

Control de Procesos

José Luis Figueroa

2012

Índice general

1. Problemas Actuales en el Control de Procesos: Una Introducción	7
1.1. Control, Economía del Proceso y Restricciones	9
1.2. Costos de Diseño y Mantenimiento	10
1.3. Transferencia Tecnológica	10
2. La Formulación del Problema Fundamental de Control	12
2.1. Criterios de Desempeños para el Control de Procesos	13
2.1.1. El Problema de Control de Sobrecarga de Nivel	15
2.2. Un problema de Control de un Reactor Semi-Batch	16
2.3. Representación del Proceso para el Control	18
2.4. Sumario: Elementos del Problema Fundamental de Control	21
3. Industria de Procesos	24
3.1. El Proceso	24
3.2. Variables de un Proceso	27
3.3. El Concepto de Sistemas de Control de Procesos	30
3.3.1. Elementos Físicos de un Sistema de Control	31
3.3.2. Configuración del Sistema de Control	59
3.4. Perspectiva General del Diseño del Sistema de Control	62
3.4.1. Principios Generales	62
3.4.2. Un Ejemplo Ilustrativo	63
4. Modelos y Dinámica de Procesos	66
4.1. Introducción	66
4.2. Herramientas del Análisis de la Dinámica	66
4.2.1. El Modelo del Proceso y Funciones Forzantes Ideales	66
4.2.2. Herramientas Matemáticas	67
4.3. La Descripción Matemática de un Proceso	68
4.3.1. Características del Procesos y sus Modelos	68
4.3.2. Varias Formas de Modelos de Procesos	69
4.4. Modelos en Espacio de Estados	70
4.5. Modelos en el Dominio Transformado	71
4.6. Modelos Respuesta al Impulso	71

4.7.	Relaciones entre las Formas de Modelos	72
4.7.1.	Modelo en Espacio de Estados a Dominio Transformado	72
4.7.2.	Espacio de Estados y Modelos Respuesta Impulsiva	74
4.8.	El Concepto de una Función Transferencia	75
4.8.1.	Un Enfoque Generalizado del Modelo del Proceso	75
5.	Modelado e Identificación de Procesos	78
5.1.	Modelado Teórico del Proceso	78
5.1.1.	Formulación del Modelo	79
5.1.2.	Estimación de Parámetros en Modelos Teóricos	86
5.1.3.	Validación de un Modelo Teórico	87
5.2.	Modelado Empírico: Identificación del Proceso	88
5.2.1.	Principios del Modelado Empírico	90
5.2.2.	Método de la variable instrumental	91
5.2.3.	Identificación Basada en Respuesta al Escalón	95
6.	Procesamiento y Reconciliación de Datos	96
6.1.	Introducción	96
6.2.	El modelo del proceso	97
6.3.	Clasificación de las variables del proceso	98
6.4.	Reconciliación de datos	99
6.4.1.	Reconciliación de datos en estado estacionario	100
6.5.	Determinación de la Polarización en la Reconciliación de Datos	101
7.	Sistemas de Control Realimentado	103
7.1.	El Concepto del Control Realimentado	103
7.2.	Desarrollo del Diagrama de Bloques	105
7.3.	Controladores Realimentados Clásicos	106
7.3.1.	El Controlador Proporcional (P)	106
7.3.2.	El Controlador Proporcional + Integral (PI)	107
7.3.3.	El Controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID)	108
7.3.4.	El Controlador Proporcional + Derivativo (PD)	108
7.3.5.	Algunos Aspectos de Controladores Comerciales	108
7.4.	Funciones Transferencia a Lazo Cerrado	109
7.5.	Respuesta Transitoria del Lazo Cerrado	110
7.6.	Principios de Diseño de Controladores	112
7.6.1.	Criterios de Desempeño	113
7.6.2.	Decisión del Tipo de Controlador	116
7.7.	Sintonía de Controladores para Procesos con Modelos Fundamen- tales.	117
7.7.1.	Optimización de Criterios Integrales en Tiempo	118
7.7.2.	Controladores Basados en Modelos	119
7.7.3.	Uso de Márgenes de Estabilidad	119
7.7.4.	Reglas de Sintonía de Cohen-Coon	120
7.7.5.	“Sintonía Automática” con Controlador Relé	121

Bibliografía

Capítulo 1

Problemas Actuales en el Control de Procesos: Una Introducción

La industria de procesos se caracteriza por condiciones de mercados impredecibles y muy dinámicas. En el transcurso de las últimas décadas hemos sido testigos de una enorme variación en el precio de las materias primas y de los productos, lo cual fuerza a los procesos a operar sobre un rango de condiciones cada vez más amplio. En el pasado, la respuesta típica de la industria ante estas variaciones era el rediseño de las plantas para satisfacer las nuevas condiciones. Sin embargo, cada vez es menos atractivo embarcarse en rediseños a gran escala donde el retorno económico no puede ser garantizado a causa del creciente aumento de la frecuencia de los grandes cambios de mercado. Como resultado, el énfasis se ha desplazado hacia el desarrollo de recursos para extraer el máximo beneficio del capital de inversión existente.

La forma más eficiente de responder a los cambios de las condiciones de mercado con mínima inversión de capital es provista por la integración de los denominados *sistemas tecnológicos*. Esto involucra a todos los aspectos de automatización de los procesos de tomas de decisiones. Es solo mediante esta automatización que es posible lograr una respuesta efectiva a las variaciones del mercado.

Los sistemas tecnológicos integrados en el proceso de toma de decisiones son los que se muestran en la Figura 1.1:

- *Medidas*: La recolección de datos y monitoreo de las mediciones del proceso via instrumentación. Puede incluir las variables más importantes del proceso tales como temperatura, presión, caudal, nivel, composición, etc.
- *Control*: La manipulación de los grados de libertad para satisfacer los criterios operativos. Esto típicamente involucra dos niveles de implementación: el control de lazos simples, que se realiza mediante controladores

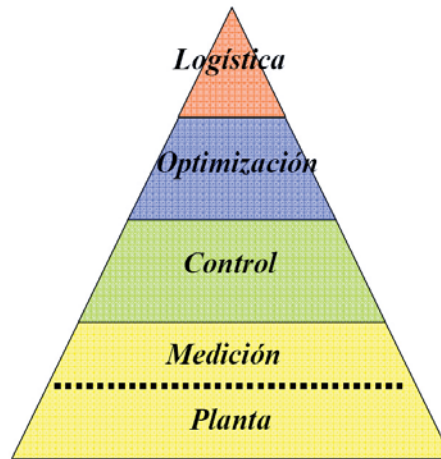


Fig. 1.1. Integración de sistemas tecnológicas en el proceso de toma de decisiones

analógicos o con controladores digitales con muestreo rápido; y el control realizado mediante el uso de sistemas de cómputos con grandes capacidades de procesamiento.

- *Optimización*: La manipulación de los grados de libertad del proceso para satisfacer los objetivos económicos de la planta. Es usualmente implementado a un ritmo tal que la planta controlada se asume en estado estacionario. Entonces, la distinción entre control y optimización es primariamente una diferencia en las frecuencias de implementación de las operaciones.
- *Logística*: La localización de las materias primas y el planeamiento de la operación de la planta para maximizar los beneficios y realizar los programas de la compañía. Es implementado para responder a cambios en los mercados externos y contempla la integración de todas las locaciones fabriles.

Cada una de estas tecnologías juega un rol único y complementario en la automatización de los procesos de decisión y en permitir que una compañía reaccione rápidamente a cambios externos. Por lo tanto, una tecnología no puede ser efectiva sin las otras. Además, la efectividad del enfoque completo solo es posible cuando todas las plantas de factorización se integran al sistema.

Aunque en el pasado el único objetivo de un sistema de control era mantener la operación estable del proceso, esta integración impone requerimientos adicionales. De hecho, muchas actividades del control avanzado de procesos en la industria son exclusivamente justificados sobre la base de esta integración. Esto genera muchos aspectos relevantes en el diseño e implementación del control de procesos. Por ejemplo, aunque el problema de optimización en estado

estacionario de un proceso pueda ser relativamente fácil de resolver, su resultado es extremadamente difícil de implementar pues las perturbaciones pueden producir violación de distintas restricciones operativas. La fase de control es la que hace que esta implementación sea posible. En este curso asumiremos que el controlador es diseñado e implementado para operar en un entorno integrado. A continuación examinaremos en detalle algunos aspectos importantes que motivan los desarrollos técnicos que abordaremos en este curso.

1.1. Control, Economía del Proceso y Restricciones

Como discutimos previamente, los niveles de tomas de decisiones pueden ser integrados de forma tal de facilitar una respuesta rápida a las variaciones del mercado. En el sentido más general, todos los niveles por arriba del *nivel de mediciones* pueden considerarse como niveles de “control de procesos,” dependiendo del flujo de información entre niveles y/o la frecuencia de ejecución de cada uno. Esto es cierto pues todos estos niveles superiores toman decisiones básicas a partir de información e inicializan una serie de acciones para implementarlas, y de allí “controlar” algún “proceso.”

El desarrollo de este curso puede entonces aplicar a todos estos niveles. Sin embargo por razones de brevedad solo consideraremos los niveles que interactúan directamente con la capa de medición y que reciben información del nivel de logística. Esto indica que incluiremos objetivos económicos de la planta como los objetivos a ser alcanzados por el sistema de control. Estos objetivos consistirán en mantener el proceso cerca de su condición operativa óptima o directamente, en la optimización de una función económica.

Como veremos más adelante, es un hecho que en la práctica el punto de operación óptimo de un proceso estará en la intersección de restricciones [2]. Para lograr los objetivos económicos de un proceso un hecho importante que debe ser considerado por cualquier controlador exitoso es que debe ser capaz de lidiar con las restricciones del proceso. Entonces, el sistema de control debe anticipar violaciones de las restricciones y corregirlas de una forma sistemática: las violaciones no pueden ser permitidas mientras se retiene la operación cerca de estas restricciones. La práctica usual en control de procesos es ignorar el hecho de las restricciones en la etapa de diseño y entonces “manejarlas” en forma ad-hoc durante la implementación. La experiencia ha demostrado que las técnicas de *control basado en modelos predictivos* prevé la única metodología que puede manejar restricciones en una forma sistemática durante el diseño e implementación del controlador. Este es el motivo primario para el éxito de estas técnicas en numerosas aplicaciones en las industrias de procesos químicos [4, 6, 7, 13] y en la academia [1, 5, 9].

1.2. Costos de Diseño y Mantenimiento

En el área del control de procesos, ahora incluyendo tanto el control como la optimización, debido al necesario incremento en el número de aplicaciones (para lograr integración), existe la necesidad de minimizar los costos tanto en el diseño como en el mantenimiento. Siendo que cada proceso químico (o unidad de procesamiento) es única, no podemos explotar el factor de popularidad como se puede hacer en otras industrias (por ejemplo la automotriz). Esto es, no podemos afrontar costos extremos en el diseño de un sistema de control que sabemos que no trabajará en otro proceso, y entonces su costo no puede ser prorrateado en un número grande de aplicaciones. Sin embargo, sabemos que no es rentable tratar cada problema como un caso de estudio. Entonces, necesitamos un *enfoque unificado* de control, que permita el tratamiento de cada problema en un mismo marco, lo cual resultará en una reducción significativa de los costos de diseño.

Este enfoque unificado también es necesario para un mantenimiento más efectivo de los sistemas de control. No podemos afrontar la utilización de personas expertas para mantener cada sistema, sino que debemos tener un pequeño cuerpo de expertos capaces de mantener todos los lazos. Esto es solo posible de lograr implementando técnicas unificadas de diseño .

En este curso intentaremos proveer una visión unificada mostrando enfoques que han provado ser efectivos. Estos enfoques han sido puestos en un esquema que, en nuestro conocimiento, provee una camino factible para la unificación deseada. Este esquema, que denotaremos como *Problema Fundamental de Control*, será presentado en el capítulo siguiente.

1.3. Transferencia Tecnológica

Un *enfoque unificado* para minimizar los costos de diseño y mantenimiento no significa necesariamente un *enfoque simplificado* para el control. Existe una cultura en control que dice que “cuanto más simple, el sistema es mejor.” Muchos técnicos entienden por simple, lazos de control simples (decentralizados) en lugar de control multivariable, analógico en lugar de digital, lineales invariantes en el tiempo (diagrama de bloques) sobre enfoques basados en optimización, etc. Se proclama que estos lazos simples se entienden mejor por parte de los ingenieros de campo y, por consiguiente, son de mantenimiento más barato. La experiencia sin embargo muestra que estas simplificaciones resultan en un costo de diseño y mantenimiento más alto. La razón para ello es que los esquemas más simples generalmente no resuelven el problema en forma satisfactoria y requieren modificaciones ad-hoc para que funcionen correctamente. Esto indica que cada lazo es distinto del siguiente y entonces los costos de diseño y mantenimiento se elevan [10].

Ahora, si planificamos la instalación de sistemas de control digitales, multivariables, basados en optimización, para resolver un problema real, uno puede se preguntar justificadamente que clase de expertise se requiere para realizar el diseño y el mantenimiento (esperemos que infrecuente, pero aún así necesario).

La respuesta a esta pregunta es el mecanismo de *transferencia tecnológica* entre los desarrolladores de la tecnología y los ingenieros de campo. El ideal es tener una actividad de diseño original que es realizada por un pequeño grupo de expertos. Una vez que el sistema es instalado, el diagnóstico y el mantenimiento del día a día, más algún cambio menor en el diseño será realizado por los ingenieros de campo. Estos ingenieros de campo no requieren el entendimiento de la tecnología en la cual se basa el sistema de control, pero estarán entrenados para utilizarlo; de foma similar que la gente conduce automóviles sin conocer necesariamente como funciona el motor.

Este es un punto clave que debemos tratar. Tradicionalmente se han mantenido los sistemas de control simples, para que todos entiendan como funcionan. Sin embargo, en la actualidad podemos implementar algoritmos de control muy sofisticados, los cuales son demandados en nuestra industria. Hace unos años se realizó un estudio en Australia que indicaba que con solo mejorar los esquemas de control la productividad de la industria de procesos podría mejorar entre un 4 a 8 % de su facturación [15].

El operador que usa estos lazos solamente necesita ser capaz de utilizarlos, pero no necesita contribuir intelectualmente en el diseño. Esto permite la implementación del enfoque de sistemas tecnológicos. También incrementa la responsabilidad del ingeniero de control para innovar sobre soluciones que permitan trabajar al ingeniero promedio sin dificultad y sin la necesidad de convertirse en un experto.

Para que ese mecanismo sea exitoso, los sistemas de control deben ser diseñados con un ajuste ad-hoc mínimo mientras que tengan sistemas de diagnóstico e interfaces con los operadores cada vez más avanzados. Además, deben establecerse entrenamientos para los ingenieros no especialistas para capacitarlos en la mejora del proceso, haciendo cambios en los diseños del control.