

Identificación y sintonización de PID de una regulación de temperatura en un proceso industrial

Autor: David Gómez de la Riva

Tutor académico: Ibon Sagastabeitia (Depto. Electricidad y Electrónica)

1. INTRODUCCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

Es habitual encontrar en la industria procesos que hay que regular y del que no se conoce su función de transferencia, o en general la relación entre la entrada al mismo (por ejemplo la posición de una válvula que abre o cierra el paso de un líquido que refrigera la temperatura de un depósito) con la salida del proceso (p.ej. la temperatura a la que está el depósito).

En el trabajo realizado en primer lugar se han estudiado varios métodos de identificación de los parámetros del modelo matemático del proceso, para a continuación utilizar uno de ellos (Modelo de los 4 parámetros. Modelo Van der Grinten).

En segundo lugar se ha sintonizado el regulador que controle el proceso. El control elegido ha sido un control tipo PID mediante la técnica del método Kappa-Tau. Para sintonizar un PID basta normalmente con disponer de un modelo de primer o segundo orden. Modelo que se ha obtenido anteriormente mediante la aplicación de un método gráfico basado en la respuesta del proceso a un escalón en lazo abierto.

Para poder controlar cualquier proceso industrial, disponemos de un autómatas, llamado SNCC TDC-3000 de Honeywell. El SNCC TDC-3000 de Honeywell, es un autómatas muy flexible que nos permite:

- Conexión de todas las señales de entrada y salida.
- Visualización a tiempo real de todas las variables de proceso.
- Distintos niveles de manejo los procesos, como son el nivel de ingeniería, nivel de operario y nivel de supervisor.
- Control total de nuestro proceso, mediante la programación de PID's, creación de secuencias de proceso, seguimiento de todas las alarmas surgidas...
- Histórico de todas las variables y la evolución de todos los procesos.

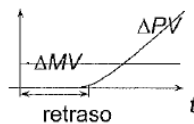
2. IDENTIFICACIÓN DE LA RESPUESTA

La forma de obtener empíricamente la función de transferencia del modelo matemático que representa la relación entrada-salida del proceso consiste en obtener la señal de salida o respuesta del mismo en lazo abierto ante un cambio brusco o escalón en la referencia.

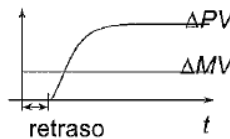
El proceso para realizarlo se puede resumir en el siguiente algoritmo:

- Se dispone el lazo en modo manual.
- Tras esperar a que se estabilice la variable controlada (PV), se varía de forma significativa y brusca (escalón) la variable manipulada (MV)
- Se capta la respuesta de la PV y plasma sobre papel, o en un soporte electrónico.
- La respuesta a un escalón es una forma sencilla y cómoda de caracterizar la dinámica del proceso, ya que:

- ✓ Se excita el sistema sobre todo en las bajas frecuencias, que son normalmente las que interesan para obtener un modelo empírico para el control.
- ✓ La interpretación física es simple.
- ✓ La realización es sencilla.
- La identificación por este método requiere que no interfiera durante el ensayo ninguna perturbación significativa.
 - ✓ El modelo persigue obtener una relación matemática entre las señales de entrada y salida.
 - ✓ Una perturbación afecta a la salida, superponiendo su efecto al del MV.
 - ✓ Si existe una perturbación, el modelo describirá erróneamente el comportamiento de la PV como originado únicamente por el MV.
- El retraso del proceso debe quedar reflejado en el modelo:
 - ✓ En muchos casos, el proceso no comienza a reaccionar a la variación del MV hasta transcurrido un cierto tiempo, por ejemplo debido a un efecto de transporte de materia o de energía.
- El modelo es válido también para un proceso inestable o integrador:



- Aunque normalmente se trata de procesos estables o no oscilatorios:



3. MODELOS DE REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA ENTRE LA SEÑAL DE ENTRADA Y SALIDA

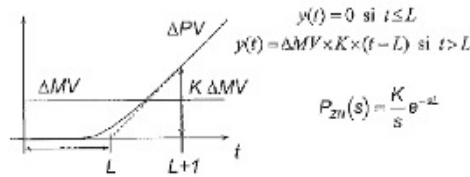
Podemos encontrarnos con muchos tipos de modelos, para según sea el proceso a identificar:

- El modelo de 2 parámetros con retraso puro (Ziegler-Nichols)
- El modelo de 3 parámetros.
- El método de la constante de tiempo
- El método de los momentos
- El modelo de los 4 parámetros, método de Van der Grinten.

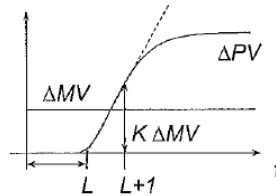
A continuación se va a explicar dos de ellos, el de 2 parámetros para el caso de los sistemas inestables o con integrador y el de 4 para los estables no oscilatorios.

3.1. MODELO INTEGRADOR CON RETRASO PURO DE ZIEGLER-NICHOLS

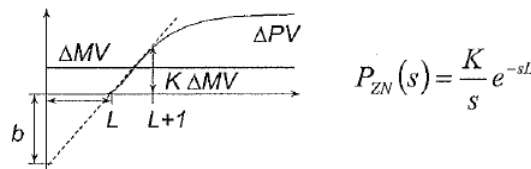
Este modelo se aplica de forma natural a los procesos inestables o con integradores. El modelo tiene un retraso puro L , y después integra el MV. La aproximación consiste en utilizar la asíntota a la curva de la respuesta del proceso.



También puede emplearse para aproximar la respuesta de un proceso estable (aunque es menos riguroso).



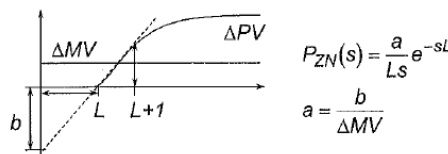
En este caso, la aproximación consiste en tomar la tangente en el punto de inflexión de la respuesta (punto de máxima pendiente). El método de Ziegler-Nichols permite calcular los parámetros de un modelo integrador:



El retraso L se estima por intersección de la recta de pendiente máxima con el eje horizontal (valor de equilibrio antes de modificar el MV). Se miden b y L, y por semejanza de triángulos:

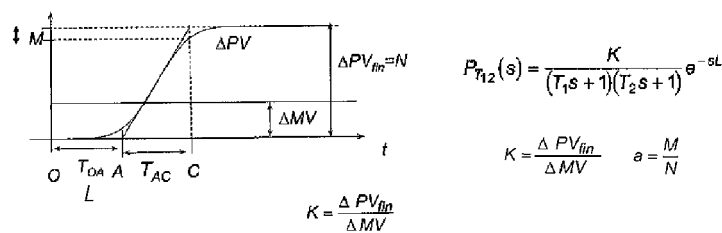
$$\frac{K \times \Delta MV}{(L+1) - L} = \frac{b}{L} \Rightarrow K = \frac{b}{L \times \Delta MV}$$

En la literatura técnica aparece a menudo el modelo en una forma diferente, con la ganancia K dada por a/L



3.2. MODELO DE LOS 4 PARÁMETROS. MODELO VAN DER GRINTEN.

Este modelo tiene una ganancia, 2 constantes de tiempo y un retraso puro. Tras el retraso L, el modelo reacciona según una doble exponencial (suma de 2 exponenciales). Se pueden obtener los parámetros de una manera gráfica:



Los tres parámetros T1, T2 y L vienen dados por las fórmulas siguientes:

$$T_1 = T_{AC} \frac{3 \cdot a \cdot e - 1}{1 + a \cdot e} \quad T_2 = T_{AC} \frac{1 - a \cdot e}{1 + a \cdot e}$$

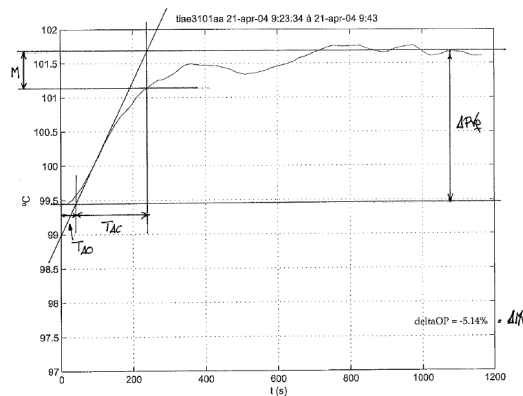
$$L = T_{OA} - \frac{T_1 T_2}{T_1 + 3 T_2}$$

El modelo es válido si se cumple:

$$\frac{1}{3e} < a < \frac{1}{e}$$

3.3. EJEMPLO DE IDENTIFICACIÓN DEL MODELO DE 4 PARÁMETROS

Considerando un caso real donde la medida de la respuesta del proceso ante un cambio brusco en la MV es la de la Figura, se va a proceder a la identificación de un modelo de 4 parámetros.



De la gráfica sacamos los siguientes datos:

$$T_{AC} = 29 \text{ mm} \rightarrow 236,7 \text{ s}$$

$$T_{AO} = 5 \text{ mm} \rightarrow 40,8 \text{ s}$$

$$M = 12,5 \text{ mm} \rightarrow 0,54 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t = 24,5 \text{ mm} \rightarrow 200 \text{ s}$$

De tal forma que los 4 parámetros del modelo quedan:

$$K = \frac{\Delta PV_f}{\Delta MV} = \frac{2,22}{-5,14} = -0,43 \text{ } ^\circ\text{C}/\% \quad \text{y} \quad a = \frac{0,54}{2,22} = 0,24$$

$$T_1 = 236,7 \frac{3 \cdot 0,24 \cdot e - 1}{1 + 0,24 \cdot e} = 137,1 \text{ s}$$

$$T_2 = 236,7 \frac{1 - 0,24 \cdot e}{1 + 0,24 \cdot e} = 49,79 \text{ s}$$

$$L = 40,8 - \frac{137,1 \cdot 49,79}{137,1 + 3 \cdot 49,79} = 16,97 \text{ s}$$

Por lo tanto el modelo de 4 parámetros es:

$$P_{T_2}(s) = \frac{-0,43}{(137,1 \cdot s + 1) \cdot (49,79 \cdot s + 1)}$$

4. INTRODUCCIÓN A LA SINTONÍA DE UN PID

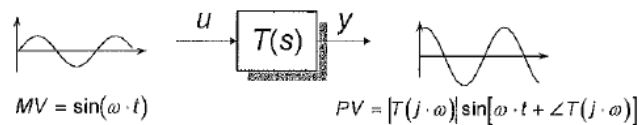
Las tres acciones básicas que proporciona un regulador PID son:

- Acción P: Retroalimentación de base.
- Acción I: Eliminación del error estático.
- Acción D: Anticipación del futuro de la PV.

En muchos casos, un PID clásico puede mejorarse con una cuarta acción, la de adelanto (Feed-forward, FF).

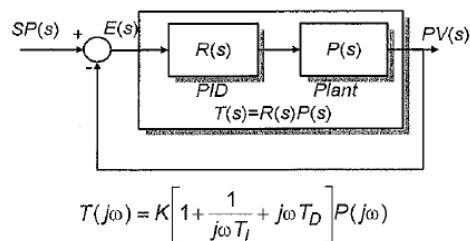
Se puede ver la estabilidad o inestabilidad de un sistema a partir de la teoría de Nyquist, que nos realiza una interpretación en el dominio de la frecuencia de la función de transferencia:

- Sea una señal sinusoidal MV aplicada a la entrada de un proceso lineal cuya función de transferencia es T(s).
- La salida del proceso será una señal, también sinusoidal, que amplifica la señal de entrada en un factor $|T(j\omega)|$ y la retrasa (desfase) un ángulo $\angle T(j\omega)$.



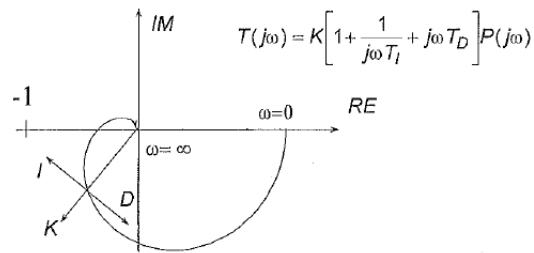
El lugar de Nyquist es la representación gráfica de $T(j\omega)$ para todos los valores positivos de ω . Sintetiza la respuesta del proceso para toda la gama de frecuencias. Si el lugar de Nyquist de la función $T(j\omega)$ corta al eje real siempre a la derecha del punto $(-1,0)$, el sistema es estable. Si por el contrario corta el eje real por la izquierda, el sistema es inestable.

El teorema de Nyquist permite analizar la estabilidad de un proceso regulado por un PID. Basta con utilizar como $T(s)$ la función de transferencia combinada del regulador y del proceso.



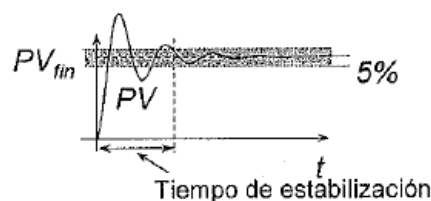
Según la teoría de Nyquist se puede decir que:

- La acción proporcional K “infla” el gráfico en todas direcciones, tomando como centro el origen. Si K aumenta en exceso, el sistema se desestabiliza.
- La acción integral gira la curva 90° en el sentido de las agujas del reloj, con una amplificación inversamente proporcional a la frecuencia. Si la acción integral es demasiado intensa (T_I demasiado pequeño), el sistema se desestabiliza.
- La acción derivativa gira el diagrama de Nyquist 90° en el sentido contrario a las agujas del reloj, con una amplificación proporcional a la frecuencia. Hasta un cierto punto, la acción D estabiliza el sistema, permitiendo un aumento de la ganancia.



Existe un método manual de sintonización mediante ensayo error, basado en aplicar los principios generales expuestos anteriormente. El método consiste en :

- En lazo cerrado, comenzamos con un regulador P, con ganancia igual a la inversa de la ganancia del proceso.
- Aumentar la ganancia hasta que la respuesta a los cambios de consigna sea rápida, pero sin oscilación.
- Si se desea acción derivativa, comenzar con un valor de TD igual a la tercera parte del retraso puro del sistema.
- Aumentar TD hasta el valor máximo para el cual la respuesta no es oscilante. Intentar aumentar la ganancia.
- Introducir el término integral (si se desea uno), comenzando por un valor de Ti igual al tiempo de estabilización.
- Disminuir Ti para aumentar la rapidez de la respuesta, siempre y cuando no aparezca oscilación.



5. SINTONIZACIÓN DE PID

En el punto anterior hemos visto como sintonizar un PID manualmente, ahora se va a sintonizar un PID de forma más académica, para ello nos basaremos en la utilización del modelo de proceso obtenido empíricamente, como hemos visto en el punto 3. También podemos sacar el modelo analítico, obteniendo balances de masa, energía, equilibrios líquido – vapor, cinemática de reacciones...

Podemos encontrarnos con muchos modelos diferentes como son:

- El método de Ziegler-Nichols y Chien-Hrones-Reswick
- El método de Haalman.
- El método de SIMC.
- El método de Kappa-Tau
- El método GPM.

A continuación se procede a explicar el cuarto de ellos, el de Kappa-Tau.

5.1. MÉTODO KAPPA-TAU.

Se basa en la aplicación a un gran número de modelos de un método de sintonización que requiere un conocimiento profundo del proceso, y la búsqueda posterior de unas reglas que aproximen los parámetros óptimos. Puede aplicarse a modelos de 2 y 3 parámetros (aunque sólo trataremos el caso de 3 parámetros).

Con este método se puede optar entre robustez y eficacia de regulación por medio del parámetro Ms.

- Ms = 1,4 → Mayor robustez.
- Ms = 2 → Mayor rapidez en la respuesta.

La estructura del PID utilizado por Aström y Hägglund es:

$$u(s) = K_c \times \left(b r(s) - y(s) + \frac{1}{T_i s} \times (r(s) - y(s)) - T_d s y(s) \right)$$

donde:

- Kc es la ganancia, Ti es el tiempo integral, TD es el tiempo derivativo.
- r(s) es el punto de consigna, y(s) la variable controlada, u(s) la salida del regulador.
- b es el peso de la consigna. Si b = 0 no hay acción proporcional en la consigna: regulador ideal tipo C del SNCC TDC-3000. Si b = 1 no se modifica la acción proporcional (regulador ideal tipo B del SNCC TDC-3000). Los valores intermedios de b no son directamente aplicables en el SNCC TDC-3000. Este parámetro es muy interesante en reguladores esclavos en una cascada.

La forma de sintonizar los parámetros del PID se obtiene a partir de una serie de tablas siguiendo los siguientes pasos:

- Se definen las variables $\alpha = K \cdot L / T$ y $\tau = L / (L + T)$, donde los valores de K, L y T se conocen del modelo de función de transferencia obtenido previamente.
- Se toman de una serie de tablas los valores $\alpha \cdot Kc$, Ti/L , TD/L y b. Estos valores vienen dados por funciones del tipo:

$$f(\tau) = a_0 \times e^{(a_1 \times \tau + a_2 \times \tau^2)}$$

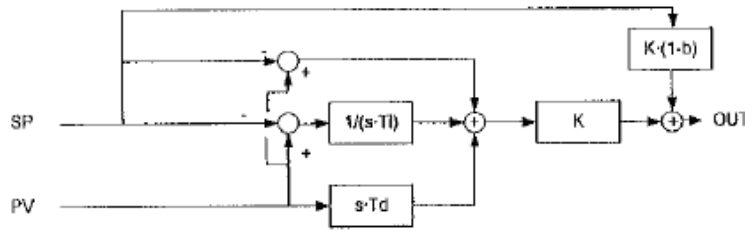
- Los coeficientes a0, a1 y a2 de la expresión anterior para un regulador PI son:

	Ms = 1,4			Ms = 2		
	a0	a1	a2	a0	a1	a2
$\alpha \cdot K_c$	0,29	-2,7	3,7	0,78	-4,1	5,7
T_i / L	8,9	-6,6	3	8,9	-6,6	3
b	0,81	0,73	1,9	0,44	0,78	-0,45

- Y para un PID:

	Ms = 1,4			Ms = 2		
	a0	a1	a2	a0	a1	a2
$\alpha \cdot K_c$	3,8	-8,4	7,3	8,4	-9,6	9,8
T_i / L	5,2	-2,5	-1,4	3,2	-1,5	-0,93
T_d / L	0,89	-0,37	-4,1	0,86	-1,9	-0,44
b	0,4	0,18	2,8	0,22	0,65	0,051

Por último, en la figura siguiente se muestra la forma de implementar una entrada feed-forward en un PID en el SNCC TDC-3000.



Como se puede comprobar, la entrada de feed-forward es el punto de consigna del mismo punto. Y la ganancia del feed-forward se define como:

- Si CTLACTN = Direct $\rightarrow -K \cdot (1-b)$
- Si CTLACTN = Reverse $\rightarrow K \cdot (1-b)$

5.2. RESUMEN DE LOS MÉTODOS INDIRECTOS DE SINTONIZACIÓN.

- Los métodos de Ziegler-Nichols y Chien Hrones-Reswick resulta a menudo en regulaciones con una acción de control demasiado agresiva. Sólo son aplicables a modelos de 2 parámetros.
- El método SIMC permite especificar la velocidad de la respuesta en lazo cerrado.
- Puede aplicarse a varios tipos de modelos.
- El método Kappa-Tau permite diferenciar entre la respuesta a una perturbación y el seguimiento de consigna.
- El método GPM permite optar entre robustez y eficacia de control.
- Podemos ver la siguiente tabla resumen:

	Tipo de modelo	Regulador	Parámetros de usuario	Peso en SP
SIMC	2 o 3 parámetros	PI	Tiempo de Respuesta	No
Kappa-Tau	3 parámetros	PI o PID	Ms	Si
GPM	3 parámetros	PI o PID	GM y PM	No

5.3. EJEMPLO DE SINTONIZACIÓN DE UN PID

Sintonizamos el modelo matemático que hemos calculado anteriormente en el apartado 2.3. Los valores que tenemos son:

$$K = -0,41993 \quad T = 118,1876 \text{ s} \quad L = 54,4331 \text{ s}$$

Resolvemos este modelo con el método Kappa-Tau, quiero tener un sistema controlado por un PI y que tenga una robustez $M_s = 1,4$.

$$\alpha = K \cdot L / T = 0,41993 \cdot 54,31 / 118,1876 = 0,193$$

$$\tau = L / (L + T) = 54,31 / (54,31 + 118,1876) = 0,315$$

De la tabla de valores para un PI y con robustez $M_s = 1,4$.

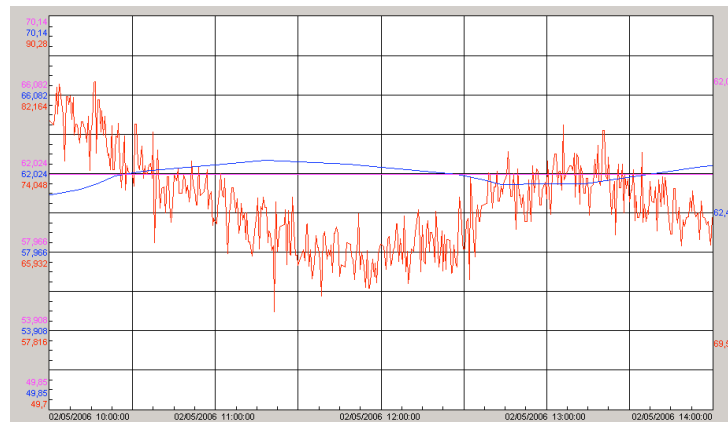
Para αK_C :

$$f(\tau) = 0,29 \cdot e^{(-2,7 \cdot 0,315 + 3,7 \cdot 0,315^2)} = 0,179 = \alpha K_C \rightarrow K_C = 0,927$$

Para T_i/L :

$$f(\tau) = 8,9 \cdot e^{(-6,6 \cdot 0,315 + 3 \cdot 0,315^2)} = 1,499 = T_i / L \rightarrow T_i = 81,595s$$

La gráfica con la respuesta del proceso con este controlador es la que se representa a continuación:



donde SP (color magenta), OP (rojo) y PV (azul).

6. CONCLUSIONES

Podemos comprobar que aplicando los métodos teóricos que se estudian durante la carrera, podemos obtener buenísimos resultados de control de procesos industriales mediante controladores PI y PID.

Pero nunca nos podemos conformar con los resultados de una regulación, ya que siempre se puede ajustar y sintonizar mucho mejor. Para realizar esas mejoras, nos apoyamos en la tecnología y avances electrónicos, como son los autómatas industriales.

Tenemos que tener en cuenta que todo proceso industrial tiene vida propia, y que dos procesos iguales evolucionan de distintas formas.

7. BIBLIOGRAFÍA

- “PID Controllers: Theory, Design and Tuning” (K.J. Aström and T. Hägglund, 1995)
- “Tuning of PID controllers based on gain phase margin specifications” (Ho, Hang y Cao, Automática Vol. 31 N° 3 1995)
- “Teoría y métodos de sintonización” (Pedro Fraile, ingeniero “Process Control” Solvay Torrelavega)
- “Manual y hoja de especificaciones” (SNCC TDC-3000 de Honeywell)