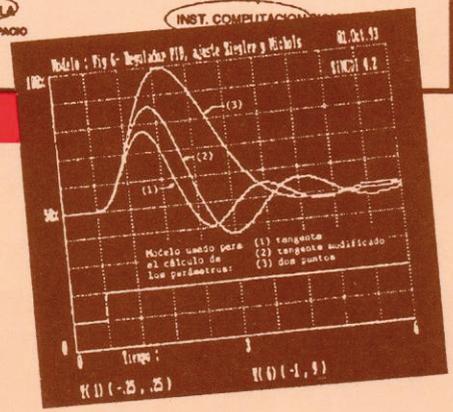
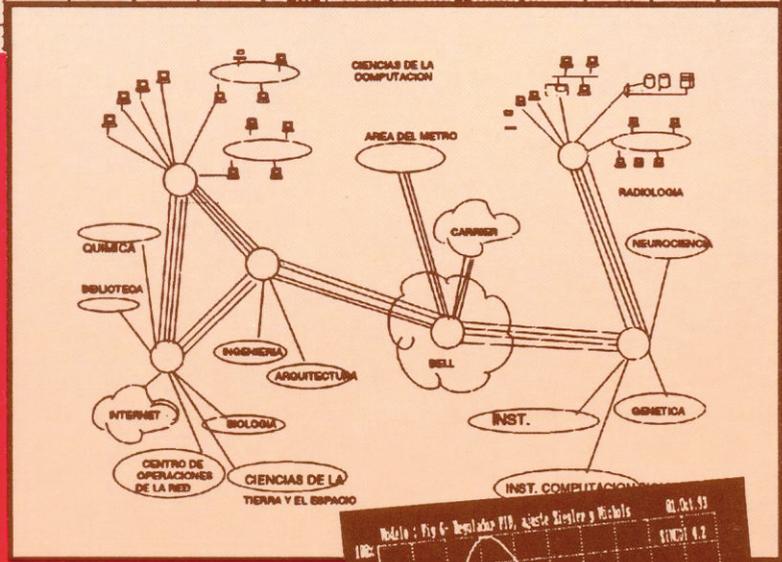
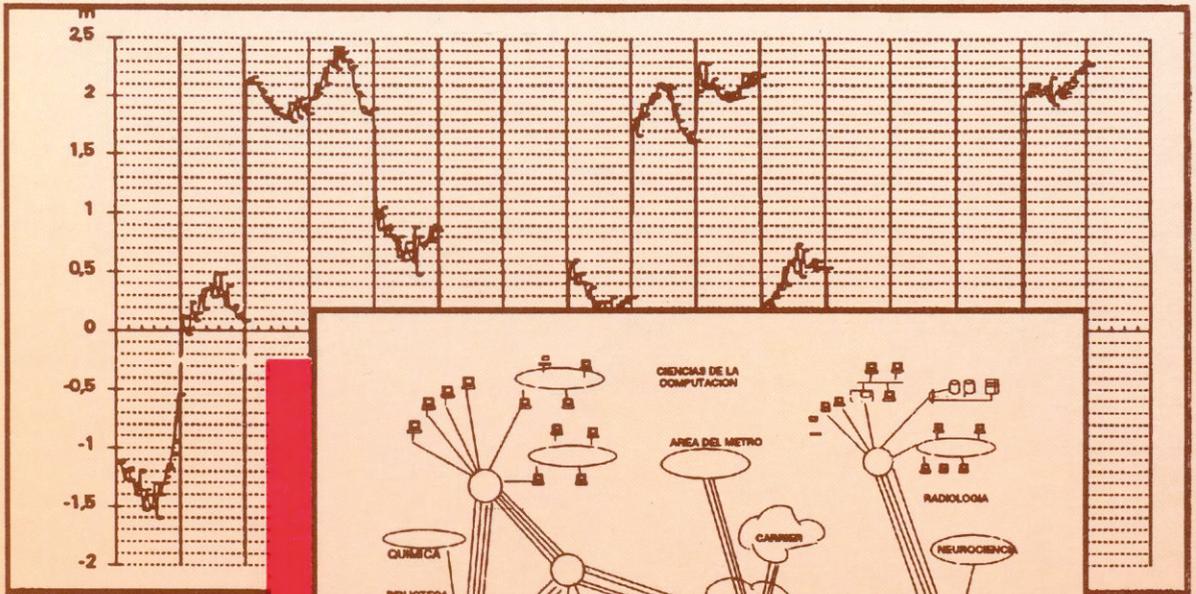


Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
ENERO/JUNIO 1994 VOLUMEN 4 N° 1



ASPECTOS QUE DEBEN SER TOMADOS EN CONSIDERACION AL UTILIZAR UN METODO DE AJUSTE DE CONTROLADORES

*Victor M. Alfaro **

RESUMEN

Se hace notar el efecto que sobre el comportamiento dinámico de un lazo de control, tienen el procedimiento de identificación del proceso, el tipo de controlador utilizado y su funcionamiento (servomecanismo o regulador), supuestos por los autores de los métodos de ajuste de controladores.

SUMMARY

The effect that the process identification method, the controller type and the loop behavior (regulator or servomechanism), supposed by the authors of the controller tuning methods, have over the control loop dynamic performance is noted.

INTRODUCCION.

Normalmente el paso final en el proceso de diseño y puesta en servicio de un lazo de control retroalimentado, consiste en la selección de los parámetros del controlador, los cuales determinan, junto con el proceso, el comportamiento dinámico del sistema de control.

Desde que John G. Ziegler y Nataniel B. Nichols¹⁴ presentaron en 1942 su método para el cálculo de los parámetros de los controladores industriales, han sido desarrollados gran número de otros métodos con este fin. La selección para determinar cuál de estos utilizar, se hace normalmente considerando solamente el criterio de desempeño del lazo de control especificado por su o sus autores. Por ejemplo Ziegler y Nichols seleccionaron el decaimiento de 1/4 en la respuesta temporal a un cambio escalón en la entrada, lo mismo que Cohen y Coon⁴; Smith y Murrill^{9,13} al decaimiento de 1/4 adicionaron una o dos condiciones para garantizar la unicidad de la solución para controladores de dos y tres modos; por su parte López⁶, considerando cambios escalón en la perturbación y Rovira¹⁰, cambios en el valor deseado, minimizaron integrales de alguna función del error (IAE, ISE, ITAE) al igual que Kaya y Scheib⁵;

Martin⁷ empleó la cancelación de los polos del proceso con los de los modos integral y derivativo y ajustó la velocidad de respuesta mediante la ganancia proporcional.

Sin embargo, en adición al desempeño deseado para el lazo, es importante tomar en cuenta otros aspectos considerados por sus autores en el desarrollo del método de ajuste que se va a utilizar.

La mayoría de los métodos disponibles son del tipo llamado de lazo abierto, o sea que utilizan un modelo del proceso para el cálculo de los parámetros requeridos del controlador, normalmente de primer orden con tiempo muerto, por lo que la forma en la cual se supone obtenido este modelo es de importancia. Además, mientras unos métodos han sido desarrollados bajo el supuesto de que el lazo de control funciona como un regulador, otros lo han sido suponiendo que lo hace como un servomecanismo. Por último y no menos importante; cuando se considera el ajuste de un controlador PID, es necesario el conocimiento de la forma en que el fabricante del controlador por ajustar ha realizado su algoritmo de control.

(*) Profesor Asociado, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica.

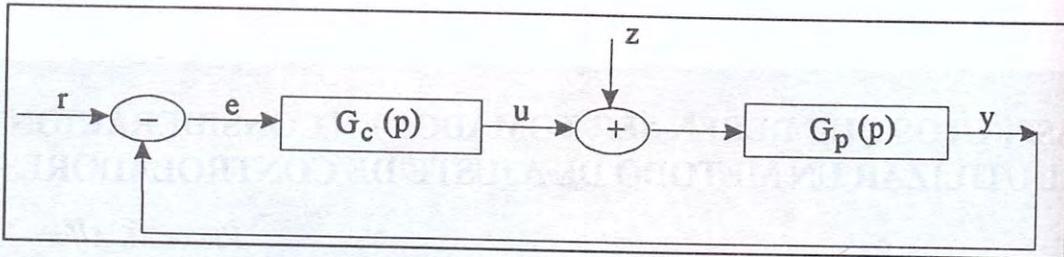


Fig. 1 Lazo de control retroalimentado

SERVOMECANISMOS Y REGULADORES.

El diagrama de bloques de la fig. 1 muestra un lazo de control retroalimentado, en el cual G_c representa el controlador. Las ecuaciones que relacionan las variables en el lazo son

$$y(t) = G_p(p) [u(t) + z(t)] \quad (1) **$$

$$u(t) = G_c(p) e(t) \quad (2)$$

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (3)$$

El lazo de control está expuesto a dos entradas distintas, el valor deseado y las perturbaciones. Se puede encontrar que la variable controlada en función de estas entradas está dada por

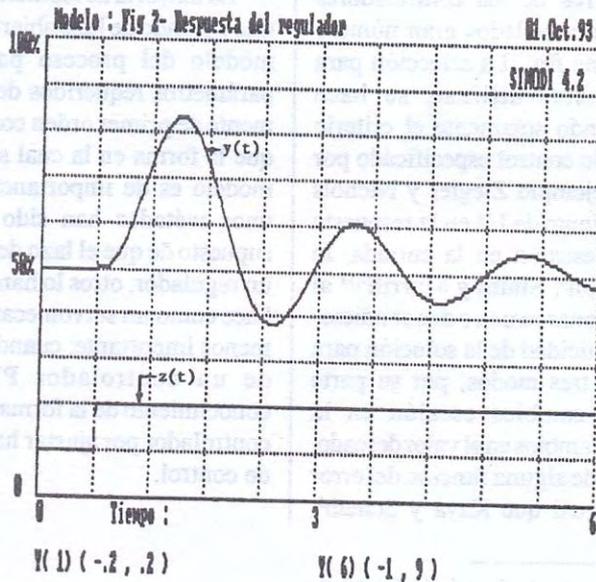
$$y(t) = \frac{G_c(p) G_p(p)}{1 + G_c(p) G_p(p)} r(t) + \frac{G_p(p)}{1 + G_c(p) G_p(p)} z(t) \quad (4)$$

Cuando se desea que la variable del proceso $y(t)$ "siga" los cambios del valor deseado, el lazo de control debe funcionar como un *servomecanismo*, cuya función de transferencia de lazo cerrado con $z = 0$ es

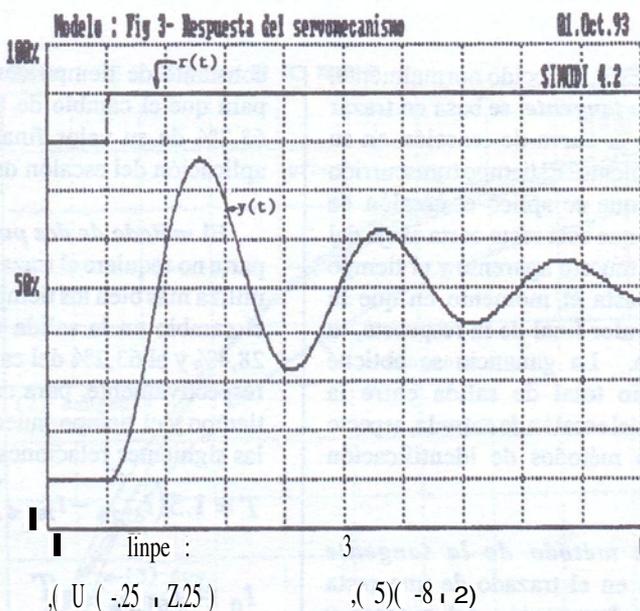
$$\frac{y(s)}{r(s)} \equiv M_r(s) = \frac{G_c(s) G_p(s)}{1 + G_c(s) G_p(s)} \quad (5)$$

Si por el contrario lo importante es la insensibilidad del lazo a las perturbaciones, este debe funcionar entonces como un *regulador*, cuya función de transferencia de lazo cerrado con $r = 0$ es

$$\frac{y(s)}{z(s)} \equiv M_r(s) = \frac{G_p(s)}{1 + G_c(s) G_p(s)} \quad (6)$$



(**) ver la Nomenclatura



Aunque $M(s)$ y $M_r(s)$ tienen el mismo denominador, dado que sus numeradores son diferentes, la respuesta de un servomecanismo y la de un regulador a un cambio escalón por ejemplo, en el valor deseado y en la perturbación respectivamente, pueden tener un comportamiento dinámico diferente, con distinta sobreelongación, período de oscilación o razón de decaimiento.

La respuesta de un lazo de control a una perturbación (regulador), con un controlador PID en el cual se utilice el criterio de Cohen y Coon y la respuesta de este mismo lazo a un cambio en el valor deseado (servomecanismo) muestran una clara diferencia en la razón de decaimiento (fig. 2 y 3). Cuánto y en qué características pueden diferir estas respuestas depende de las funciones de transferencia del proceso.

En la industria es normalmente más frecuente la necesidad de mantener la variable controlada del proceso en su valor deseado, ante la presencia de perturbaciones, que los cambios en el valor deseado, por lo que la mayoría de estos lazos de control funcionan como reguladores.

PROCESO.

La curva de reacción del proceso dada por la respuesta temporal de este a un cambio escalón en su

entrada, la cual presenta normalmente un comportamiento sobreamortiguado, permite aproximarlo por alguno de los siguientes modelos simples:

- primer orden con tiempo muerto

$$G_{p1}(s) = \frac{k e^{-sT}}{s+1} \quad (7)$$

- segundo orden con tiempo muerto

$$G_{p2}(s) = \frac{k e^{-sT}}{(s+1)(7s+1)} \quad (8)$$

Los métodos de cálculo de los parámetros de los controladores utilizan normalmente el modelo de primer orden con tiempo muerto como el dado por (7), sin embargo, la forma en que los autores lo identifican, o sea, la forma en que obtienen su ganancia k_p , constante de tiempo T y tiempo muerto aparente t_0 difiere en forma tal que incide normalmente sobre los valores obtenidos de sus parámetros.

Aunque Ziegler y Nichols consideraron en el desarrollo de su método que el proceso no era autorregulado, su procedimiento de identificación del proceso se puede asimilar al de la obtención de un modelo de primer orden

más tiempo muerto. Este, conocido normalmente, como el *método de la tangente*, se basa en trazar una recta tangente a la curva de reacción en su punto de máxima pendiente. El tiempo transcurrido entre el instante en que se aplicó el escalón de entrada y el punto en que esta recta corta el eje del tiempo, es el tiempo muerto aparente y el tiempo desde ese instante hasta el momento en que la tangente alcanza el valor final de la respuesta, la constante de tiempo. La ganancia se obtiene dividiendo el cambio total de salida entre la magnitud del cambio del escalón de entrada, aspecto en el que todos los métodos de identificación coinciden.

Miller⁸ basa su *método de la tangente modificado* también en el trazado de una recta tangente a la curva de reacción del proceso y calcula el tiempo muerto aparente y la ganancia del modelo en la misma forma que Ziegler y Nichols; propone sin embargo, que hay que calcular la

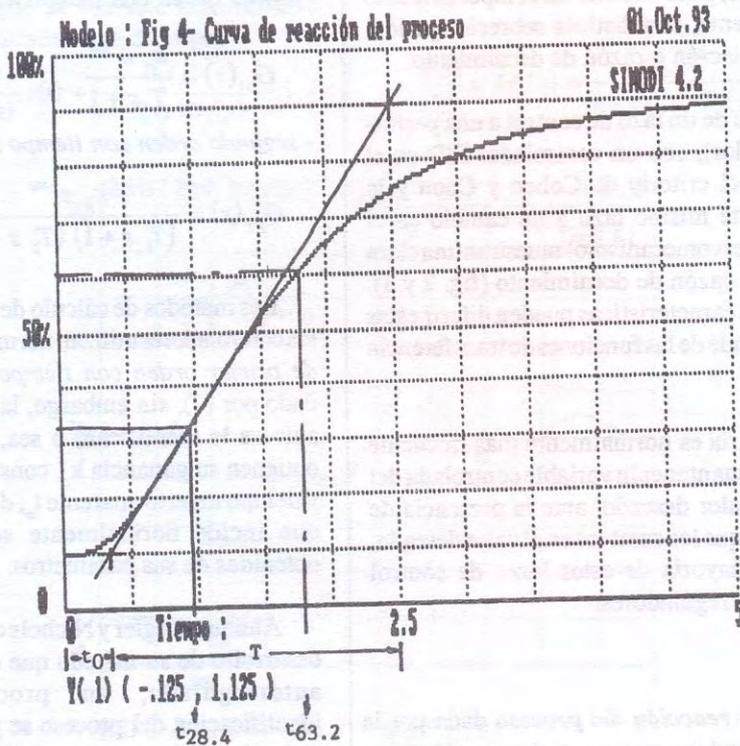
constante de tiempo como el lapso requerido para que el cambio de la respuesta alcance el 63,2% de su valor final, $t_{63,2\%}$, a partir de la aplicación del escalón de entrada.

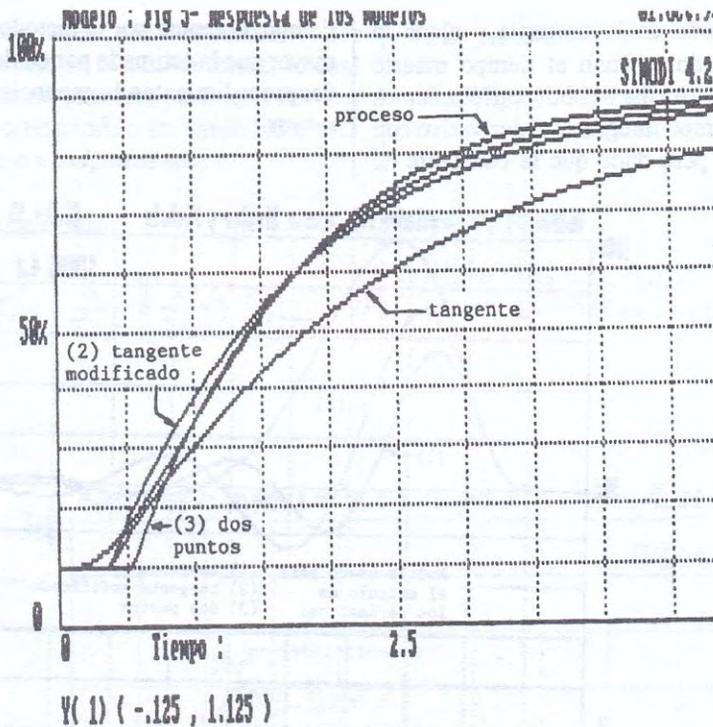
El *método de dos puntos* de Smith¹² por su parte no requiere el trazado de la recta tangente, utiliza más bien los tiempos requeridos para que el cambio en la salida del proceso alcance el 28,4% y el 63,2% del cambio total, $t_{28,4\%}$ y $t_{63,2\%}$ respectivamente, para calcular la constante de tiempo y el tiempo muerto aparente a partir de las siguientes relaciones:

$$T = 1.5(t_{63,2\%} - t_{28,4\%}) \tag{9}$$

$$t_0 = t_{63,2\%} - T \tag{10}$$

con lo que se garantiza que las respuestas del modelo y la del proceso coincidan en por lo menos estos dos instantes.





Las fig. 4 y 5 muestran respectivamente la curva de reacción de un proceso arbitrario y las respuestas obtenidas con un modelo de primer orden más tiempo muerto, identificado por medio de cada uno de los tres métodos anteriores, cuyos parámetros se muestran en la tabla 1. Como puede apreciarse, el método de la tangente produce un modelo más lento que el proceso, ya que su constante de tiempo es mayor que la requerida.

Por medio del método de dos puntos de Smith se obtiene un modelo, cuyo comportamiento dinámico, excepto durante los instantes iniciales, es una muy buena aproximación al del proceso.

Si se utilizan los modelos anteriores y el método de Ziegler y Nichols para calcular los parámetros de un controlador PID, se obtienen los valores mostrados en la tabla 2.

Método de identificación	k_p	T	t_o
tangente	1,0	2,16	0,36
tangente modificado	1,0	1,45	0,36
dos puntos	1,0	1,26	0,54

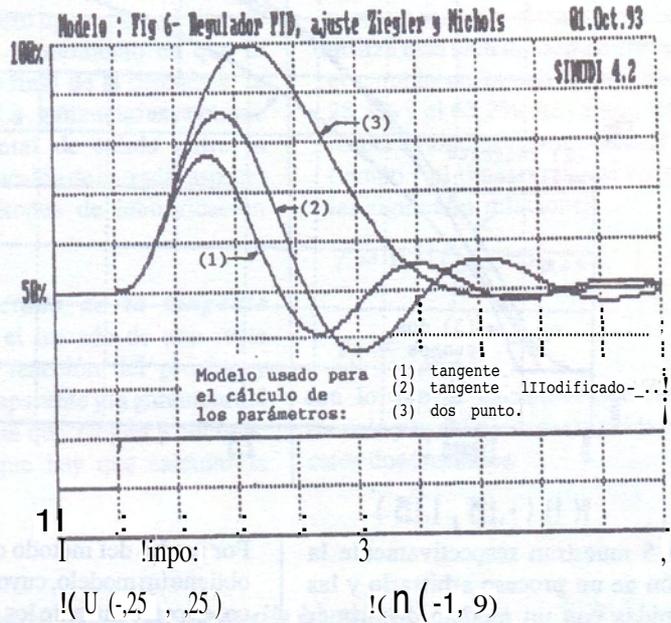
Tabla 1. - Parámetros del modelo G_{p1}

Método de identificación	K_c	T_i	T_d
tangente	7,19	0,72	0,18
tangente modificado	4,83	0,72	0,18
dos puntos	2,80	1,08	0,27

Tabla 2. - Parámetros según Z-N para un controlador PID

Corno el método de la tangente y el de la tangente modificado estiman el tiempo muerto aparente en idéntica forma, se obtienen los mismos valores para el tiempo integral y el derivativo con los dos modelos, pero dado que la constante de

tiempo, obtenida por el método de la tangente es mayor que la estimada por cualquiera de los otros dos procedimientos, la ganancia del controlador es mayor.



La fig. 6 muestra las respuestas de un lazo de control, obtenidas con estos conjuntos de parámetros y como se puede apreciar, estas son muy diferentes en cuanto al error máximo, periodo de oscilación y razón de decaimiento. La curva de respuesta con los parámetros del controlador, calculados con el modelo identificado, utilizando el método de la tangente, es la que más se aproxima al decaimiento de 1/4 especificado por Ziegler y Nichols.

Aunque el método de la tangente, modificado por Miller o el de dos puntos de Smith, permiten obtener un modelo que aproxime mejor al proceso real, estos no deben utilizarse para la identificación, si el autor del método de ajuste se basó en los parámetros de un modelo obtenido por el de la tangerite.

CONTROLADORES.

Los controladores de lazo utilizados, industrialmente, combinan los modos de control

proporcional (P), integral (I) y derivativo (O) para formar controladores cuyas funciones de tranferencia son:

-proporcional (P)

$$G_{cp}(p) = \frac{100}{p} = K_i; \tag{11}$$

-proporcional-integral (PI)

$$G_{qji}(p) = \frac{100}{B_i} \left[1 + \frac{1}{T_i P} \right] = K_i; \left[1 + \frac{1}{T_i P} \right] \tag{12}$$

-proporcional-derivativo (PD)

$$G_{cpt}(p) = \frac{100}{B_i} \left[\frac{1+T_d P}{1+a T_d P} \right] = K \left[\frac{1+T_d P}{1+a T_d P} \right] \tag{13}$$

-proporcional-integral-derivativo (PID)

$$G_{cpid}(p) = K_i \left[\frac{1+T_d P}{1+a T_d P} \right] \tag{14}$$

Los controladores P, PI y PD son realizados por todos los fabricantes en la misma forma, lo cual lamentablemente no es cierto para los PID. La ecuación (14) corresponde a un controlador PID no interactuante o *ideal*, otros son:

- PID *paralelo*

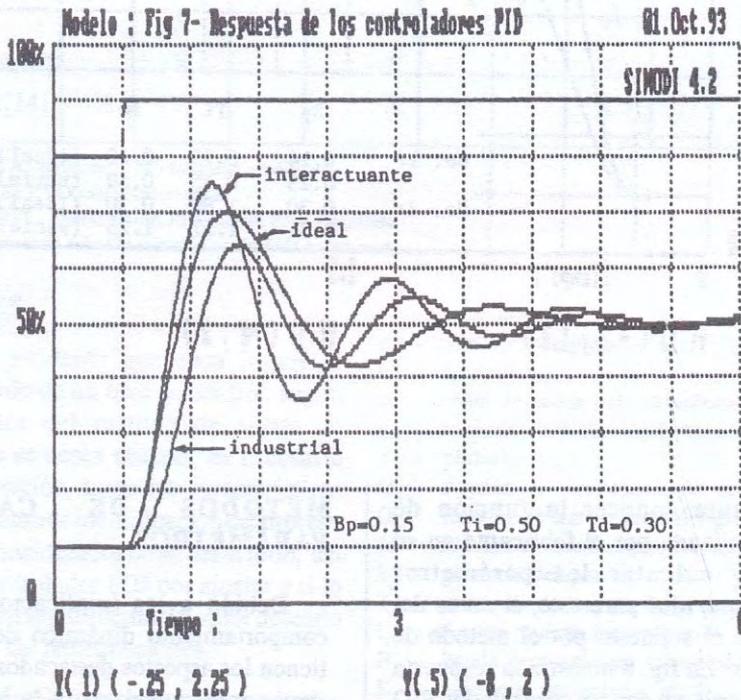
$$G_{pid}''(p) = K_p + \frac{K_i}{p} + \frac{K_d p}{1 + \alpha K_d p} \quad (16)$$

- PID interactuante o *serie*

$$G_{pid}'(p) = K_c \left[1 + \frac{1}{T_i' p} \right] \left[\frac{1 + T_d' p}{1 + \alpha T_d' p} \right] \quad (15)$$

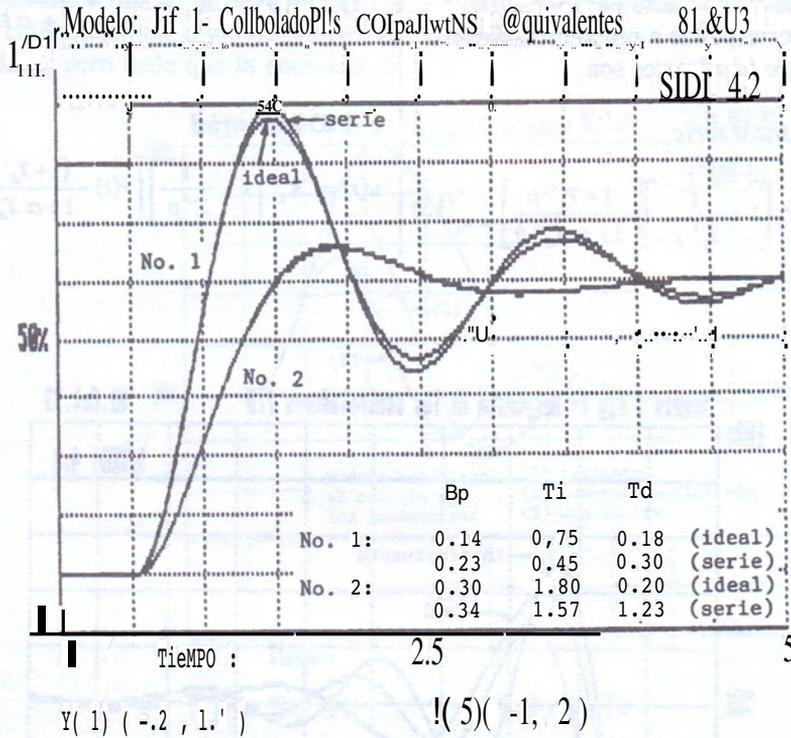
- PID *industrial*

$$u(t) = K_c' \left[1 + \frac{1}{T_i' p} \right] \left[r(t) - \frac{(1 + T_d' p)}{1 + \alpha T_d' p} y(t) \right] \quad (17)$$



Al sustituir un controlador PID por otro, se puede encontrar que la respuesta que se obtiene difiere de la que se tenía originalmente, aunque los controladores estén ajustados con el mismo conjunto de parámetros, cosa que se puede apreciar en la fig. 7. En este caso las tres respuestas

difieren en la sobreelongación máxima, el período de oscilación y la razón de decaimiento. Las diferencias en estas respuestas provienen de que los controladores son: uno ideal, uno serie y otro del tipo industrial.



Es importante conocer la función de transferencia utilizada por el fabricante en su controlador y calcular los parámetros equivalentes requeridos para este, si no es del mismo tipo que el supuesto por el método de ajuste empleado. La fig. 8 muestra la respuesta de un servomecanismo con un controlador PID ideal ajustado con dos conjuntos diferentes de parámetros, así como su respuesta con un controlador interactuante ajustado con los parámetros equivalentes a ambos conjuntos. Como se aprecia, la diferencia entre las respuestas pueden ser mínimas o despreciables. Alfaro¹ detalla las ecuaciones de conversión necesarias.

METODOS DE CALCULO DE PARAMETROS.

Debido a las implicaciones que sobre el comportamiento dinámico del lazo de control tienen los aspectos destacados anteriormente, es importante considerar, a la hora de utilizar un método para el cálculo de los parámetros de un controlador, la forma de identificación del modelo del proceso utilizado por su autor, el tipo de controlador supuesto por este, cuando se deba ajustar un PID, y si se consideró que el lazo funcionaría como un regulador o como un servomecanismo.

La tabla 3. resume las características consideradas por los autores de algunos de los métodos más utilizados.

Método de ajuste de controladores	Modelo fl			Lazo control f2l		Controlador {3}			
	TA	1M	DP	REG	SERVO	ISA	PAR	INT	IND
Brambilla y otros[2]		X			X	X			
Chien y otros[3]	X			X	X	X			
Cohen y Coon[4]	X			X		X			
Kaya y Scheib[5]		X		X	X	X		X	X
Lopez y otros[6]		X		X		X			
Martin y otros[7]			X		X			X	
Rovira y otros[10]		X			X	X			
Shinsky[11]		X		X	X	X			X
Smith, Murrill[9,13]		X		X		X			
Ziegler, Nichols[14]	X			X		X			

{1} DP - dos puntos, TA - tangente, TM - tangente modificado

{2}REG - regulador, SERVO - servomecanismo

{3}!ND - industrial, INT - interactuante, ISA - ideal, PAR - paralelo

• Modo derivativo, actuando sobre la variable controlada solamente.

CONCLUSIONES.

Se ha hecho evidente que para lograr el desempeño esperado de un lazo de control, según lo indica el autor del método de ajuste de controladores que se desea utilizar, es necesario tomar en consideración, tanto las características como el procedimiento de identificación del proceso y el controlador, considerados en su desarrollo, así como el tipo de controlador PID por ajustar y si lo requerido es un buen seguimiento del valor deseado o insensibilidad a las perturbaciones.

Es importante también recordar que los métodos de ajuste empíricos proporcionan solamente una primera aproximación de los parámetros requeridos para el controlador, los cuales normalmente necesitan de un afinamiento posterior para lograr el desempeño deseado y que la mayoría de estos son aplicables solamente a procesos dominados por la constante de tiempo $\sqrt{T_r} < 1$.

NOMENCLATURA.

e - error

p - operador derivada, d/dt

r - valor deseado

s - variable compleja

t - tiempo

u - señal de salida del controlador

y - variable controlada del proceso

z - perturbación

G_c - función de transferencia del controlador

G - función de transferencia del proceso

M - función de transferencia de lazo cerrado

k - ganancia del proceso

t - constante de tiempo del proceso (T_r , T_d)

t. - tiempo muerto aparente

B - banda proporcional, controlador ideal

~ - ganancia, controlador ideal

T_i - tiempo integral, controlador ideal

T_d - tiempo derivativo, controlador ideal

K - ganancia proporcional, controlador paralelo

.. - ganancia integral, controlador paralelo

K_d - ganancia derivativa, controlador paralelo

K; - ajuste del modo proporcional, controlador interactuante

T_i' - ajuste del modo integral, controlador interactuante

T_d - ajuste del modo derivativo, controlador interactuante

a - ganancia del filtro o retardo del derivador
(a = 0.1, valor típico)

Bibliografía.

- [1] Alfaro, V.M. - "¿Son todos los controladores PID iguales?", Ingeniería (Costa Rica), Vol 3 #1, enero/junio 1993
- [2] Brambilla, A, S. Cheny C. Scali - "Robust tuning of conventional controllers", Hydrocarbon Processing (E.U.A), Vol 69 #11, noviembre 1990, pago 52-58
- [3] Chien, K.L., IA Irones y IB. Reswick - "On the Automatic Control of Generalized Passive Systems", ASME Transactions (E.U.A), Vol 74 #2, febrero 1952, pago 175-185
- [4] Cohen, G.H. y G.A Coon - "Theoretical Considerations of Retarded Control", ASME Transactions (E.U.A.), Vol 75, julio 1953, pag. 827-834
- [5] Kaya, A Y T.I Scheib - "Tuning of PID Controls of Different Structures", Control Engineering (E.U.A), Vol 35 #7, julio 1988
- [6] López, AM. Y otros - "Tuning Controllers With Error-Integral Criteria", Instrumentation Technology (E.U.A), Vol 14 #11, noviembre 1967
- [7] Martin J., C.L. Smith y AB. Corripio - "Controller Tuning from Simple Process Models", Instrumentation Technology (E.U.A), Vol 22 #12, diciembre 1975
- [8] Miller, IA Y otros - "A Comparison of Controller Tuning Techniques", Control Engineering (E.U.A.), Vol 16 #12, diciembre 1967
- [9] Murril, P.W. y C.L. Smith - "Controllers Set them Right", Hydrocarbon Processing (E.U.A), Vol 45 #2, febrero 1966
- [10] Rovira, AA, P.W. Murrill y C.L. Smith - "Tuning Controllers for Setpoint Changes", Instruments & Control Systems (E.U.A), Vol 42 #12, diciembre 1969
- [11] Shinskey, F.G. - Process Control Systems. Nueva York, N.Y., E.U.A.: McGraw-Hill Co., 1979
- [12] Smith, C.L. - Digital Computer Process Control, Scranton, Pennsylvania, E.U.A.: International Textbook CO., 1972
- [13] Smith, C.L. y P.W. Murrill - "A More Precise Method for Tuning Controllers", ISA Journal (E.U.A), Vol 13 #5, mayo 1966
- [14] Ziegler, J.G y N.B. Nichols - "Optimum Settings for Automatic Controllers", ASME Transactions (E.U.A), Vol. 64, 1942, pag. 759-768