que lo alimenta, el controlador proporcional es esencialmente un amplificador con ganancia ajustable.

## Control Integral

En un controlador con acción de control integral, el valor de la salida del controlador varía en razón proporcional a la señal de error, es decir:

$$\text{Salida} = K_i \int e dt$$

donde  $K_i$  es una constante ajustable. Mientras que el error sea positivo, la señal de salida del controlador se incrementará. Cuando el error empiece a disminuir y se vuelva negativo, el valor de la integral del error se reducirá y la señal de salida del controlador decrecerá. Ante un error igual a cero, el valor de la salida permanece constante. En ocasiones la acción de control integral recibe el nombre de control de restablecimiento (reset).

## Control Derivativo

La acción del control derivativo es proveer una salida para el controlador, la cual sea proporcional al porcentaje de cambio del error para el setpoint. La salida del controlador es gobernada por la ecuación:

$$\text{Salida} = K_d \frac{d}{dt} e$$

La acción derivativa por si sola, no es capaz de controlar un proceso porque no reconoce un error constante para el setpoint, es decir la derivada de una constante es igual a cero, lo que ocasionaría un cambio repentino en la variable de control la cual sería una señal de salida “infinita” para el controlador y causaría que el elemento de control final adopte una señal totalmente abierta o totalmente cerrada.

Podemos resumir lo anteriormente explicado mencionando que un control proporcional reducirá el tiempo de elevación hacia el setpoint indicado minimizando pero no eliminando el error en estado estacionario. El control integral, tendrá el efecto de eliminar el error en estado estacionario pero puede empeorar la respuesta transitoria. Un control derivativo incrementa la estabilidad del sistema, reduciendo el sobrepico y mejorando la respuesta transitoria. Los efectos de cada uno de los controladores PID en un sistema de lazo cerrado se pueden resumir de la siguiente manera:

	<b>Tiempo de Subida</b>	<b>Sobrepico</b>	<b>Tiempo de establecimiento</b>	<b>Error</b>
<b>K<sub>p</sub></b>	Baja	Sube	Poco Cambio	Baja
<b>K<sub>i</sub></b>	Baja	Sube	Sube	Elimina
<b>K<sub>d</sub></b>	Poco Cambio	Baja	Baja	Poco cambio

## Comparación de las combinaciones de los modos de control

Los modos de control de forma individual no se usan separadamente, cada modo de control tiene propiedades independientes que se complementan cuando se combinan. Ocasionalmente, el modo de control proporcional se usa por si solo.

Control Proporcional.- Este tipo de control, descrito anteriormente, es el modo de respuesta más básico de los controladores automáticos. Tiene la respuesta en el tiempo más rápida a los cambios en el setpoint y responde inmediatamente ante cambios en las condiciones de operación. Sin embargo, este tipo de control es adecuado sólo para sistemas que tiene poca capacidad y donde un offset no es crítico.

Control Proporcional Integral.- El control integral se usa rara vez solo ya que tiene una velocidad de respuesta muy lenta ante los cambios. Sin embargo es frecuente combinarlo con un control proporcional donde la respuesta se hace más rápida. La salida del controlador es definida por la siguiente ecuación:

$$\text{Salida} = K_p e + K_i \int e dt + p_o$$

Donde  $K_i = \frac{K_p}{T_i}$ ,  $K_p$  es la ganancia proporcional y  $T_i$  es el tiempo integral.

Ambos valores  $K_p$  y  $T_i$  son ajustables. El tiempo integral regula la acción de control integral, mientras que una modificación en  $K_p$  afecta tanto a la parte integral como a la proporcional de la acción de control.

El efecto de la combinación de la acción proporcional y la acción integral asegura una respuesta inmediata a la salida ante un cambio y la eliminación del offset debido a la acción integral, haciendo que el error sea cero.

Control Proporcional Derivativo.- La acción de control proporcional derivativo se define por la siguiente ecuación:

$$\text{Salida} = K_p e + K_d \frac{de}{dt}$$

Donde  $K_d = K_p T_d$ ,  $K_p$  es la ganancia proporcional y  $T_d$  es una constante denominada tiempo derivativo o tiempo de adelanto. Ambos parámetros son regulables. La acción de control derivativa, a veces llamada control de velocidad, se presenta cuando el valor de salida del controlador es proporcional a la velocidad de variación de la señal de error. El tiempo derivativo  $T_d$  es el intervalo de tiempo en el que la acción de derivación se adelanta al efecto de la acción proporcional. La acción derivativa tiene una característica anticipatorio, sin embargo es obvio que no se puede anticipar a algo que aún no acontece. Ya que la acción derivativa se anticipa tiene la ventaja de anticiparse al error, sus desventajas son que amplifica las señales de ruido y produce un efecto de saturación en el actuador. Como se explicó anteriormente, nunca se usará un control derivativo individualmente, ya que este control sólo es efectivo durante períodos transitorios.

Control Proporcional, Integral y Derivativo.- La combinación de los efectos de acción proporcional, integral y derivativa, se denomina acción de control proporcional-integral-derivativa (PID). Esta combinación tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de control con esta acción de control es:

$$\text{Salida} = K_p e + \frac{K_p}{T_i} \int e dt + K_p T_d \frac{de}{dt}$$

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

### **Reglas de Sintonía de Controladores PID**

Es interesante mencionar que más de la mitad de los controladores industriales utilizados en el control de procesos utilizan un esquema de control PID o PID modificado.

Si se puede obtener un modelo matemático de la planta a controlar, es posible aplicar diversas técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumpla las especificaciones del transitorio y del estado estacionario del sistema en lazo cerrado. Sin embargo si la planta es tan complicada que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un método analítico para el diseño de un controlador PID. En este caso se debe recurrir a procedimientos experimentales para la sintonía de los controladores PID.

El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de comportamiento dadas se conoce como sintonía del controlador. La sintonía de un algoritmo de control consiste en seleccionar valores adecuados para sus parámetros. Por tanto, para el caso del controlador PID se trata de calcular los valores idóneos de sus parámetros ( $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ) de forma que se asegure que el sistema completo se comporta siguiendo unas especificaciones previamente definidas.

En las primeras aplicaciones de control PID el ajuste se basaba únicamente en la propia experiencia del operario o simplemente se utilizaban los ajustes del fabricante. En 1942, Ziegler y Nichols propusieron técnicas empíricas que tuvieron una buena aceptación y que han servido de base a métodos más recientes.

Los métodos empíricos o experimentales de ajuste de parámetros están especialmente orientados al mundo industrial, donde existen grandes dificultades para obtener una descripción analítica de los procesos. Constan fundamentalmente de tres pasos:

- Paso 1: Estimación de ciertas características de la dinámica del proceso a controlar. La estimación se puede efectuar en lazo abierto o en lazo cerrado.
- Paso 2: Cálculo de los parámetros del controlador. Para ello se aplican las fórmulas de sintonía, que son relaciones empíricas entre los

parámetros del controlador elegido, las características del proceso estimadas en el paso anterior y la respuesta deseada del sistema.

- Paso 3: Dado que los métodos permiten estimar valores aproximados para los parámetros del controlador, normalmente será necesario un tercer paso (ajuste fino de los parámetros), mediante observación de la respuesta del sistema en lazo cerrado.

Las diferencias entre los distintos métodos empíricos citados radican básicamente en la forma de combinar la técnica de estimación y las características de la respuesta que se desea obtener.

A continuación se verá una técnica de sintonía muy conocida cómo son las *fórmulas de Ziegler y Nichols*.

Estas fueron las fórmulas pioneras y formaron parte de un completo procedimiento heurístico de ajuste de controladores PID, en unos años (1942 y 1943) en los que los usuarios de los primeros reguladores industriales de Taylor Instrument necesitaban de alguna metodología para sacarles el máximo rendimiento a los equipos que estaban instalando. Ziegler y Nichols presentaron sus tan conocidas fórmulas de sintonía, recogidas en la tabla 01, para controladores P, PI y PID. Las fórmulas de Ziegler y Nichols contienen las siguientes reglas heurísticas:

1. Las constantes de tiempo integral y derivativo se fijan únicamente en función del período de la oscilación mantenida o del retardo observado en el proceso.
2. La ganancia proporcional se fija en función únicamente de la ganancia crítica o normalizada a la ganancia del proceso en función de la razón  $T_p/T_o$ .
3. Cuando el controlador es PID siempre se emplea una constante de tiempo derivativa igual a un cuarto de la constante de tiempo integral, con independencia de las características que tenga el proceso.

Existen varios métodos para hallar los parámetros básicos con los cuales luego haciendo uso de la tabla 01 se pueden hallar los parámetros PID.

Los métodos más conocidos son el método de la oscilación mantenida y el método del relé.

El método de la oscilación mantenida, propuesto por Ziegler y Nichols en 1942, consiste en:

- Cerrar el lazo de control con el controlador en modo proporcional únicamente.
- Con la ganancia proporcional  $K_p$  a un valor arbitrario, provocar pequeños cambios bruscos en el punto de consigna y observar la respuesta del sistema.
- Aumentar o disminuir  $K_p$  hasta conseguir en el paso anterior que el sistema oscile con una amplitud constante. Anotar el valor de la ganancia proporcional en ese instante como  $k_c$ , y medir el período de la oscilación mantenida  $t_c$ .

El método del relé, propuesto por Aström y Hägglund en 1984, es una forma indirecta de automatizar el método de la oscilación mantenida, consiste en provocar un ciclo límite mediante la inclusión en el lazo de control de un elemento no lineal como es el relé, este ciclo límite tendrá aproximadamente el mismo período  $t_c$  que la oscilación mantenida. Para conseguirlo es conveniente utilizar un relé con histéresis, cuyas características serán la amplitud  $d$  y la anchura  $e$  de la histéresis, y operar como sigue:

- Llevar al proceso a un estado estacionario ya sea en modo manual o en modo automático con el controlador PID (aunque no se disponga todavía de un buen ajuste para el controlador). Anotar los valores de la señal de control y de la salida del proceso en esta situación.
- Cerrar el lazo de control utilizando como controlador al relé y como consigna el valor del estado estacionario observado en la salida del

proceso, pero sumando en todo momento la acción de control (que genera el relé) con la señal de control que se utilizó para llevar al proceso a un estado estacionario.

- Observar la respuesta del proceso y parar la experiencia cuando se haya alcanzado el ciclo límite. Se puede considerar que éste se ha alcanzado si el máximo de la salida repite el mismo valor en al menos dos ciclos seguidos.
- Anotar la amplitud (de pico a pico) del ciclo límite como  $a$ , y medir el período del ciclo límite ( $t_c$ ).
- Determinar la ganancia crítica del proceso mediante la expresión:

$$k_c = \frac{4d}{\pi \sqrt{a^2 - \varepsilon^2}}$$

Controlador	Parámetros	Lazo cerrado	Lazo abierto
P	$K_p$	$0.5 k_c$	$\frac{T_p}{K T_o}$
PI	$K_p$	$0.45 k_c$	$0.9 \frac{T_p}{K T_o}$
	$T_i$	$\frac{t_c}{1.2}$	$\frac{T_o}{0.3}$
PID	$K_p$	$0.6 k_c$	$1.2 \frac{T_p}{K T_o}$
	$T_i$	$\frac{t_c}{2}$	$2 T_o$
	$T_d$	$\frac{t_c}{8}$	$0.5 T_o$

Tabla 01: Fórmulas de sintonía de Ziegler y Nichols

### Nuevo método de Sintonización para controladores PID:

Tal como se puede observar los métodos mencionados para obtener los parámetros PID de un controlador son tediosos y muchas veces originan pérdidas de tiempo y dinero, actualmente los investigadores de la empresa

alemana PMA Prozeß- und Maschinen-Automation GmbH, han desarrollado un nuevo método de sintonización (con la finalidad de hallar automáticamente los parámetros de control PID), denominado PMA Tune. Este método de autosintonía garantiza a un usuario sin experiencia obtener rápidamente óptimos parámetros de control para iniciar su proceso. En la implementación de la presente tesis se utiliza este método de autosintonía para encontrar automáticamente los parámetros PID del controlador, para los diversos productos y cantidades que se deseen fabricar.

Para este método de autosintonización, se debe graficar la curva de respuesta (0 a 100%), lo que es casi imposible por motivos de tiempo y dinero, sin embargo analizando la figura 04, se observa que podemos hallar los parámetros ya sea utilizando  $X_{max}$  y  $T_g$  (curva total) ó  $T_u$  y  $\Delta x$  (curva parcial), de ambas formas se determina  $V_{max}$ .

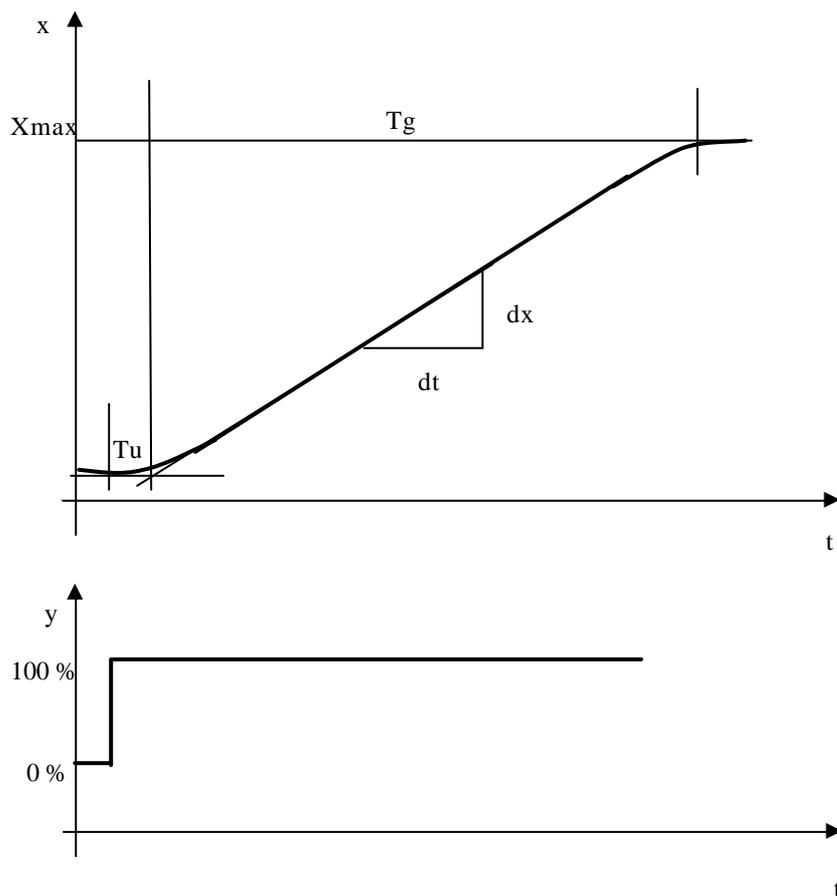


Figura 04. Curva de Respuesta

Vmax, es la pendiente de la curva y se halla de la siguiente manera:

$$V_{\max} = X_{\max} / T_g = \Delta x / \Delta t.$$

Los parámetros de control se determinarán, a partir de Vmax, hallado a través de la curva anterior, el tiempo de retardo Tu y la constante K, de acuerdo a las fórmulas dadas en la tabla 02.

$$K = V_{\max} * T_u$$

Controlador	Pb	Td	ti
PID	1,7 * K	2 * Tu	2 * Tu
PD	0,5 * K	Tu	OFF
PI	2,6 * K	OFF	6 * Tu
P	K	OFF	OFF

Tabla 02: Fórmulas de la empresa alemana PMA