

Control descentralizado/plantwide en industria: una VISIÓN GLOBAL

Antonio Sala

Notas de clase sobre control de sistemas complejos

DISA – Universitat Politècnica de València, Spain

Vídeo-presentaciones en:

<http://personales.upv.es/asala/YT/V/pidbigpic0.html> (introducción, motivación)

<http://personales.upv.es/asala/YT/V/pidbigpic1.html> (diseño de proceso, estructura de control)

<http://personales.upv.es/asala/YT/V/pidbigpic2.html> (sintonizado de reguladores, implementación, análisis de datos)

Presentación

Motivación: Hay tantas cosas que se le dicen en tantos cursos de control... Los cursos se concentran en detalles particulares pero a menudo omiten el “panorama general”, una “visión global” de lo que se verá en la industria, lo que ELLOS creen que debería ser tu experiencia.

Contenido: casi todo lo que hay que tener en cuenta en “control avanzado de sistemas industriales complejos” para hablar con técnicos, directivos, ingenieros no especializados en control, sin “matemáticas abstractas”.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

El “gran esquema de las cosas”: plan maestro

A los “ingenieros de procesos”, o “ingenieros de control”, se les puede asignar una de las siguientes tareas (o deben supervisar varias de ellas en roles “senior”):

- ① **Antes del diseño/ajuste de control:** Diseñar PROCESO orientado a control
- ② **Selección estructura de control** (flujo de información: quién ve qué, quién hace qué)
- ③ **Ajuste del controlador** (básicamente PID + predictivo)
- ④ **Detalle de implementación** (SCADA, red, registro de eventos)
- ⑤ ***Post-hoc* análisis de datos, control de calidad, mejora continua**

VC: variable controlada, **VM:** variable manipulada.

Visiones alternativas del “problema de control”

- **Manufactura:** control de inventario, planificación, coordinación de PLCs, robots, colaboración personas/máquina, control de calidad
- **Aeroespacial:** más presencia de control “centralizado” (matrices, repr. estado), filtro de Kalman (fusión sensorial accelerómetro+GPS), sistemas LPV (parámetros variantes, linearización depende de condiciones de vuelo, de Mach 0.2 a 200 m de altitud a Mach 4 a 15 Km, p.ej.), robótica móvil, cuaterniones
- **Doctorado:** abstracciones de control de interés para una audiencia orientada a la teoría (Matemáticas: ecuaciones diferenciales, procesos de Markov, procesos estocásticos); física avanzada o cinética química para un modelado preciso, control adaptativo no lineal...

1. Diseñar PROCESO orientado al control es MUY importante

- **Optimiza el punto de funcionamiento** para minimizar el “coste variable” de operación.
- Considera un “extra” de **potencia en VM** para poder seguir con **suficiente rapidez** los cambios esperados de referencia o adaptarse a las perturbaciones que aparten al sistema del punto nominal.
- Selecciona VC, VM para tener dinámica “rápida” y de “alta ganancia” VM→VC, y capaz de rechazar perturbaciones adecuadamente, esto es, baja amplitud de la “corrección de prealimentación” necesaria a las frecuencias de interés.
- En el caso multivariable, comprueba que las maniobras SVD principales son razonables y bien condicionadas.

CUANTOS MÁS SENSORES BUENOS MEJOR:

- ¡Las prestaciones del control dependen en gran medida de la tecnología de SENSORIZACIÓN!

Dirigir un automóvil autónomo es (más o menos) “**sencillo**” . . . **SI** conoces su posición y velocidad y la de los obstáculos, de otros automóviles, peatones, . . .

- Si es barato, **CÓMPRALO**. Un sensor extra nunca está de más.
 - Cuantos más sensores tenga, más simple terminará siendo la estrategia de control/decisión: siempre es mejor “**medir**” que “**simular**” un modelo no muy preciso” (a menos que la relación señal-ruido sea basura, por supuesto).
- **idealmente “realimentación del estado”, “full-information control”**: *si mides con exactitud todo lo importante, entonces el control proporcional hace milagros.*

La teoría dice says $u = -Kx$. . . y necesitas “controlabilidad”, omitimos detalles.

1. Diseñar PROCESO orientado al control es MUY importante

Si hay **DEFECTOS de diseño**

- mal condicionamiento,
- insuficiente potencia de actuadores ante eventos no tan infrecuentes,
- pocos sensores o/y ruidosos,
- excesivo efecto de perturbaciones desconocidas,
- dinámica compleja y lenta de VM→VC,
- falta de repetibilidad,
- no-linealidad importante,
- tasa de fallos excesiva, ...

probablemente, **ninguna estrategia de control resuelva mis problemas.**

Por contra, si el proceso está **bien diseñado**, estrategias **sencillas y fáciles de comprender** funcionarán **muy bien**.

2. Selección de estructura de control

Primero, ¿escoger “**centralizada**” vs. “**descentralizada**”?

Alimentar “**todos los sensores**” de una refinería a un ordenador considerando, por decir algo, una matriz de transferencia de 310×190 **NO** es una opción.

Por ello, en principio, nos concentraremos en la opción “**descentralizada**”.

En la industria, por lo general, se aplica un enfoque “**centralizado**” sólo si surgen deficiencias o si están en juego variables primarias controladas clave; en ese caso, algunos subsistemas se controlan con estrategias centralizadas (es decir, predictivo multivariable, LQR, Kalman, \mathcal{H}_∞ , ...).

*Bucles de control predictivo multivariable para tres o cuatro subsistemas clave son frecuentes, por ejemplo, en industria química. Sin embargo, no lo cubriremos en este material. **Predictivo** (y otras opciones centralizadas) serán nuestra última herramienta cuando las cosas que discutimos aquí no puedan lograr el rendimiento requerido y no queden más opciones económicas de sensorización/actuación.

2. Selección de estructura de control (descentralizada)

Situaciones basadas en la idea descentralizada al proyectar una estructura de control:

① Configuración BASE:

vbles. controladas = vbles. medidas; número de ellas = n. vbles. manipuladas.

② Sensores “de menos”

③ Sensores “extra”

④ Variables manipuladas adicionales

⑤ Bucles para seguridad

⑥ Refinamientos



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

2. Estructura de control, 2.1 Configuración base

① Configuración BASE: vbles. controladas = vbles. medidas; número = n. vbles. manipuladas.

- opción básica: **MULTILOOP**, emparejamientos con “sentido común” o metodología RGA
- Disminuir la interacción por **DESACOPLAMIENTO**, si es necesario.
- **Control ratio**: útil y fácil de entender en muchos procesos químicos (en realidad es un control no lineal, pero no se lo digas a nadie), para desacoplar flujo/nivel/temperatura de la concentración.
- Si la planta no es dominante en diagonal o no es cuadrada, considera **desacoplamiento SVD** ... esto se relaciona con items 3 y 4 a continuación, pero desacoplamiento SVD tiene el mismo número de CV y MV “virtuales”.

② Sensores “de menos”

③ Sensores “extra”

④ Variables manipuladas adicionales

⑤ Bucles para seguridad



2. Estructura de control, 2.2 Sensores “de menos”

1 Configuración BASE: vbles. controladas = vbles. medidas; número = n. vbles. manipuladas.

2 Sensores “de menos”

- **Control en lazo abierto:** por supuesto, solo los “cambios de referencia” pueden programarse en lazo abierto; esperemos que el modelo sea bueno y las perturbaciones no sean demasiado grandes.
- **Control inferencial/indirecto.**
- El caso “extremo” es el “**observador de estado**” (abstracción idealizada): a partir de una “fracción” de sensores y el modelo, inferir “todas” las variables de estado (necesitamos un sistema “observable”). El control inferencial requiere estimar solo las variables controladas no medidas, tal vez con un modelo más simple que considere solo un subsistema de toda la planta a controlar.

3 Sensores “extra”

4 Variables manipuladas adicionales

5 Bucles para seguridad



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

2. Estructura de Control, 2.3 Sensores “extra”

- 1 Configuración BASE: vbles. controladas = vbles. medidas; número = n. vbles. manipuladas.
- 2 Sensores “de menos”

3 Sensores “extra”

- **Fusión de sensores:** reduce el ruido utilizando varias mediciones relacionadas con la misma variable de estado o variable controlada. Enfoque trivial: simplemente “promediar”; enfoque formal: **filtro de Kalman**.
- **salidas extra** (afectadas por mi VM): **CASCADA** [extraSens]... idealmente con separación de escala de tiempo para un ajuste independiente.
- **perturbaciones** (no afectadas por mi VM): **FEEDFORWARD**.
- Info de **otros subsistemas/bucles de control**: **DESACOPLAMIENTO** (primo cercano de feedforward: sé algo que me afecta, pero sobre lo que no tengo control).
- Medida de **mi propia VM**: **ANTIWINDUP** mejorado; detección de **fallos de actuador**...

- 4 Variables manipuladas adicionales
- 5 Bucles para seguridad

2. Estructura de Control, 2.4 V. Manip. Extra

- 1 Configuración BASE: vbles. controladas = vbles. medidas; número = n. vbles. manipuladas.
- 2 Sensores "de menos"
- 3 Sensores "extra"

4 Variables manipuladas adicionales (VM)

- Dinámicas similares: **Fusión VM** a través de **reparto de carga** (quizás con optimización de costes en línea), **rango dividido** (split range)
- Separación de escala de tiempo: **cascada** [config. extraVM]

- 5 Bucles para seguridad



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

2. Estructura de Control, 2.3+2.4 Sensores “extra” y VM “extra”

1 Configuración BASE: vbles. controladas = vbles. medidas; número = n. vbles. manipuladas.

2 Sensores “de menos”

3
4

Sensores “extra” & y actuadores extra (ambos)

- Establecer **referencias secundarias** a seguir para VC secundarias, si pueden ser calculadas óptimamente a partir de referencias primarias y perturbaciones (conocidas) para **beneficio económico** (por ejemplo, **control gradual**).
- **Doble cascada** (act. extra + sens. extra), aumentar el punto de ajuste de la VC esclava si la VM principal se desvía demasiado del punto de operación.
- **Muchos bucles de cascada JERÁRQUICOS:** esto es *cómo funcionan realmente las cosas*...El Presidente da órdenes al Ministro de Educación, luego el ministro al Director General, luego el Gobierno Local, luego el Rector, luego el Jefe de Departamento... luego decido escribir este material.
- Caso extremo (abstracción idealizada): en representación interna, cada “variable de estado” en mi sistema, ya sea VC primaria o no, debe ir a **“cero”** (punto de operación).

5

Bucle para seguridad

©2025 A. Sala

AI²-DISA. Universitat Politècnica de València

2. Estructura de Control, 2.5 Aspectos de Seguridad.

- 1 BASE setup: controlled vbles. = measured vbles; number = manipulated vbles.
- 2 Sensores “de menos”
- 3 Sensores “extra”
- 4 Variables manipuladas adicionales
- 5 **Aspectos de seguridad en los bucles de control**

- **Sensores extra de detección de fallos/monitorización:** no relacionados con variables controladas o en cascada.
- **Control override** (segundo bucle de control con “referencia de emergencia” que, si se alcanza, anula el comando de VM principal).
- **Sensores redundantes:** Votación de tres sensores
- **Actuadores redundantes:** (dos válvulas en serie en un gasoducto; generador de respaldo, . . .).
- **Procedimientos de parada de emergencia:** deben permanecer “bajo control”.

2. Estructura de Control: posibles refinamientos (I)

Todo lo hecho antes considera la “linealización” alrededor del punto de operación. Sin embargo, si la planta es significativamente no lineal, considera **Compensación de NO LINEALIDAD**:

- **Compensación estática de no linealidad del actuador/sensor:** compensación de zona muerta, funciones inversas, tablas de calibración, etc.
- “linealización por realimentación” (el desacoplamiento viene de regalo)... pero eso generalmente requiere una realimentación de estado “completa” a menos que solo tengamos no linealidades de entrada o salida invertibles.
 - El “**control ratio**” es un caso particular, fácil de entender sin teoría, de dicho control no lineal en procesos químicos.
 - El control de aceleración “**par calculado**” o el control cinemático basado en “**jacobianos**” en robótica también son casos bien estudiados en esta línea.

2. Estructura de Control: posibles refinamientos (II)

- La variable controlada puede ser el **máximo/mínimo/promedio** de un conjunto de sensores. [este último relacionado con desacoplamiento SVD, posiblemente].
- **Override cruzado** (relación aire-combustible), override **múltiple**,
- Sensores de “parámetros” (medidas de masa, longitud... que tengan un efecto “no aditivo” sino multiplicativo, etc. sobre mis decisiones; si es “aditivo” es Feedforward)
- **Sensores basados en imágenes** o **redes neuronales**... sobre todo robótica, no objetivo de este material.



Nunca lo sabremos todo: recetas secretas

Existen “recetas secretas” específicas para un sector tecnológico particular; las cosas se hacen “de una manera especial” en:

- Seguimiento de potencia máxima en generación solar/eólica
- Eficiencia de combustión & control de contaminantes en motores, turbinas de gas, ...
- Compartir potencia entre múltiples fuentes (turbinas eólicas, centrales eléctricas)
- Ingeniería biomédica: páncreas artificial, marcapasos, prótesis, ...
- Autopilotos, vehículos aéreos no tripulados
- robótica móvil, coches autónomos...

CONOCE tu proceso y aprende de las personas que lo conocen.

- ¿Qué cosas deben ser controladas para un rendimiento/beneficio máximo? ¿Por qué? ● ¿Qué mediciones son clave para dicho rendimiento? ¿Por qué? ● ¿Cuál es la tecnología de medición/actuación más efectiva? ● ¿Cuáles son los modos de fallo más peligrosos? ● ¿Qué estructuras de control utilizan los diseños más actuales en cada campo?

3. Sintonizado del controlador

- ① No subestimes opciones de control ON-OFF
- ② ¿Por qué molestarte con el ajuste?
- ③ Ajuste experimental, sin modelo
- ④ Ajuste basado en modelos
- ⑤ Características avanzadas



3. Sintonía del controlador; 3.1 ON-OFF

1 No subestimes las opciones de control ON-OFF

- Si no se requiere un rendimiento demasiado preciso (y los incrementos bruscos de potencia no interfieren con otros subsistemas de la planta, y no hay problemas de fatiga/durabilidad),
- Las estrategias ON/OFF son **muy simples** (solo necesitamos una amplitud de banda de error para configurar), no se necesita modelo;
- funcionan **muy bien** en plantas aproximadamente **de primer orden** (típico: nivel, temperatura, . . .).

2 ¿Por qué molestarse con el ajuste?

3 Ajuste experimental, sin modelo

4 Ajuste basado en modelos

5 Características avanzadas



3. Sintonía del controlador; 3.2 No los ajustes todos

1 No subestimes el control ON-OFF

2 ¿Por qué molestarte con el ajuste?

- Una planta de energía, química, etc. podrían tener “cientos” de bucles...
¿Vale la pena ajustar cada uno de ellos con gran precisión, con identificación, tiempo de ingeniero, etc.?
- Un bucle de control de nivel funcionará bien, si el tiempo de establecimiento objetivo es de 5 minutos, independientemente de que la servoválvula esclava tarde 5 segundos o 20 en proporcionar el caudal requerido por el controlador maestro, independientemente de lograrlo con una precisión del 1% o del 5%...
- Solo un “puñado” de bucles de nivel superior podrían necesitar una sintonía cuidadosa.
- Si controladores “no tan importantes” vienen de un proveedor con un proceso específico en mente, tal vez “configuración de fábrica” podría ser suficiente.

3 Ajuste experimental, sin modelo

4 Ajuste basado en modelos

5 Características avanzadas



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

3. Sintonía del controlador; 3.3 Sin modelo.

- 1 No subestimes el control ON-OFF
- 2 ¿Por qué molestarse con el ajuste?

3 Ajuste experimental, sin modelo

- Usa el autoajuste del fabricante del PID al instalar: presiona un botón y olvídate (si hay suerte... los algoritmos no son tan potentes y pueden fallar).
- A mano: **[asumimos planta ESTABLE, dominante 1er o 2o orden]**
 - respuesta lenta → aumenta P;
 - el error en estado estacionario permanece (o tarda mucho en corregirse) → aumenta I;
 - sobreoscilación → disminuye P, aumenta D... a veces (polo dominante de baja frecuencia) tal vez disminuye I.
 - VM demasiado ruidosa → disminuye D, aumenta el filtro de ruido en las acciones P o D (especialmente este último)... tal vez disminuye P.
- Usa algún autoajuste de la literatura, con “experimentos especialmente diseñados” y calculando las ganancias del PID a partir de los resultados.

- 4 Ajuste basado en modelos
- 5 Características avanzadas

3. Sintonía del controlador; 3.4 Basado en modelos.

- 1 No subestimes el control ON-OFF
- 2 ¿Por qué molestarte con el ajuste?
- 3 Ajuste experimental, sin modelo

4 Ajuste basado en modelos. El “núcleo duro” de muchos cursos de control. Las opciones son:

- Con tablas de sintonía (utilizando modelos aproximados de primer orden más retardo, integrador más retardo, etc.).
- Opción de usar estructuras IMC (plantas estables, ajuste fácil) si tu PLC/SCADA lo implementa.
- Lugar de las raíces, control óptimo, ... predictivo (es control óptimo con saturación)

*No tan bueno para rechazo de perturbaciones.

Obtener modelos es costoso; un sistema complejo puede tener MUCHOS bucles de control (decenas o cientos de ellos)... si mi estructura de control es muy buena (aislando subsistemas independientes, cascada, actuadores potentes/rápidos, sensores precisos, etc.) tal vez mi proceso es “fácil de controlar” por lo que puedo ahorrar una parte significativa de los costes de “modelado” o/y “identificación experimental” ...

3. Sintonía del controlador; 3.5 Características avanzadas.

- 1 No subestimes el control ON-OFF
- 2 ¿Por qué molestarte con el ajuste?
- 3 Ajuste experimental, sin modelo
- 4 Ajuste basado en modelos
- 5 **Características avanzadas**

- Considera la opción de “**dos grados de libertad**” si se persigue una respuesta óptima al punto de consigna y a las perturbaciones.
- Considera “desajustar” sacrificando rendimiento por **robustez** si se esperan variaciones significativas de la planta (en retardo o constantes de tiempo) en la vida útil del controlador.
- Se necesita “**modo de seguimiento**” (tracking) en antiwindup con estructuras de desacoplamiento/prealimentación/linealización por realimentación.
- **Planificación de ganancia:** (ganancias del controlador dependiendo del punto de operación, presión, ...) si es no lineal/variable en el tiempo.

4. Cuestiones sobre tecnología de implementación

- El código “ad hoc” en C/C++ generalmente no es una opción.
- Licencias de Matlab, etc., son caras. Usa herramientas disponibles en tu empresa.
- Integra tus PID en el marco de PLC/SCADA; los PID pueden ser elementos **independientes** para comunicarse con sensores, actuadores y otros elementos de la red o pueden ser **bloques software** en PLCs o computadoras de control.
- Los cambios de punto de consigna pueden ser frecuentes, o estar asociados solo a procedimientos de inicio/parada. Se debe evaluar el rendimiento y la seguridad de las fases de inicio/parada planificadas y de paradas de emergencia.
- La implementación real del controlador puede necesitar transferencia suave entre modos manual/auto/override para pruebas aisladas, eventos relacionados con la seguridad, procedimientos de inicio/parada, etc.
- Supervisa las referencias: no permitas valores inseguros, fuera de límites o cambios demasiado rápidos.
- Registra los datos operativos, comandos del operador y cambios de configuración en tus sistemas de control. Registra alarmas y eventos de override, por supuesto.

5. Mejora continua: análisis de datos a posteriori

- Verificar, *a posteriori*, que se alcanzaron los objetivos de rendimiento/eficiencia. Pruebas costosas: submuestreo adecuado para el control de calidad.
- Analizar los registros para determinar “eventos anormales”. Pueden ser “**malos**” (fallos: intentemos que no se repitan) o “**buenos**” (obtuvimos resultados sorprendentemente buenos, intentemos repetir).
- Analizar la “variabilidad” (varianza) de los registros históricos registrados. Identificar las “causas raíz” de la variabilidad para evaluar si es viable resolverlas. La calidad garantizada de mi producto (precio de venta) depende de media y varianza de las VC (int. confianza 99%), y no de “tiempo de establecimiento” o “polos” (no directamente).
- Identificar tendencias en la demanda, tasas de fallos anormales... Estas tendencias pueden utilizarse en planificación de producción y programa de mantenimiento.
- El análisis puede llevarse a cabo manualmente “mirando gráficos y hojas de cálculo”, o bien, utilizando software especializado de “minería de datos”/estadísticas.

Conclusiones

- El éxito del “**control a nivel de planta completa**” para **operar eficientemente** una planta industrial compleja es mucho más que “lugar de las raíces”.
- Un sistema complejo funcionando bien requiere de muchos pasos, desde diseño del proceso e instrumentación, hasta la elección de proveedores de software y flujos de trabajo de análisis de datos adecuados. Muchos de ellos están “relacionados con el control” ... Intenté resumirlos aquí.
- Los **ladrillos básicos** que aprendes en cursos de grado son **importantes** (función de transferencia, estabilidad, lugar de las raíces, realimentación del estado, observador, ...), pero son **parte de algo más grande**... un premio Nobel en química de hidrocarburos quizás no te cualifica para liderar un equipo de F1.
- **Necesitas tener una “PERSPECTIVA COMPLETA” cuando trabajas de “ingeniero de procesos senior” / líder de equipo.**

*La mayoría de las ideas en estas diapositivas **no son tan útiles** para doctorado, perfiles de robótica, aeroespacial...

