

CONCEPTOS GENERALES SOBRE EL DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL

HERNÁN DARÍO ALVAREZ Z

Ing. Químico, Magister en Ing. de Sistemas

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Facultad de Minas, Departamento de Procesos Químicos

RESUMEN

Este trabajo muestra un grupo de conceptos generales sobre diseño de sistema de control. Se mencionan todos los aspectos de esta tarea y se presenta una breve explicación para cada uno de ellos, dando particular importancia a las posibles recomendaciones generales útiles durante el diseño del proceso, el diseño del sistema de control y una tarea integrada que desarrolla al mismo tiempo el diseño del proceso y el diseño del sistema de control. Al final, se expone un ejemplo de automatización y control usando una aplicación real sobre un proceso de teñido de hilos.

PALABRAS CLAVES:

Diseño del sistema de control, Control del Proceso, Diseño del proceso, Proceso de teñido.

ABSTRACT

This work shows a group of general concepts on control systems design. All the aspects of this task are mentioned and a brief explanation is presented for each one of them, giving particular importance to the possible general recommendations useful during the process design, control system design and an integrated task that develops at the same time process design and control system design. At the end, an example of automation and control system design is exposed using a real application on a yarn dying process.

KEYWORDS:

Control System Design, Process Control, Process Design, Dying process.

1. INTRODUCCION

Si bien los últimos quince años han visto el surgimiento de una serie de herramientas de control nuevas, todas apoyadas en la potencia del computador, los conceptos fundamentales sobre el diseño de sistemas de control, permanecen casi intactos desde mediados de este siglo. En esos años, apoyados en los análisis en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo, se postularon una serie de criterios y especificaciones de diseño que hoy siguen vigentes. De otro lado, la teoría de control moderna, al aportar el análisis de los procesos a partir de variables de estado, permitió el diseño de sistemas de control óptimo, de una manera preconcebida. Para ello, usa los conceptos de observabilidad y controlabilidad, que califican la posibilidad de determinar los estados del sistema basándose en la medida de sus salidas, y posteriormente determinar si con estas señales observadas, es posible lograr el control del sistema. Esta revolución hizo que el diseño del sistema de control pasara de un procedimiento de tanteo y error a un procedimiento de preconcepción.

Con toda la carga de renovación que el control moderno trajo, alteró poco los conceptos generales sobre el diseño del sistema de control, existentes hasta ese momento, aunque agregó más configuraciones de controlador al abanico de posibilidades disponibles para el diseñador. Vale destacar como hoy existen herramientas computacionales bastante potentes para el diseño de sistemas de control, con las cuales, se ha acortado la brecha entre la gran cantidad de cálculos y tanteos de configuraciones, propias del control tradicional, y la

evaluación previa de una estructura de control y su calificación como apta o no, propia del control moderno. Esto último, refuerza más la existencia de un grupo de conceptos sobre diseño de sistemas de control, que pueden ponerse juntos en un sólo lugar y usarlos como guía general cuando se aborda esta tarea. Precisamente, aquí se pretende presentar algunos de estos conceptos, sin ser exhaustivos pero haciendo énfasis en los aspectos que conciernen a la ingeniería del proceso y dentro de ella a la concepción del sistema de control como parte integral del proceso y no como un apéndice de este.

2. OBJETIVOS Y PASOS DEL DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL

Cuando se aborda el diseño de un sistema de control para un proceso o una planta como un todo, deben tenerse presentes ciertos objetivos y unos pasos mínimos a seguir hasta alcanzar dichos objetivos. Fundamentalmente, solo existen dos objetivos globales que implican una estrecha relación entre el conocimiento sobre la operación del proceso y del comportamiento de los sistemas de control disponibles:

- 1- Encontrar una estructura de control que sea efectiva para el proceso particular
- 2- Diseñar un proceso controlado que resulte de fácil manejo y comando

Por su parte, en el diseño de un sistema de control pueden distinguirse cuatro pasos comunes:

- 1- Caracterizar el comportamiento del proceso.
- 2- Fijar las especificaciones para el diseño.
- 3- Determinar la configuración del sistema de control a usar.
- 4- Ajustar los parámetros del sistema de control para lograr los objetivos de diseño.

A continuación se exponen en detalle estos pasos, a fin de conformar todo el panorama del diseño. Debe dejarse en claro que es práctica común abordar

primero el diseño del proceso y luego, cuando todo el proceso está absolutamente dimensionado y en ocasiones montado, se enfrenta la tarea de diseño del sistema de control. Si bien esto por lo general lleva a sistemas de control operativos, no siempre son los sistemas de control óptimos, tanto por costo como por cumplimientos de los criterios de diseño. Resulta evidente que la única manera de lograr un proceso controlado, muy cercano en su operación al punto óptimo, es abordar simultáneamente el diseño del proceso y el diseño del sistema de control, con lo cual se logra la síntesis de un sistema de control totalmente ajustado al proceso, puesto que se pueden variar los valores de diseño para los equipos (siempre obtenidos en un análisis de la operación en estado estable), para aumentar la facilidad y la flexibilidad en el control. Este tipo de síntesis integrada del sistema de control y del proceso, es todavía motivo de estudio y requiere unas bases matemáticas que sobrepasan la temática de este trabajo². Aquí solo se hace una mención al tópico, abordándose el enfoque tradicional del diseño del sistema de control después del diseño del proceso.

3. CARACTERIZACION DEL COMPORTAMIENTO DEL PROCESO

Un aspecto crucial para fijar las especificaciones de diseño del sistema de control y determinar en alguna medida el grado de dificultad de la tarea de diseño, es la caracterización del proceso. Aunque este aspecto tiene bastantes facetas, existen tres tópicos fundamentales que permiten ganar una idea sobre el proceso. Estos son: carácter multivariable, respuesta en términos de linealidad y variaciones temporales en los parámetros del modelo del proceso.

3.1 CARÁCTER MULTIVARIABLE

Dentro del intervalo de operación normal de un proceso, la mayoría de interacciones y relaciones entre variables pueden llevarse a una relación sencilla de entrada Simple (una sola) y salida Simple (una sola) o sistema SISO, el cual es el caso más fácil de manejar, cuando se compara con la realidad de la mayoría de procesos, que presentan interrelaciones grandes entre las variables involucradas, con lo cual se

genera un sistema de entrada Múltiple (dos o más) y salida Múltiple (dos o más) o sistema MIMO. A la hora de la selección del sistema de control, este aspecto debe estar totalmente claro, puesto que si se olvida el carácter MIMO, el controlador SISO que se implante puede resultar totalmente ineficiente y mucho mas costoso operativamente que su contraparte MIMO.

Una recomendación general es determinar el grado de importancia (desde la dinámica del proceso), de cada una de las variables involucradas, que se toman como entradas y las que se toman como salidas. Así, se puede establecer un mapa de Entrada-Salida (ES) para describir cualitativamente la dinámica del proceso y determinar el carácter SISO o MIMO del proceso controlado. En la Figura 1 se ve una representación típica de un proceso, con las señales presentes en él, que permiten abordar su modelación y control. La nomenclatura usada denomina U al vector de entradas de control al proceso o variables manipuladas; V al vector de entradas no controladas que es una perturbación debida a la incertidumbre en la dinámica del sistema; W al vector de entradas no controladas que es una perturbación debida a la incertidumbre en las mediciones, y X al vector que refleja los estados del sistema. De este modo, cualquier sistema puede representarse mediante dos formulaciones vectoriales:

Ecuación de Estado (Ec. Diferencial)

$$\dot{X}(t) = f [X(t), U(t), V(t)]$$

Ecuación de Salida (Ec. Algebraica)

$$Y(t) = g [X(t), U(t), V(t), W(t)]$$

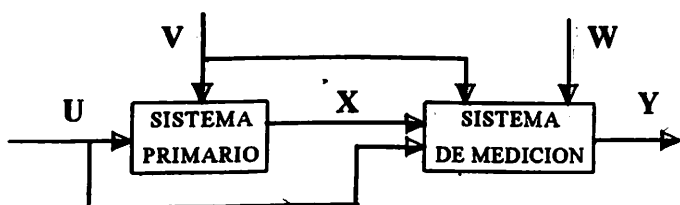


Figura 1. Diagrama general de un sistema con medición

3.2 RESPUESTA DEL PROCESO EN TÉRMINOS DE LINEALIDAD

Este aspecto es de vital importancia cuando se piensa en el tipo de sistema de control que se usará. Si bien,

un proceso cuya respuesta pueda considerarse lineal, invita al diseño de sistemas de control lineales, puede verse beneficiado por un sistema de control no lineal, que paradójicamente y dependiendo de la complejidad del proceso, puede hacer el mismo trabajo con menos elementos y menos cálculo para la acción de control. Por su parte un proceso no lineal, por lo general requiere sistemas de control que consideren esta característica, a fin de obtener el mejor control posible.

Se dice que un proceso es lineal cuando ante una entrada en escalón de cualquier amplitud, su respuesta siempre presenta una amplitud proporcional a la de la entrada. Esto permite describir la salida como una suma de respuestas impulso por el principio de superposición⁴. Este tipo de procesos normalmente están descritos por Ecuaciones Algebraicas Lineales (EAL) o por Ecuaciones Diferenciales Lineales (EDL) de cualquier orden o por combinaciones de EAL y EDL. Por su parte, un proceso tiene un comportamiento no lineal cuando no es aplicable el principio de superposición, por lo tanto la magnitud de la salida no depende de la magnitud de la entrada de manera proporcional: por ejemplo para un escalón en la entrada de magnitud 1.0 la salida presenta un escalón de magnitud 10.0, pero si el escalón es de magnitud 2.0 (el doble de la anterior), la salida es 14.0, que no es el doble de la anterior. Varios autores presentan otros comportamientos que aparecen en los sistemas no lineales^{3, 4}.

3.3 VARIACIÓN TEMPORAL DE PARÁMETROS DEL MODELO DEL PROCESO

Por lo general cuando se tiene el modelo del proceso, se asume que los parámetros del mismo son fijos. Esto es, que los coeficientes de las ecuaciones algebraicas y diferenciales que representan los fenómenos involucrados no cambian con el tiempo. Para efectos reales esto es siempre falso, pues los coeficientes de transferencia de materia y energía, por ejemplo, son funciones del tiempo (envejecimiento del sistema).

Para fines prácticos, los procesos con variación temporal lenta en sus parámetros, pueden tratarse como sistemas invariantes en el tiempo (autónomos), pero aquellos que presentan variaciones paramétricas rápidas, deben considerarse como variantes en el tiempo (no autónomos). La categorización de la variación como lenta o rápida, tiene mucho que ver con la dinámica más lenta del proceso, puesto que si el tiempo que transcurre para que esta variación de parámetros sea notoria, es cercano al tiempo de respuesta del lazo mas lento de todo el proceso, se debe considerar la variación paramétrica como rápida y el proceso deber ser tratado como un sistema no autónomo.

Por lo general, el diseño de sistema de control para procesos no autónomos implica el uso de algún mecanismo que actualice los parámetros del modelo del proceso (en el caso de controladores basados en modelo) o de controladores adaptables o de parámetros auto-ajustables. En este caso, la precisión con la que se determina la variabilidad paramétrica del proceso es de vital importancia para la sintonía del sistema de control y la garantía final del cumplimiento de los objetivos de diseño. En cambio, cuando se enfrenta un proceso que puede considerarse autónomo, el sistema de control enfrenta menos problemas y puede seleccionarse entre un abanico más amplio de posibilidades. Finalmente debe mencionarse que si las características de no-linealidad y variación de parámetros coexisten en un mismo proceso, el diseño del sistema de control presenta un reto bastante grande, por lo que debe recurrirse a estrategias de control mas avanzadas, generalmente basadas en un modelo, que requieren el uso del computador².

4 ESPECIFICACIONES PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Las especificaciones para el diseño, que normalmente se deben fijar desde el diseño del proceso en sí mismo, implican dejar en claro lo que se espera que haga el sistema de control y como se espera que dicho sistema de control lo realice. Existen especificaciones de acuerdo con el método de diseño que se aborde (en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia, etc.). No es común que todas las especificaciones para el diseño existentes se consideren simultáneamente, puesto que dependiendo de la riqueza paramétrica del

sistema de control seleccionado, se tendrá mayor o menor número de estas especificaciones que pueden ser cumplidas. Siempre el proceso es el que fija que especificación resulta más prioritaria. En la caracterización del comportamiento de los sistemas de control, es común usar los siguientes aspectos del desempeño del sistema controlado.

4.1 ESTABILIDAD

Se refiere al comportamiento del proceso controlado cuando aparecen perturbaciones acotadas en sus entradas. Normalmente, se dice que un proceso es estable si al desplazar su estado actual una distancia δ de su valor de estado estable, debido a perturbaciones, se puede garantizar que existe un entorno de radio ϵ dentro del cual se mantiene la evolución temporal de los estados del proceso para cualquier tiempo. Se nota de inmediato la importancia de esta especificación general de diseño, puesto que un sistema que no cumpla esta condición podría terminar autodestruyendose, al sobrepasar los limites de operación segura.

4.2 SENSIBILIDAD A VARIACIONES DE PARÁMETROS

También denominada robustez o rechazo a perturbaciones. Esta característica esta estrechamente relacionada con la definición general de estabilidad dada arriba, pero se refiere mas a la capacidad del proceso controlado para tolerar variaciones de parámetros, sin deterioro notorio en sus especificaciones de diseño, siempre manteniendo la estabilidad. El cumplimiento de esta especificación dio origen a toda la teoría y métodos del control robusto, que precisamente diseña en el entorno esperado de variación de los parámetros².

4.3 ERROR DE ESTADO ESTABLE (EEE) Y ERROR DE SEGUIMIENTO (ES)

El EEE especifica que tanta desviación de la salida se tolera, respecto del valor deseado de esta, cuando se desea un control regulatorio. Es tal vez la mas usada de las especificaciones, puesto que atiende directamente a la calidad del producto final del

proceso o planta. Por su parte, el ES, especifica la desviación permitida entre el valor instantáneo de la salida y su correspondiente valor deseado en el mismo instante de tiempo, cuando se hace control de seguimiento de una trayectoria de la salida.

4.4 RESPUESTA TRANSITORIA

En control regulatorio se puede caracterizar en forma global esta respuesta por tres aspectos: el Sobreimpulso Máximo (SIM), el Tiempo de Levantamiento (TL) y el Tiempo de Asentamiento (TA). El SIM indica que tanto sobrepasa la variable el valor deseado cuando se hace un cambio en el punto de ajuste o aparece una perturbación acotada. El TL se refiere al tiempo transcurrido entre el momento en que se cambia el punto de ajuste y el cruce de la variable por primera vez por el valor deseado. El TA indica que tanto tiempo transcurre entre el pico del SIM y el momento en que la variable se queda en una banda alrededor del valor deseado.

4.5 CARACTERÍSTICA DE RESPUESTA EN FRECUENCIA

Muy usual para procesos que se ven afectados por perturbaciones periódicas, puesto que permite observar los cambios de fase y ganancia de la salida del proceso controlado, ante este tipo de perturbaciones. También se utiliza en diseño convencional asumiendo perturbaciones sinusoidales de Frecuencia y Amplitud variables, para determinar los valores críticos en la operación del proceso.

5. CONFIGURACION DEL SISTEMA DE CONTROL

La idea fundamental en el diseño del sistema de control, es que este debe compensar la respuesta natural del proceso ante las perturbaciones del entorno, de modo que pueda mantenerse un estado dado (control regulatorio) o llevar el proceso por una trayectoria determinada (control de seguimiento). De acuerdo con las señales que se usen para el cálculo de la acción de control, la Tabla 1 muestra una clasificación genérica de los sistemas de control^{3, 5}.

5.1 RECOMENDACIONES DURANTE EL DISEÑO DEL PROCESO

Desde las etapas tempranas del diseño del proceso, deben considerarse las condiciones dinámicas de los equipos, además de las condiciones de estado estable propias de esta clase de diseños. Así, se recomienda proveer un tiempo de retención suficientemente grande en tanques de alimento, tanques de reflujo, rehervidores de columnas de destilación, etc., para lograr un buen amortiguamiento de las perturbaciones propias del flujo. Del mismo modo, resulta útil proveer un exceso suficiente de área de transferencia de calor y masa, para que el manejo de picos en la corriente de proceso sea más fácil y eficiente. Para los flujos que sean corrientes manipuladas, debe suministrarse una capacidad en exceso sobre el caudal de diseño. Esto implica el uso de elementos finales de control de mas capacidad que la especificada según condiciones de estado estable. Con esto se permite que el sistema de control pueda maniobrar en condiciones pico sin saturar el Elemento Final de Control (EFC) y por tanto la variable manipulada, puesto que esta saturación introduce una no-linealidad fuerte en la respuesta del proceso controlado.

Tabla 1. Clasificación de sistemas de control

LA ACCION DE CONTROL SE CALCULA USANDO:	DENOMINACION DEL CONTROLADOR	EJEMPLOS DE ESTE TIPO DE CONTROLADORES
Salida (Y)	Realimentación Estática de Salida	P, PI, PD, PID
Salida (Y) y Modelo del Sistema	Realimentación Dinámica de Salida	Autosintonía, Ganancia tabulada, Predictivo, Robusto, Modos deslizantes.
Perturbaciones (V, W) y Modelo del Sistema	Prealimentación o Precompensación	Relación fija, Relación dinámica, Precalculado, Variable computada.
Estado (X) y Modelo del Sistema	Realimentación de Estado	Óptimo, LQR, Predictivo en el espacio de parámetros, Robusto, Adaptable.
Y ó X, V, W y Modelo del Sistema	Compensación Dinámica o Híbridos	Inversión de modelo, Difuso (Fuzzy), Redes Neuronales Artificiales.

El número y ubicación de los medidores y sensores de las variables del proceso es otro de los aspectos a considerar en esta etapa. Recurriendo a los criterios dados por el control moderno, o control del proceso a través de sus variables de estado, se debe usar un número suficiente de sensores para que el sistema sea observable, puesto que la observabilidad es condición necesaria para la controlabilidad del proceso⁵. La ubicación de estos sensores debe ser aquella que produzca las señales más limpias y con el menor retardo por transporte, puesto que estos dos efectos complican bastante la tarea de control. Adicionalmente, la ubicación del sensor nunca debe atentar contra la vida útil de este, por lo que deben obedecerse al pie de la letra las especificaciones de operación dadas por el fabricante.

5.2 RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Una recomendación de sentido común, pero muchas veces olvidada por el impacto publicitario de equipos de gran capacidad y bajo costo, es la de mantener el sistema de control diseñado tan simple como sea posible, puesto que todo el personal involucrado en el proceso, desde el operador hasta el ingeniero jefe de planta, deben estar en capacidad de entender este sistema. Esto implica usar el menor número posible de equipos para control, ya que cada equipo adicional es otro elemento más susceptible de falla. Por lo tanto, las ampliaciones del sistema de control deben estar contempladas, al menos de modo aproximado, desde la concepción misma del sistema, pero sin caer en colchones de previsión demasiado grandes, que implican la existencia de equipos de control que operan a menos del 50% de su capacidad total. Si se tiene mucha incertidumbre sobre el tamaño final del sistema de control, debido a futuras ampliaciones de la planta, previstas pero no dimensionadas, se recomienda usar equipos de control modulares, que crecen con la planta.

Algunas recomendaciones generales, sobre el tipo de control a usar, indican que se debe seleccionar control prealimentado o predictivo puro para compensar perturbaciones medibles grandes y frecuentes; usar control selectivo para evitar saturaciones de las

variables manipuladas y mantener las restricciones operativas del proceso; y usar solo control Proporcional para manejar el nivel de tanques de suministro y rehervidores de columnas, así se suaviza el efecto de las perturbaciones. Para eliminar perturbaciones menores, se debe usar lazos de control en cascada donde sea posible y evitar el acoplamiento entre variables. Si esto último no es posible, se deben sintonizar los controladores de modo que el lazo lento quede con un EEE amplio, comparado con el lazo rápido que se sintoniza para operar cerca del punto óptimo (p.e. el EEE tiende a cero), pero siempre con estabilidad garantizada. Finalmente, se debe verificar la operación del sistema de-control en condiciones anormales o en condiciones diferentes de las de diseño, para garantizar que esta cubierta una eventualidad y que el sistema de control podrá manejarla eficientemente, incluso recurriendo al mando manual^{3, 6}.

5.3. APROXIMACIÓN AL DISEÑO INTEGRADO SISTEMAS DE CONTROL Y PROCESO PARA UNA PLANTA COMPLETA

Aunque actualmente se están explorando varias aproximaciones al diseño del sistema de control integrado al del proceso, para una planta completa, veamos un grupo de lineamientos bastante conocidos y usados en esta tarea. La primera etapa consiste en desarrollar un esquema de control lógico para manejar todos los lazos de control de nivel de líquido y presión en toda la planta, de modo que los cambios de flujos de una unidad a otra sean tan suaves como sea posible. Estos son los denominados lazos de balance de materiales. Se debe además determinar los valores de las constantes de tiempo en lazo cerrado de estos lazos de control. Luego se sugiere diseñar los lazos de control de composiciones para cada unidad de operación. Estos son los denominados lazos de calidad del producto. Del mismo modo que en el paso anterior, se deben evaluar las constantes de tiempo en lazo cerrado, de estos lazos de control. La recomendación final, consiste en dimensionar las retenciones de fluido en los equipos, de modo que las constantes de tiempo de los lazos de balance de materiales sean por lo menos diez veces más grandes

que las constantes de tiempo de los lazos de calidad del producto. Con esto se busca y logra disminuir al máximo la interacción entre los dos tipos de lazos de control, lo que permite el uso de estrategias de control de lazos individuales sin parámetros de relación (una realización simple para sistemas multivariable).

6. AJUSTE DE LOS PARAMETROS DEL SISTEMA DE CONTROL

Los parámetros propios del sistema de control se ajustan mediante algún mecanismo, Sintonía, Adaptación o Aprendizaje, para lograr los objetivos de diseño. A mayor riqueza estructural y paramétrica del controlador, mejores resultados brindará, pero también más complicado será su ajuste. Existe una gran gama de posibles sistemas de control, cada uno con una riqueza paramétrica y estructural propia, que lo hace aplicable a determinado tipo de procesos⁷. La elección del sistema más adecuado pasa por la experiencia previa en control de sistemas similares, pero a la hora de la selección resulta de vital importancia, conocer todo el abanico de posibilidades y las relaciones intrínsecas entre ellas y el proceso^{2, 4}.

El ajuste de los parámetros puede realizarse por tres caminos que muestran, de cierta manera, las diversas tendencias a través del tiempo en el diseño de sistemas de control:

- Por tanteo y error, justo sobre la planta operando. Es la técnica tradicional de postular unos valores iniciales como semilla y a partir de ellos evolucionar a través de tanteos hasta llegar a un grupo de valores de ajuste que garanticen el mayor grado de cumplimiento de los criterios de diseño. Para realizar esta labor se cuenta con varios métodos, entre los que se puede mencionar el muy conocido de Ziegler-Nichols³.
- Directamente desde el diseño del sistema de control. Es uno de los aportes de la teoría de control moderno al diseño del sistema de control, puesto que a través de la realimentación de estado y otras técnicas que usan los estados del proceso, se puede determinar de antemano un grupo

adecuado de parámetros de ajuste del controlador, como por ejemplo en el control óptimo.

Mediante simulación luego del diseño. Este es un producto directo del uso del computador en el ámbito de la ingeniería, particularmente con su alta potencia para cálculos repetitivos. A través de la simulación, es posible, incluso usando las técnicas de control tradicional, probar diversos conjuntos de parámetros, usando alguna metodología, hasta llegar a un grupo de valores que garanticen un buen grado de cumplimiento de los criterios de diseño, siempre que se tenga un buen modelo del proceso⁸.

7. IMPLANTACION DEL SISTEMA DE CONTROL

Cada día aparecen en el mercado de la instrumentación y el control, productos que brindan nuevas posibilidades, a la hora de plasmar el sistema de control diseñado para un proceso⁹. La cuidadosa selección del tipo de instrumentos a usar para el control de un proceso, permite garantizar el cumplimiento de los objetivos del diseño durante la vida útil de los instrumentos, a unos costos de operación y de mantenimiento normales. Las posibilidades a la hora de la selección pueden dividirse en dos grandes grupos: Instrumentos Analógicos e Instrumentos Digitales. No por ser estos últimos los más recientes, siempre son los mejores, puesto que en algunas aplicaciones, la instrumentación analógica sigue siendo la mejor opción. Históricamente, la secuencia de aparición de instrumentos fue la siguiente: primero los Hidráulicos (aceite a presión), luego los Eléctricos y Neumáticos (aire a presión). Todo este grupo es Analógico. Posteriormente, impulsados por el descubrimiento del transistor, aparecieron los instrumentos electrónicos, fuertemente popularizados con la invención del microprocesador en la década de los 70. Estos fueron en un principio analógicos (por su construcción con transistores) y luego pasaron a ser digitales (al usar como principio de operación un microprocesador). La otra gran división que se puede hacer, a nivel del controlador, agrupa estos equipos en los de propósito particular o dedicados y los de propósito general o programables.

Finalmente, la unificación en toda la planta del tipo de implantación del sistema de control: (Analógico o Digital, Propósito Particular o General), resulta en menores costos a la hora del mantenimiento o la expansión del sistema. A manera de guía económica aproximada para la selección del tipo de sistema de control, la Tabla 2 brinda indicadores cualitativos para 10 criterios de los tipos de controlador ya mencionados. Aquí, el Costo Inicial se refiere solo al equipo y sus accesorios; el Costo de Instalación se refiere al cableado, el diseño del circuito y la programación del sistema; el Número de Accesorios hace relación a la cantidad de piezas que componen el sistema de control; la Posibilidad de Expansión se refiere a la adición de nuevos módulos sin aumentar el equipo principal; la Compatibilidad e Integración corresponden a la posibilidad de adicionar equipos de otras marcas, sin alterar el tipo de señales de todo el sistema (el protocolo); la Facilidad de Reconfiguración se refiere al cambio de estrategia de control o estructura del sistema de control; la Facilidad de Reprogramación hace relación con el cambio de parámetros de control; la Riqueza Estructural atiende al número de configuraciones posibles a partir del mismo equipo de control; la Amigabilidad con el Usuario se refiere a la cantidad y calidad de información que el sistema brinda al usuario durante su operación normal; y finalmente, la Probabilidad de Fallos hace relación a la frecuencia con la que eventos de fallo aparecen en ese tipo de sistemas de control.

8. UN EJEMPLO ILUSTRATIVO

Con la intención de mostrar todos los matices y aspectos que aparecen a la hora del diseño del sistema de control de un proceso, a continuación se presenta como ejemplo la propuesta de automatización y control presentada y desarrollada en su etapa I en TINTEXA S.A., en Medellín. Se trata del control del proceso de teñido de hilos en paquete (bobinas), esquematizado en la Figura 4, donde también se presenta un patrón típico de las variables durante el teñido de hilo de algodón.

8.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El proceso consiste en el teñido de un paquete de hilo, de aproximadamente 100 kg., dentro de un reactor batch herméticamente cerrado sin aislamiento térmico, con recirculación de solución de tintura. Dicha solución se debe mantener a través del paquete de hilo, con un flujo constante de 80 l/min., a una temperatura y pH dados por una trayectoria temporizada a seguir. Se debe aplicar también un cambio en el sentido de flujo a través del paquete de hilo (dentro-fuera y fuera-dentro), cada 3 minutos. Para garantizar la operación deseada se dispone de cinco Elementos Finales de Control. El EFC1 es una válvula análoga del tipo mariposa para control de flujo. Los EFC 2 y 3 son dos válvulas análogas neumáticas que manejan vapor saturado (EFC2) y agua fría (EFC3), para control de temperatura a través del intercambiador. El EFC4 es una válvula para dosificar solución de NaOH para controlar el pH; y el EFC5 es una válvula digital neumática, cambia vías de dos entradas y dos salidas, para el cambio en el sentido de flujo.

A primera vista se pueden detectar cuatro lazos de control: Flujo, Temperatura, pH y Sentido de flujo, que se agrupan así: Dos lazos de control regulatorio (Flujo y pH) y dos lazos de control de seguimiento (Temperatura y Sentido de flujo). Aunque podría de entrada pensarse que la interacción entre ellos es poca, las complicaciones aparecen cuando se indaga sobre la relación entre pH y Flujo con la Temperatura. Por su parte el pH se ve afectado fuertemente por la temperatura, mas en este caso que se tienen variaciones programadas entre 25 °C y 95°C. El flujo también se afecta puesto que los cambios de temperatura varían la densidad y viscosidad del fluido, aunque en grado menor que la influencia sobre el pH. Estas dos influencias hacen que el proceso se torne no lineal, pero si se analiza los requerimientos de diseño puede manejarse esta no-linealidad de manera eficiente.

8.2 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

Como ya se dijo, en la Figura 4 se ve un patrón típico de las variables durante el teñido de una tanda de hilo

Tabla 2. Indicadores cualitativos para varios tipos de implantación del controlador.

ASPECTO	EQUIPO PROPOS.	EQUIPO DE PROPOSITO GENERAL		
CONSIDERADO	PARTICULAR	Controla. Universal	Cont/Log/Prog. PLC	Computador Indust.
Costo Inicial	Bajo	Bajo a Medio	Alto	Alto
Costo Implantación.	Bajo	Medio	Medio	Medio a Alto
Numero de Accesorios en el Montaje	Bajo	Bajo	Alto	Medio a Alto
Posibilidad de Expansión.	Baja	Baja a Medio	Media a Alta	Alta
Compatibilidad e Integración.	Media a Baja	Media (Ligada al protocolo usado)	Media (Ligada al protocolo usado)	Alta
Facilidad de Reconfiguración.	Baja	Media	Media	Alta
Facilidad de Reprogramación.	Alta	Media	Media	Alta
Riqueza Estructural.	Baja	Baja	Media	Alta
Amigabilidad con el Usuario	Alta	Media	Media a Alta	Alta
Probabilidad de Fallos	Baja	Media	Media a Baja	Media a Baja

de algodón. Vale resaltar que cada clase de hilo a teñir tiene unas especificaciones particulares (a manera de receta) para las variaciones temporales de Temperatura y pH. Las especificaciones que deben cumplir las variables del proceso, para obtener los índices de calidad del hilo (pedidos por los clientes) en este teñido en particular, son:

Temperatura. Esta variable es una de las mas importantes en el proceso, puesto que permite que el colorante se fije a la fibra, al alcanzar una temperatura de activación determinada, que debe mantenerse por un periodo de tiempo, con el menor error posible. Esto implica operar dentro de un Error de Seguimiento (ES) de $\pm 3^{\circ}\text{C}$, un Error de estado estable (EEE) de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ y que el Sobreimpulso Máximo (SIM) a lo sumo de 5°C .

pH. Es otra de las variables claves en la química del proceso, puesto que mantiene una concentración iónica adecuada a las características del colorante usado. Se debe operar dentro de un EEE de ± 0.3 unidades pH y nunca tener un SIM por encima de 0.8 unidades de pH.

Flujo. Aunque es una variable importante, tiene menos peso en la calidad final que T y pH. Por eso se permite operar con EEE de hasta $\pm 25\%$.

Sentido de flujo. Resulta crucial en cuanto a la homogenización del color en cada cono (parte interna v.s. parte externa). Por eso se exige que se cumpla el patrón de cambios de sentido de flujo con un ES de 0%.

8.3 UNA CONFIGURACIÓN PRÁCTICA Y DE BAJO COSTO

Como ya se dijo, se presenta aquí la implantación de la etapa I de la propuesta final que se presentó a Tintexa S.A., como parte de la asesoría. El equipo donde se implantó el sistema tiene capacidad para teñir 100 kg. de hilo crudo. Se optó por un sistema de control multivariable del tipo mando centralizado, de lazos de control simples sin parámetros de relación. El sistema se implantó con un controlador de propósito general del tipo Microprocesador Industrial. Con este sistema se logró una mejora sustancial en la calidad del teñido, frente al sistema inicial, que sólo tenía un controlador de temperatura PID, con un ajuste inadecuado, mientras que dejaba todas las demás variables bajo el control del operador, con indicadores de variable con poco mantenimiento y baja resolución. A continuación, se discute brevemente cada uno de los aspectos de la selección del sistema de control para cada variable:

Temperatura. Se usó un algoritmo PID con parámetros de sintonía fijos, ajustados para cumplir con el EEE y el ES, puesto que el controlador cambia el punto de ajuste como función del tiempo y el PID lo debe seguir. El objetivo de mantener el EE y ES dentro del intervalo dado (en muchas aplicaciones contradictorio), se logró con un PID gracias a la inercia térmica del reactor.

pH. Se colocó un indicador de pH de buena resolución y se dejó esta variable bajo control manual (operador), puesto que la variación de pH es baja durante el proceso y se ajusta con facilidad mediante la adición de pequeñas cantidades de solución de NaOH, siempre que el indicador de pH se compense por la temperatura del reactor al momento de la lectura, acción que se programo en el microprocesador, para indicarle al operador un pH mas real.

Flujo. Debido a la gran tolerancia que presenta esta variable, y manteniendo el objetivo de un sistema de bajo costo, se optó por mejorar el indicador de flujo, calculando el valor actual a partir del elemento primario ubicado para tal fin (placa de orificio) y una compensación por temperatura (ligera). De este modo el operador tiene en el panel un valor de flujo mas real, lo que le permite ajustar manualmente la posición de la válvula mariposa, que se indica en % en un dial instalado directamente sobre ella.

Sentido de flujo. Para esta variable se implantó un lazo abierto de control, encargado de enviar el tren de pulsos para el cambio de posición de la válvula cambia vías. Esto sólo por bajar costos, puesto que la especificación estricta del ES=0%, exige un lazo cerrado de control, de modo que el sistema de control siempre garantice el sentido de flujo pedido o anuncie un fallo en esta parte del proceso.

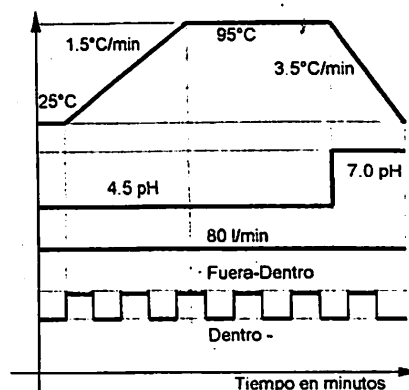
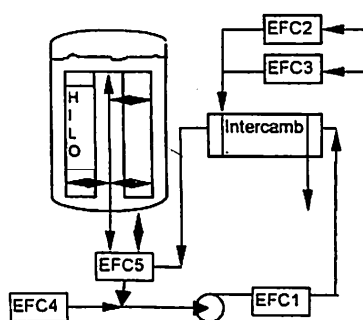


Figura 4. Esquema del equipo del ejemplo y patrón de variables durante un teñido.

8.4 UNA CONFIGURACIÓN MEJORADA MÁS COMPLETA

La propuesta global presentada a la empresa, consta de tres etapas, que pretenden al final de su implantación, obtener un mando centralizado de las seis teñidoras de la planta. La etapa I, descrita arriba, propone implantar un mando automático de T y Sentido de Flujo, y control manual para pH y F, siempre con control individual sobre cada una de las teñidoras. Este sistema de control, sin ser el más eficiente de todos a nivel de operación, resulta adecuado para los requerimientos de diseño dados, con costo relativamente bajo. Esto significa ganar la confianza en la automatización por parte del equipo financiero de la empresa. Lo problemático de esta propuesta, es que deja en manos del operador dos variables importantes del proceso: pH y F, por esa razón en la etapa II se propone la automatización total del proceso en cada teñidora. La mejora plantea incluir en el mando automático estas dos variables (pH y F), con lazos simples de control (PI para el pH y P para el Flujo) y usar los parámetros de relación con la temperatura ya programados para la indicación en la etapa I. Así el controlador esta permanentemente (de acuerdo con el valor actual de temperatura) actualizando el valor de pH y F, mientras los controla. Además, se propone hacer el control del sentido de flujo en lazo cerrado, realimentando la posición del EFC5, de manera que el controlador avise al operador cuando la posición establecida para ese tiempo no se cumpla. Como se ve, todo esto puede implantarse con el controlador seleccionado, debido a su facilidad de expansión y Reprogramación de este tipo de configuración.

Finalmente, la etapa III propone la centralización del mando de todas las teñidoras de la planta, usando comunicación cableada entre un PC principal y cada una de las unidades de control microprocesado, instaladas en cada teñidora. De esta manera será posible programar, monitorear e incluso controlar, en caso de un daño de las unidades locales, cada máquina separadamente. Esta etapa obviamente es la que presenta mayor costo, principalmente en lo referente al cableado y programación de la estación de mando. Con este tipo de mando, se logra el paso previo para

la integración total entre la parte de administración y ventas, con la parte de producción.

9. REFERENCIAS

1. SAHAIAN, B. and HASSUL, M. Control system design using Matlab. Prentice-Hall. 1993
2. LIN, CH. Advanced control system design. First Edition. Prentice Hall, Inc. 1994.
3. LUYBEN, W.L. Process modeling, simulation and control for chemical engineers. Second Edition. McGraw-Hill, 1990.
4. SLOTINE, J. and LI, W. Applied nonlinear control. First Edition. Prentice-Hall, Inc. 1991
5. KUO, B.C. Sistemas de control automático. Séptima Edición. Prentice Hall Hispanoamericana S.A. 1996.
6. CREUS, A. Instrumentación industrial. Marcombo Boixareu editores. Barcelona, 1979.
7. ALVAREZ, H. Riqueza estructural y paramétrica en el diseño de un control inteligente. Memorias VII Congreso Latinoamericano de Control. Buenos Aires, Argentina. 1996.
8. LINDSKOG, P. Methods, algorithms and tools for system identification based on prior knowledge. First Edition. Linkopings Tryckeri. Sweden. 1996.
9. ITOU, T. AND TAKATSU, H. Future needs of the control theory in industries. Proceedings of the 35th conference on decision and control, pp 4500-4504. Kobe, Japan. 1996.