

Capítulo 2

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

2.1. INTRODUCCIÓN

Se pueden distinguir en el diseño del proyecto dos partes claramente diferenciadas:

Hardware: En esta parte para una mejor concepción del funcionamiento del proyecto dividiremos el hardware en tres grupos, que serán la adquisición de datos, la actuación del sistema sobre la cámara y el circuito de limpieza del aire que se encuentra en el interior de la cámara:

- Para la adquisición de datos utilizamos tres sensores, uno para conocer la temperatura, otro para la humedad, y el último para conocer la concentración de oxígeno. Estos datos llegan a una placa que nos sirve tanto para recogerlos, como para alimentar a los sensores, además de ayudarnos a pasar esta información a la tarjeta de adquisición de datos y aislarla de las posibles subidas de tensión.
- Una vez que los datos que nos llegan de los sensores a través de esta placa de acondicionamiento de la señal son tratados por el software, donde se dictamina si es necesario o no la actuación de unas electroválvulas que controlan la salida de nitrógeno o aire, según sea la necesidad en cada ocasión.

- Para controlar la atmósfera existente en la cámara de Hipoxia se utiliza un circuito de limpieza que estará funcionando en todo momento. Este circuito se basa en una bomba de vacío que extrae el aire desde dentro de la cámara y lo hace pasar por tres filtros, los cuales limpian este aire antes de volver a entrar en la cámara de humedad, dióxido de carbono y amoníaco, gracias a los productos que contienen.

Software: En LABVIEW se programa la aplicación software en la que se puede visualizar el valor y trayectoria de las señales de temperatura, humedad y oxígeno.

En esta aplicación además de la monitorización de las señales anteriormente mencionadas también se puede establecer la concentración de oxígeno deseado, gracias al control PID que se ha implementado en la aplicación.

Todos los datos que han ido ocurriendo durante el experimento son guardados según el tiempo entre muestras que haya sido elegido por el usuario de la aplicación en un archivo de Excel con lo que el investigador ya tendría los datos en formato digital para su posterior tratamiento.

2.2. FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL SISTEMA

Para la descripción del funcionamiento del sistema vamos a empezar con la recogida de datos, seguida del estudio de estos y por último como se actúa sobre el sistema.

La recogida de datos se realiza a través de los sensores, consiguiendo de esta manera las medidas existentes de humedad, oxígeno y temperatura.

Estos sensores están alimentados por una fuente de alimentación de 12 V y 1,5 A, la cual es compartida para el accionamiento de las electroválvulas.

Gracias a la etapa de acondicionamiento de señal esta alimentación de 12 V pasa a 5 V, tensión necesaria para los sensores gracias a un regulador de tensión (LM7805). La salida de estos sensores llega al bloque conector de National Instruments que hace llegar estos datos a la tarjeta de adquisición de datos (PCI 6024-E, National Instruments), en la tarjeta ya se han definido los canales virtuales los cuales se relacionan con el pincado del bloque conector que nos ayudarán a tratar esta información procedente de los sensores.

En la creación de estos canales virtuales ya se ha tenido en cuenta las características de estas señales, clasificándolos como entrada analógica con un rango de $\pm 5V$, y especificando el modo de conexión, RSE, para ello hemos tenido en cuenta las características del medio, de la fuente y la longitud del cable.

Una vez que la información de los sensores llega a la tarjeta de adquisición de datos tiene un tratamiento específico. Las medidas de humedad y temperatura son tratadas con el único objeto de ser almacenadas y monitorizadas. Las medidas de oxígeno sin embargo tienen un mayor tratamiento puesto que además del almacenamiento y monitorización también se utilizará para el control PID implementado. En el capítulo cuatro, trataremos más a fondo cómo se realiza esta tarea.

Este control PID, junto con el nivel de oxígeno deseado hará que se produzca o no una acción sobre el sistema. Si tras su estudio el nivel está por debajo del que el control estima necesario se producirá una inyección de aire del exterior y si por el contrario el nivel está por encima se inyectará nitrógeno.

Las acciones sobre las electroválvulas que controlan el nitrógeno o aire, se realizan a través de dos canales virtuales, configurados como salidas digitales. Estos canales están unidos a la etapa de acondicionamiento de señal por medio del bloque conector. Estos canales al ser activados alimentan la base del transistor (BC556) activando a su vez el relé que actúa como interruptor para el paso de la alimentación a cada una de las electroválvulas, tanto la que controla la inyección de nitrógeno como la inyección de aire desde el compresor.

Al margen de todo lo comentado anteriormente está el circuito de limpieza del aire. Este circuito está compuesto por la bomba extractora y tres filtros. Este circuito está funcionando en todo momento. La bomba extrae un caudal de aire, el cual pasa por los filtros limpiándolo de humedad, amonio y dióxido de carbono.

En la siguiente figura se muestra la Cámara de Hipoxia Crónica completa.



Figura 2.1: *Cámara de Hipoxia completa*

2.3. INTRODUCCIÓN AL CONTROL PID

Puesto que el objetivo principal es el mantener la concentración de oxígeno en el interior de la cámara y esto se consigue gracias al control PID implementado, nos disponemos a explicar las características de este tipo de controles.

El control por realimentación tiene una larga historia que comenzó con el deseo primordial de los seres humanos de dominar los materiales y las fuerzas de la naturaleza en su provecho.

Los primeros ejemplos de dispositivos de control incluyen los sistemas de regulación de relojes y los mecanismos para mantener los molinos de viento orientados en la dirección del viento.

Las plantas industriales modernas poseen sofisticados sistemas de control que son cruciales para su operación correcta.

La ingeniería de control ha tenido un enorme impacto en nuestra sociedad.

Åström cita a Wilbur Wright (1901):

« *Sabemos como construir aeroplanos.*»

«Sabemos como construir motores.»

« El no saber cómo **equilibrar** y **maniobrar** aún desafía a los estudiantes del problema de vuelo.»

«Cuando esta única dificultad sea resuelta, la era del vuelo habrá arribado, ya que todas las demás dificultades son de menor importancia.»

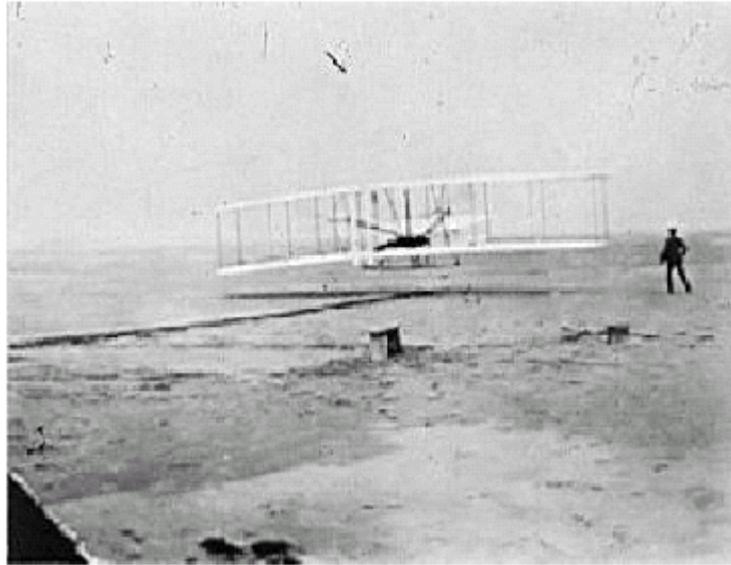


Figura 2.2: *Hermanos Wright*

Los hermanos Wright resolvieron cómo **equilibrar** y **maniobrar** y volaron el Kitty Hawk el 17 de diciembre de 1903.

De hecho, ninguno de los sistemas modernos (aviones, trenes de alta velocidad, reproductores de CD, etc.) podrían operar sin la ayuda de sofisticados sistemas de control.

¿Dónde se usa control?

- Procesos industriales
- Transporte
- Autos
- Trenes
- Barcos
- Aviones
- Naves espaciales
- Generación de energía
- Transmisión de energía
- Mecatrónica
- Instrumentación

- Artefactos electrónicos
- Economía
- Medicina
- Un mejor control es la clave tecnológica para lograr productos de mayor calidad
- Minimización de desperdicios
- Protección del medio ambiente
- Mayor rendimiento de la capacidad instalada
- Mayores márgenes de seguridad

2.3.1. Tipos de diseños de control

El diseño de sistemas de control también toma distintas formas, cada una de las cuales requiere enfoques ligeramente distintos.

Los ingenieros de control deben resolver problemas en las distintas etapas de la «vida» de un sistema de control, por ejemplo:

- Diseño inicial «de base»
- Construcción y ajuste
- Refinamiento y actualización
- Estudio «forense»

2.3.2. Integración de sistemas

El éxito en ingeniería de control se apoya en tener un enfoque «global» de los problemas. Algunos de los elementos a tener en cuenta:

- la planta, el proceso a ser controlado
- los objetivos
- los sensores
- los actuadores
- las comunicaciones
- el cómputo
- la configuración e interfaces

- los algoritmos
- las perturbaciones e incertidumbres

2.3.3. La planta

La estructura física de la planta es una parte intrínseca del problema de control.

Por lo tanto, los ingenieros de control deben estar familiarizados con la «física» del proceso bajo estudio. Esto incluye conocimientos básicos de balances de energía, balances de masas, y flujo de materiales en el sistema.

2.3.4. Los sensores

Los sensores son los ojos del sistema de control, que le permiten ver qué está pasando. De hecho, algo que suele decirse en control es:

Si se puede medir, se puede controlar.

2.3.5. Los actuadores

Una vez ubicados los sensores para informar el estado de un proceso, sigue determinar la forma de actuar sobre el sistema para hacerlo ir del estado actual al estado deseado.

Un problema de control industrial típicamente involucrará varios actuadores distintos (ejemplo: tren de laminación).

2.3.6. Las comunicaciones

La interconexión de sensores y actuadores requieren el uso de sistemas de comunicación.

Una planta típica va a tener miles de señales diferentes que se verán ser transmitidas largas distancias. Así, el diseño de sistemas de comunicación y sus protocolos asociados es un aspecto cada vez más importante de la ingeniería de control moderna.

2.3.7. El cómputo

En los sistemas de control modernos la interconexión de sensores y actuadores se hace invariablemente a través de una computadora de algún tipo. Por lo tanto, los aspectos computacionales son necesariamente una parte del diseño general.

Los sistemas de control actuales usan una gama de dispositivos de cómputo, que incluyen DCS (sistemas de control distribuido), PLC (controladores lógicos programables), PC (computadoras personales), etc.

2.3.8. Configuración e interfaces

La cuestión de qué se conecta con qué no es trivial en el diseño de un sistema de control. Podría pensarse que lo mejor siempre sería llevar todas las señales a un punto central, de manera que cada acción de control esté basada en información completa (el denominado control centralizado).

Sin embargo, esta raramente es la mejor solución en la práctica. De hecho, hay muy buenas razones por las que no conviene llevar todas las señales a un punto común. Algunas obvias son complejidad, costos, limitaciones en tiempo de cómputo, mantenimiento, confiabilidad, etc.

2.3.9. Homogeneidad

Finalmente, todos los sistemas interconectados, incluyendo sistemas de control, sólo pueden ser tan buenos como el elemento más débil.

Las consecuencias de este hecho en el diseño de control son que debe tenderse a que todos los componentes (planta, sensores, actuadores, comunicaciones, cómputo, interfaces, algoritmos, etc.) sean de una precisión y calidad aproximadamente comparable.

2.4. MODELOS SEÑALES Y SISTEMAS

2.4.1. Modelos en control

El diseño de un sistema de control típicamente requiere un delicado balance entre limitaciones fundamentales y soluciones de compromiso. Para poder lograr este balance, es necesario tener una comprensión cabal del proceso en cuestión.

Esta comprensión usualmente se captura en un modelo matemático. Teniendo un modelo, es posible predecir el impacto de distintos diseños posibles sin comprometer al sistema real. En este capítulo vamos a discutir brevemente cómo elegir el nivel adecuado de complejidad de un modelo; linealizar modelos no lineales; obtener experimentalmente modelos elementales.

2.4.2. El por qué de los modelos matemáticos en control

El control del nivel en este proceso sólo tiene tres formas de manipular la válvula: abrirla, cerrarla, o dejarla como está.

Sin embargo, hemos visto también que el modo preciso en que estas acciones se llevan a cabo involucran compromisos delicados entre objetivos de diseño contrapuestos, tales como la velocidad de respuesta y la sensibilidad a ruido de medición.

Para muchos problemas es posible encontrar un controlador adecuado simplemente mediante prueba y error. Sin embargo, en muchos casos el enfoque de prueba y error no es factible, debido a complejidad, eficiencia, costo, o aún seguridad.

En particular, es imposible mediante prueba y error responder a cuestiones como las siguientes antes de hacer pruebas:

- Dada una planta y un objetivo deseado de operación, ¿qué controlador puede alcanzarlo? ¿Se puede alcanzar el objetivo propuesto con algún controlador?
- Dados un controlador y una planta, ¿cómo operarán en lazo cerrado?
- ¿Por qué un lazo dado opera de la forma que lo hace?
- ¿Puede mejorarse? ¿Con qué controlador?
- ¿Cómo cambiaría la operación si se cambiaran los parámetros del sistema, o si las perturbaciones fueran mayores, o si fallara algún sensor?

Para responder sistemáticamente a estas cuestiones necesitamos modelos matemáticos.

Los modelos matemáticos nos brindan los medios de capturar el comportamiento de un sistema sujeto a condiciones iniciales, entradas de control y perturbaciones mediante un conjunto de ecuaciones matemáticas.

La importancia de los modelos matemáticos radica en que pueden ser simulados en situaciones hipotéticas, ensayados en estados que serían peligrosos en el sistema real, y usados como base para sintetizar controladores.

2.4.3. Complejidad de modelos

Al construir un modelo es importante tener en cuenta que todo proceso real es complejo, por lo que cualquier intento de construir una descripción exacta de la planta es usualmente una meta imposible de alcanzar.

Afortunadamente, la realimentación usualmente nos permite tener éxito aún con modelos muy simples, siempre y cuando éstos capturen las características esenciales del problema.

Es importante destacar que los modelos empleados para control usualmente difieren de los utilizados, por ejemplo, para diseño del proceso.

Los sistemas reales pueden ser arbitrariamente complejos, por lo que todo modelo deberá ser necesariamente una descripción aproximada del proceso. Introducimos tres definiciones para clarificar este enunciado.

- Modelo nominal. Es una descripción aproximada de la planta que se usa para el diseño de control.
- Modelo de calibración. Es una descripción más exhaustiva de la planta. Incluye características no usadas en el diseño de control pero que tienen directa influencia en el desempeño alcanzado.
- Error de modelo. Es la diferencia entre el modelo nominal y el modelo de calibración. Los detalles de este error podrían ser desconocidos, pero podrían disponerse de cotas aproximadas.

2.4.5. Construcción de modelos

Dos enfoques diferenciados para la construcción de modelos:

Experimental. Se basa en pensar al sistema como una caja negra. En este enfoque se postula una determinada estructura de modelo, a la que se varían los parámetros, bien vía prueba y error, o bien vía algún algoritmo, hasta

que la el comportamiento dinámico del modelo se ajusta al observado en la planta mediante ensayos.

Analítico. Se basa en el uso de leyes físicas (conservación de masa, energía y momento). El modelo se obtiene a partir de las leyes fenomenológicas básicas que determinan las relaciones entre todas las señales del sistema.

En la práctica es común combinar ambos enfoques.

2.4.6. Linealización

Aunque casi todo sistema real tiene características no lineales, muchos sistemas pueden describirse razonablemente por modelos lineales, al menos dentro de ciertos rangos de operación.

Como normalmente un sistema de control opera en las cercanías de un equilibrio, se hace una linealización alrededor de este equilibrio. El resultado es un modelo lineal, mucho más simple, pero adecuado para el diseño de control. Para un mismo sistema no lineal, la linealización alrededor de distintos puntos de equilibrio dará, en general, distintos modelos linealizados.

2.5. ANALISIS DE SISTEMAS REALIMENTADOS

2.5.1. Estructuras de realimentación

La realimentación puede tener muchas propiedades deseables, tales como la capacidad de reducir el efecto de perturbaciones, disminuir la sensibilidad a errores de modelado, o estabilizar un sistema inestable.

Sin embargo, es posible también con realimentación mal aplicada inestabilizar un sistema previamente estable, incorporar oscilaciones en una respuesta previamente suave, o generar alta sensibilidad a ruido de medición.

Comenzamos el análisis de sistemas en realimentación con la estructura de control SISO de la Figura 2.3, llamada de un grado de libertad, pues hay sólo una transferencia modificable para alcanzar los objetivos deseados: la del controlador $K(s)$.

Inicialmente analizaremos el lazo nominal, o sea, el formado con el modelo nominal de la planta $G_0(s)$. Más tarde veremos el efecto de considerar errores de modelado.

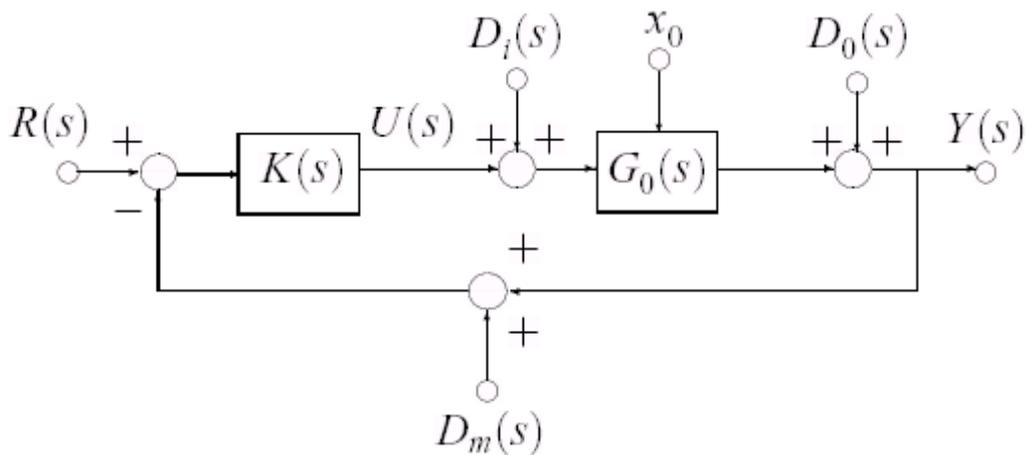


Figura 2.3. Sistema de control de un grado de libertad

Usamos funciones de transferencia y transformadas de Laplace para describir las relaciones entre las señales en el lazo: la entrada de referencia $R(s)$, las perturbaciones $D_i(s)$; $D_o(s)$; $D_m(s)$, el estado inicial de la planta x_0 , la salida $Y(s)$ y el control $U(s)$.

En particular, $K(s)$ y $G_0(s)$ representan las funciones transferencia del controlador y el modelo nominal de la planta, que pueden representarse en forma racional en la forma

$$K(s) = \frac{P(s)}{L(s)}, \quad G_0(s) = \frac{B_0(s)}{A_0(s)}.$$

Tomamos como salidas de interés en el lazo la salida perturbada de la planta, $Y(s)$, y la señal de control $U(s)$, que se relacionan a las entradas a través de las ecuaciones

$$U(s) = \frac{K(s)}{1 + G_0(s)K(s)} \left[R(s) - D_m(s) - G_0(s)D_i(s) - \frac{f(s, x_0)}{A_0(s)} \right]$$

$$Y(s) = \frac{1}{1 + G_0(s)K(s)} \left[G_0(s)K(s) (R(s) - D_m(s)) + D_o(s) + G_0(s)D_i(s) - \frac{f(s, x_0)}{A_0(s)} \right]$$

Estabilidad de lazo cerrado en base al Polinomio Característico

Lazo nominal es el resultante de conectar un controlador al modelo nominal de la planta.

Estabilidad interna. Decimos que el lazo nominal es *internamente estable* si las funciones transferencia son estables.

Esta definición es equivalente a pedir que todas las señales en el lazo sean acotadas para cada conjunto de entradas $r(t)$; $d_i(t)$; $d_o(t)$ y $dm(t)$ acotadas.

Teorema. [Estabilidad interna nominal] *El lazo cerrado es internamente estable si y sólo si todas las raíces de la ecuación característica a lazo cerrado tienen parte real negativa.*

La idea de estabilidad interna implica más que la estabilidad de la referencia a la salida. Además se requiere que no haya cancelaciones de polos inestables entre planta y controlador.

La ecuación característica es de la forma $p(s) = 0$, donde $p(s)$ es el **polinomio característico** del lazo cerrado.

2.5.2. Estabilidad y respuesta en frecuencia

Una herramienta clásica y durable para determinar la estabilidad de un lazo de realimentación es el **criterio de estabilidad de Nyquist**. En el criterio de Nyquist, la estabilidad del sistema a lazo cerrado se determina a partir de la respuesta en frecuencia del sistema a lazo abierto, $G_o(s)K(s)$, que se grafica en un **diagrama polar**.

2.6. CONTROL PID CLÁSICO

2.6.1. Introducción

Examinamos una particular estructura de control que es casi universalmente utilizada en la industria.

Se trata de la familia de controladores de estructura fija llamada familia de controladores PID.

Estos controladores han mostrado ser robustos y extremadamente beneficiosos en el control de muchas aplicaciones de importancia en la industria.

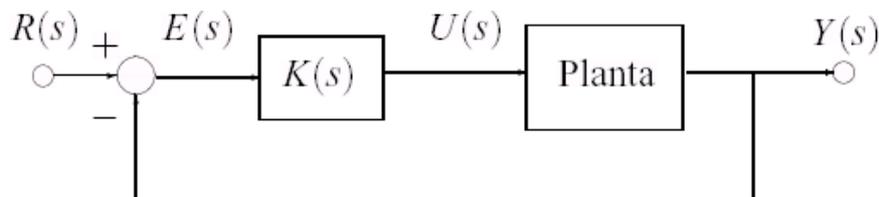
PID significa Proporcional, Integral y Derivativo.

Históricamente, ya las primeras estructuras de control usaban las ideas del control PID. Sin embargo, no fue hasta el trabajo de Minorsky de 1922, sobre conducción de barcos, que el control PID cobró verdadera importancia teórica.

Hoy en día, a pesar de la abundancia de sofisticadas herramientas y métodos avanzados de control, el controlador PID es aún el más ampliamente utilizado en la industria moderna, controlando más del 95 % de los procesos industriales en lazo cerrado.

Estructura PID

Consideramos el lazo básico de control SISO



Las formas estándar de controladores PID:

Proporcional

$$K_P(s) = K_p$$

Proporcional e Integral

$$K_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

Proporcional y Derivativo

$$K_{PD} = K_p \left(1 + \frac{T_d s}{\tau_d s + 1} \right)$$

Proporcional, Integral y Derivativo

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

Alternativamente, tenemos la forma serie

$$K_{\text{serie}}(s) = K_s \left(1 + \frac{I_s}{s} \right) \left(1 + \frac{D_s s}{\gamma_s D_s s + 1} \right),$$

y la forma paralelo

$$K_{\text{paralelo}}(s) = K_p + \frac{I_p}{s} + \frac{D_p s}{\gamma_p D_p s + 1}.$$

2.6.2. Ajuste empírico de controladores PID

Debido a su difundido uso en la práctica, presentamos a continuación varios métodos de ajuste empírico de controladores PID, basados en mediciones realizadas sobre la planta real.

Estos métodos, referidos como **clásicos**, comenzaron a usarse alrededor de 1950.

Los métodos clásicos de ajuste que presentaremos son

- El método de oscilación de Ziegler-Nichols
- El método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols

- El método de la curva de reacción de Cohen-Coon

Método de oscilación de Ziegler-Nichols

Este método es válido sólo para plantas estables a lazo abierto.

El procedimiento es el siguiente:

1. Aplicar a la planta sólo control proporcional con ganancia K_p pequeña.
2. Aumentar el valor de K_p hasta que el lazo comience a oscilar. La oscilación debe ser lineal y debe detectarse en la salida del controlador ($u(t)$).
3. Registrar la ganancia crítica $K_p = K_c$ y el período de oscilación P_c de $u(t)$, a la salida del controlador.
4. Ajustar los parámetros del controlador PID

Es importante saber cuál es la estructura (estándar, serie o paralelo) del PID al que se aplica el ajuste propuesto por Ziegler y Nichols. Existe cierta controversia respecto a cuál fue la estructura originalmente usada por Ziegler y Nichols; las reglas dadas aquí se proponen para la estructura estándar.

Desempeño con el método de oscilación de Z-N

Notar que el modelo intrínsecamente obtenido en el experimento es sólo **un punto de la respuesta en frecuencia**, que corresponde a fase -180° y magnitud K_c^{-1} , dado que el diagrama de Nyquist cruza el punto $(-1; 0)$ cuando $K_p = K_c$.

Para analizar el efecto del ajuste de control proporcionado por el método de oscilación de Ziegler-Nichols consideremos una planta general con función transferencia

$$G_0(s) = \frac{k_0 e^{-s\tau_0}}{\gamma_0 s + 1}; \quad \gamma_0 > 0.$$

La Figura 2.4 muestra la respuesta del lazo cerrado con un controlador PID ajustado mediante el método de oscilación de Ziegler-Nichols para distintos valores de $x = t_0 = g_0$. El eje de tiempos se representa normalizado en unidades de $t = t_0$.

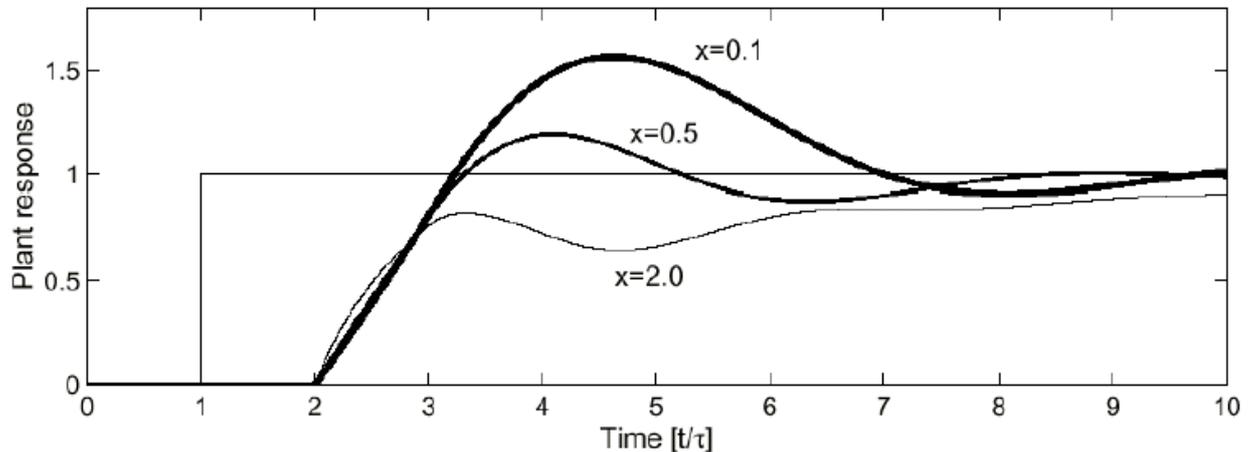


Figura 2.4. Respuesta a lazo cerrado de la planta con PID ajustado mediante el método de oscilación de Ziegler-Nichols

Vemos que el ajuste es muy sensible al cociente $t_0 = g_0$. Otra limitación es que se requiere forzar en la planta una oscilación que puede ser peligrosa o inconveniente en muchos casos.

Método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols

Una versión linealizada cuantitativa de este modelo puede obtenerse mediante un experimento a lazo abierto con el siguiente procedimiento:

1. Llevar manualmente la planta a lazo abierto a un punto de operación normal manipulando $u(t)$. Supongamos que la planta se estabiliza en $y(t) = y_0$ para $u(t) = u_0$.
2. En un instante inicial t_0 aplicar un cambio escalón en la entrada, de u_0 a ∞ , el salto debe estar entre un 10 a 20% del valor nominal.

3. Registrar la respuesta de la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación. La Figura 2.5 muestra una curva típica.

4. Calcular los parámetros del modelo de las fórmulas

$$k_0 = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0}, \quad \tau_0 = t_1 - t_0, \quad \gamma_0 = t_2 - t_1.$$

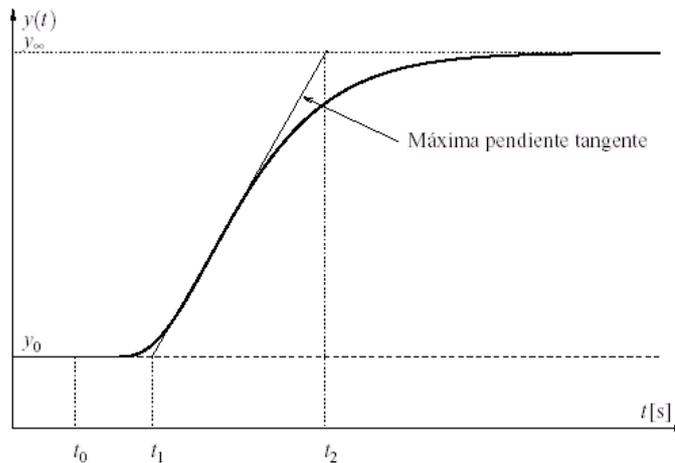


Figura 2.5. Respuesta al escalón (*curva de reacción*) en lazo abierto de la planta

Desempeño con el método de la CR de C-C

La Figura 2.6 muestra la respuesta de lazo cerrado con el ajuste Cohen-Coon. Aunque aún es sensible a $x = t/g_0$, la respuesta es mucho más homogénea que con el ajuste Ziegler-Nichols.

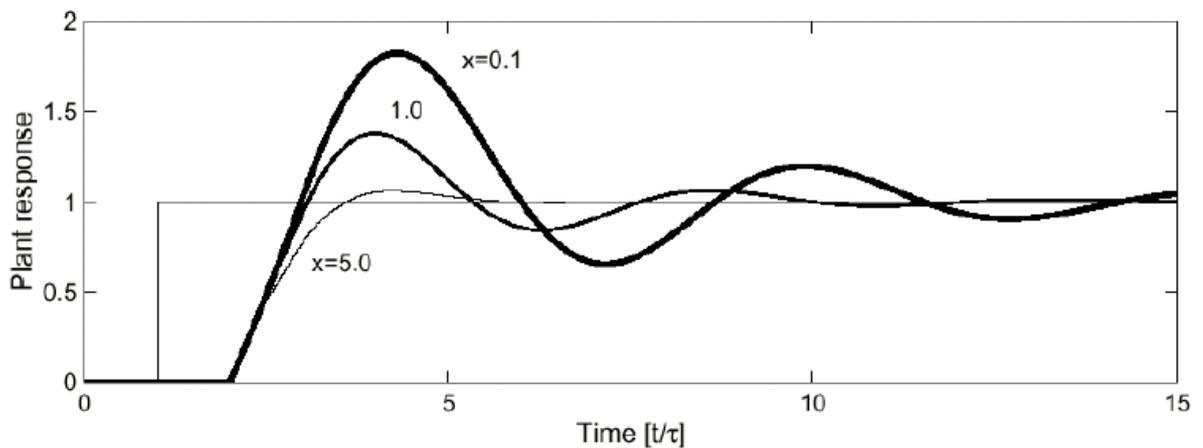


Figura 2.6: *Respuesta a lazo cerrado de la planta con PID ajustado de la curva de reacción vía Cohen-Coon*

2.6.3. Conclusiones

Los controladores PID se usan ampliamente en control industrial.

Desde una perspectiva moderna, un controlador PID es simplemente **un controlador de segundo orden con integración**. Históricamente, sin embargo, los controladores PID se ajustaban en términos de sus componentes **P, I y D**.

La estructura PID ha mostrado empíricamente ofrecer suficiente flexibilidad para dar excelentes resultados en muchas aplicaciones.

El término básico en el controlador PID es el proporcional **P**, que origina una actuación de control correctiva proporcional al error.

El término integral **I** brinda una corrección proporcional a la integral del error. Esta acción tiene la ventaja de asegurar que en última instancia se aplicará suficiente acción de control para reducir el error de regulación a cero. Sin embargo, la acción integral también tiene un efecto desestabilizador debido al corrimiento de fase agregado.

El término derivativo **D** da propiedades predictivas a la actuación, generando una acción de control proporcional a la velocidad de cambio del error. Tiende a dar más estabilidad al sistema pero suele generar grandes valores en la señal de control.

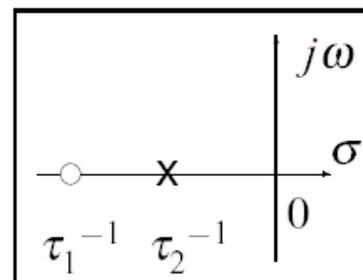
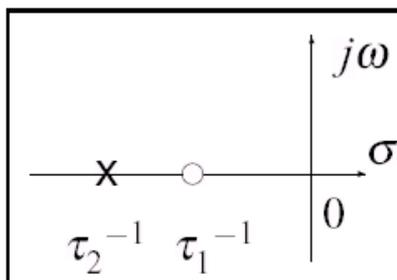
Varios métodos empíricos pueden usarse para determinar los parámetros de un PID para una dada aplicación. Sin embargo, **el ajuste obtenido debe tomarse como un primer paso** en el proceso de diseño.

Debe prestarse atención al particular tipo de estructura de PID disponible (por ejemplo, estándar, serie o paralelo).

2.7. Compensadores en Atraso-Adelanto

Una idea muy cercana a la del control PID es la de compensación en **atraso-adelanto**. La función transferencia de estos compensadores es de la forma

$$K(s) = \frac{\tau_1 s + 1}{\tau_2 s + 1}.$$



Si $t_1 > t_2$ el compensador es una **red de adelanto**.

Si $t_1 < t_2$ el compensador es una **red de atraso**.

Las redes de atraso y adelanto permiten modificar localmente la respuesta en frecuencia de la planta, respectivamente agregando o restando fase, dentro del rango de frecuencias comprendido entre el cero y el polo del compensador.

El compensador final en un diseño dado podría construirse como la cascada de varias redes de atraso o adelanto. De esta forma el diseño se subdividía en etapas, en cada una de las cuales se modificaban porciones específicas de la respuesta en frecuencia de la planta.

Estos compensadores eran muy fácilmente ajustados en forma gráfica utilizando los diagramas de Bode o Nyquist.

La red de adelanto **aumenta** la fase del sistema dentro de un rango limitado de frecuencias.

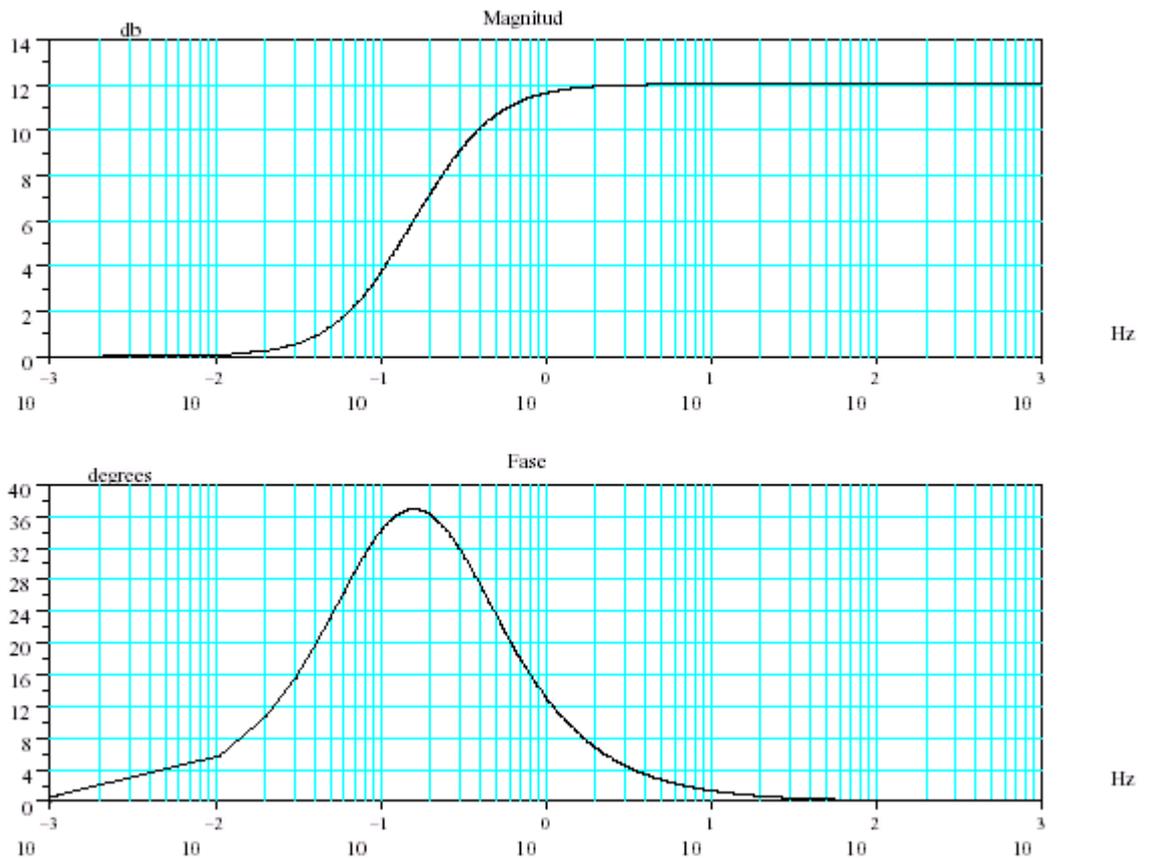


Diagrama de Bode de una red de adelanto.

La red de atraso **disminuye** la fase del sistema dentro de un rango limitado de frecuencias.

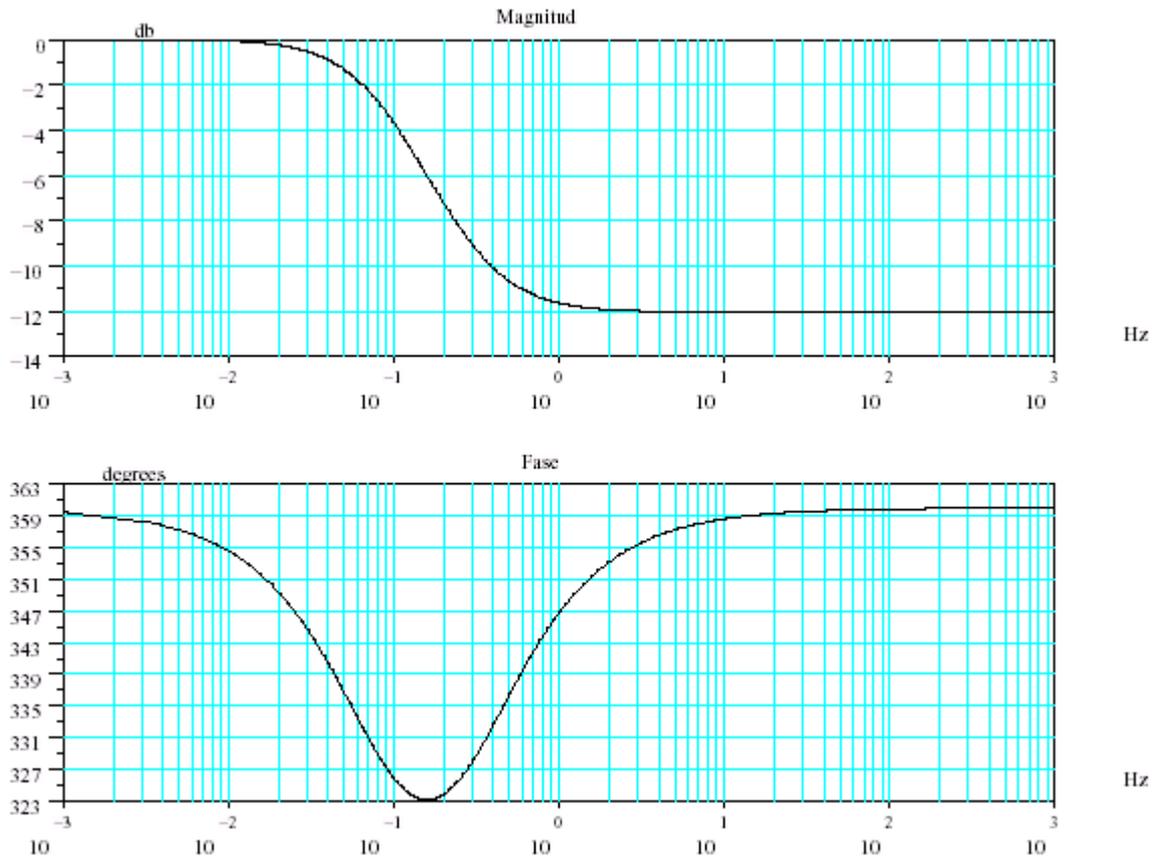
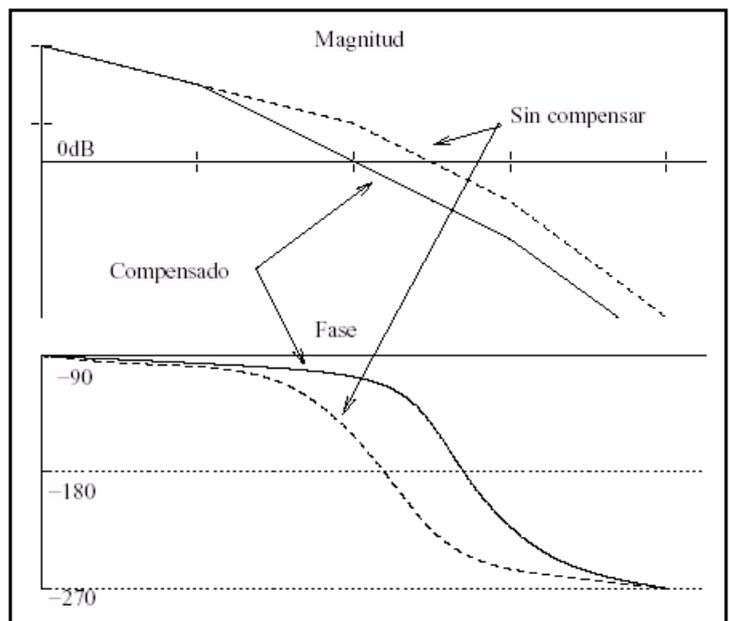
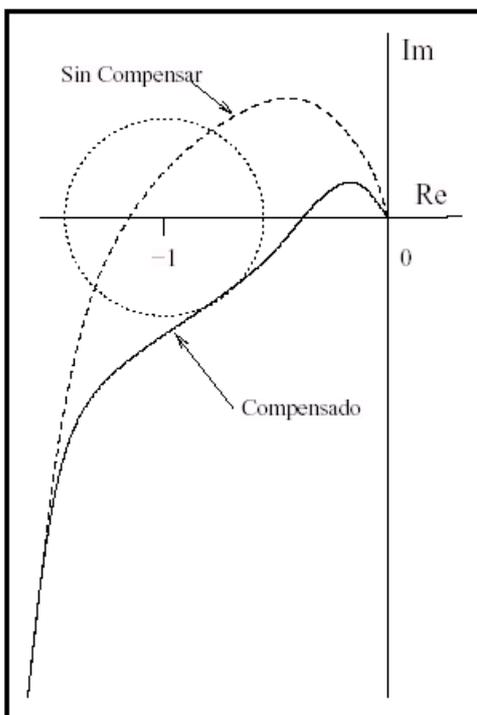


Diagrama de Bode de una red de atraso.



Efecto de compensación por adelanto en una planta de tipo

$$G_0(s) = \frac{1}{s(\alpha_1 s + 1)(\alpha_2 s + 1)}$$

en diagrama de Nyquist (izquierda) y Bode (derecha).