

AJUSTE ÓPTIMO DE CONTROLADORES PARA PROCESOS INTEGRADORES CON TIEMPO MUERTO.

I.Q. Fabio Castrillón Hernández Esp. Msc y Santiago Pajón Julio.

fabio.castrillon@upb.edu.co¹, santiago.pajon@alfa.upb.edu.co.

Facultad de Ingeniería Química. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín. Colombia.

1. Introducción

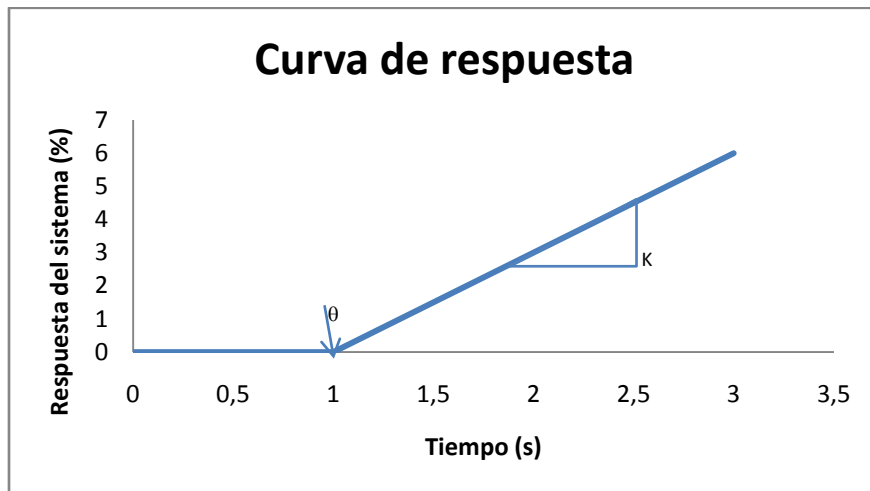
En la industria química es común encontrar procesos con alta capacitancia y poco retardo, adicionalmente existen algunos sistemas inestables que se modelan mejor como integradores con tiempo muerto. Algunos de los más comunes son las torres de destilación en el subsistema de nivel de colas, los reactores por lotes, los tanques de almacenamiento entre otros. Ya sea por motivos económicos, seguridad o la complejidad presente en este tipo de procesos, es obligatorio el uso de controladores automáticos, si se desea tener un funcionamiento óptimo en planta.

En general los procesos que muestran graficas de respuesta con pendientes iniciales pronunciadas, similares a las de integradores, ya sea puros o con tiempo muerto; es recomendable simularlos con esta ultima estructura (ecuacion1). Hacer esto mejora la respuesta del sistema y evita arrastrar las características, como las constantes del tiempo y el tiempo muerto, al controlador. (Chien y Fruehauf 1990, Tyreus y Luyben 1992)

$$Gp = \frac{K}{s} e^{-\theta s} \quad (1)$$

Donde K es la pendiente de la rampa de la respuesta de la variable controlada frente a un escalón unitario; y θ el tiempo muerto del proceso (Grafica 1). Ambos parámetros es posible obtenerlos a partir de una serie de pruebas en planta, así también como por métodos analíticos. (Tyreus y Luyben 1992, Ziegler y Nichols 1942).

¹ Autor correspondiente.



Grafica 1. Respuesta típica de un sistema integrador con tiempo muerto

Estos sistemas han sido abordados por varios autores desde distintos puntos de vista. Ziegler y Nichols en 1942 trabajaron en un método empírico basado en pruebas en planta, del análisis experimental consiguieron desarrollar métodos para la sintonía de controladores P, PI y PID. (Ziegler y Nichols 1942)

Chien y Fruehauf en 1990 desarrollaron varias ecuaciones basados en control con modelo interno (IMC de inglés Internal model control), para la sintonización de controladores para varios tipos sistemas. (Chien y Fruehauf 1990)

Posteriormente Chen y Seborg en 2002 se basaron en la síntesis directa para la atenuación de perturbaciones, presentando una serie de métodos para la sintonización de controladores PI y PID para diversos procesos. Este método presenta una forma homologa al presentado por Chien y Fruehauf para sistemas integradores con tiempo muerto, ecuaciones 2 y 3. (Chen y Seborg 2002)

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{2t_c + \theta}{(t_c + \theta)^2} \quad (2)$$

$$t_i = 2t_c + \theta \quad (3)$$

Donde K_c es la ganancia del controlador y t_i es el tiempo integral. t_c es un parámetro de sintonía, correspondiente a la constante del tiempo de la respuesta deseada del proceso (Chen y Seborg 2002)

En el trabajo publicado inicialmente, Chen y Seborg no presentan reglas o algún tipo de guía para la selección del parámetro, lo referente a procesos integradores con tiempo muerto. Sin embargo en el 2003 Seborg publicó, en conjunto con otros autores, un grupo de recomendaciones empíricas para la selección del valor de t_c . Estas recomendaciones son vagas y en general son inecuaciones que dan rangos del valor aplicable. Agregado a esto, son recomendaciones generales y no

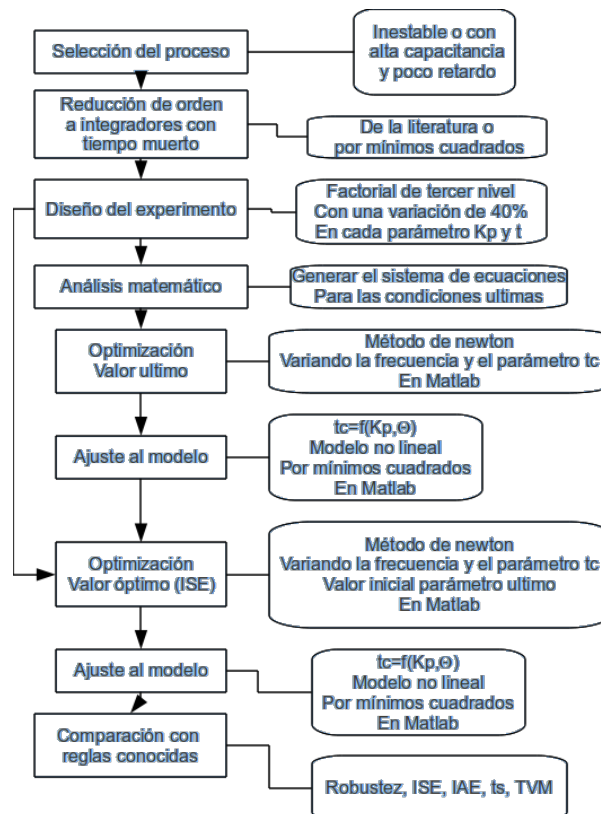
específicas para una estructura o proceso (Chen y Seborg 2002, Seborg, Edgar y Mellichamp 2003).

En el presente trabajo se desarrollaron correlaciones para determinar el valor mínimo o crítico de t_c , y el valor que minimiza la magnitud del indicador de desempeño integral del cuadrado del error (ICE). De estas expresiones, se generó una nueva regla de sintonía, la cual se comparó con algunas de las encontradas en la literatura.

2. Materiales y Métodos.

El valor óptimo de t_c depende en gran medida de la función de transferencia y los parámetros propios del proceso. Con esto en mente se decidió utilizar el software Matlab y su complemento Simulink para la simulación. Se aplicó un diseño de experimentos tipo factorial para la orientación de los parámetros del proceso. Adicionalmente se utilizó el método de Newton para las optimizaciones realizadas.

El procedimiento seguido para el desarrollo, se explica de manera simplificada en el siguiente diagrama de flujo:



Grafica 2. Diagrama de flujo del proceso experimental

2.1. Valores Críticos

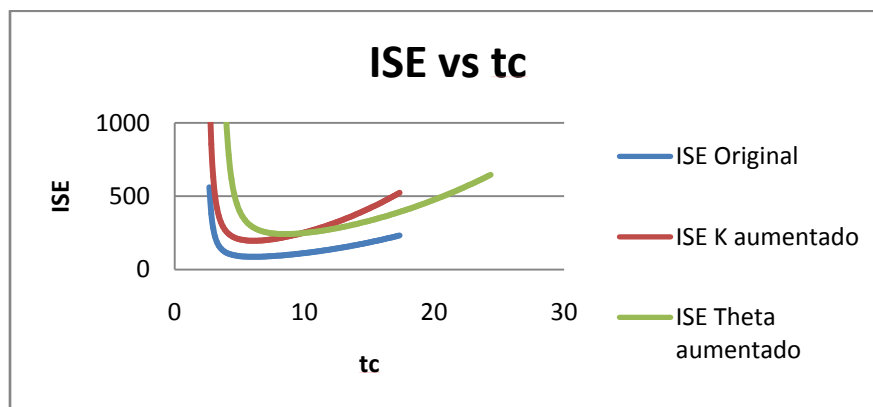
La aplicación de las herramientas disponibles permitió el cálculo de los valores críticos o últimos por el método de Newton. El procedimiento se realizó por el criterio de estabilidad de Bode para sistemas lineales e invariantes en el tiempo, generando un sistema de ecuaciones no lineal. Y el método Newton para la resolución de las mismas. Los valores obtenidos se ajustaron a un modelo lineal mostrado en la ecuación 4, con un coeficiente de determinación (r^2) igual a 1. Esta correlación muestra la dependencia de los valores críticos del parámetro de sintonía con el tiempo muerto del sistema. Adicionalmente representan el límite inferior que garantiza estabilidad BIBO (Del inglés entrada limitada salida limitada).

$$\tau_{c|u} = 0.3489\theta \quad (4)$$

Esta expresión se calculo para un rango [4,10] de θ , sin embargo simulaciones realizadas muestran su aplicabilidad para valores diferentes.

2.2. Desarrollo del modelo

Teniendo en cuenta la limitación inferior del valor critico de t_c , se realizo un estudio del comportamiento del indicador ICE, variando los parámetros del proceso, K y tiempo muerto. Para esto es evaluó el ICE en un amplio rango de valores de t_c , Grafica 3.



Grafica 3. Comportamiento del indicador ISE con respecto al parámetro de sintonía.

Con esta información se estimo que el valor óptimo se encontraba cercano del doble del valor crítico, y se utilizó esta estimación como valor inicial del método numérico para la minimización.

Los valores encontrados se ajustaron a una ecuación lineal y un coeficiente de determinación r^2 igual a 1. (Ecuación 5). La expresión es válida para rangos de [0.1, 0.3] de K y [4, 10] de θ , sin embargo pruebas fuera del rango entregaron

aplicabilidad en valores superiores, hasta por mil unidades, para ambos parámetros.

$$\tau_c = 0.82\theta \quad (5)$$

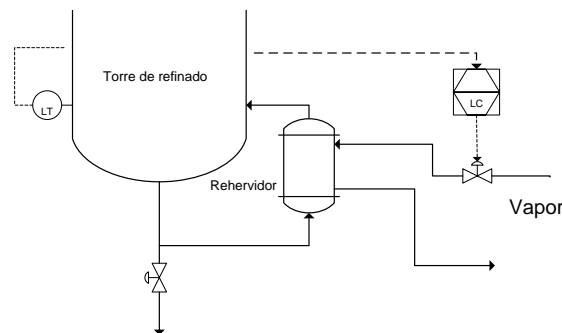
Al sustituir en las formulas propuestas por Chen y Seborg.

$$K_c = \frac{0,8}{K\theta} \quad (6)$$

$$t_i = 2,64\theta \quad (7)$$

3. Comparación

Para realizar una comparación del modelo con algunos de los encontrados en la literatura, se tomo como base el proceso propuesto por Chien y Fruehauf. El cual consiste en el control del nivel de colas de una torre de destilación al manipular la corriente de vapor entrante al rehervidor (Grafica 4). Y presenta una K de 0,2 y un tiempo muerto de 7,4. (Chien y Fruehauf 1990)



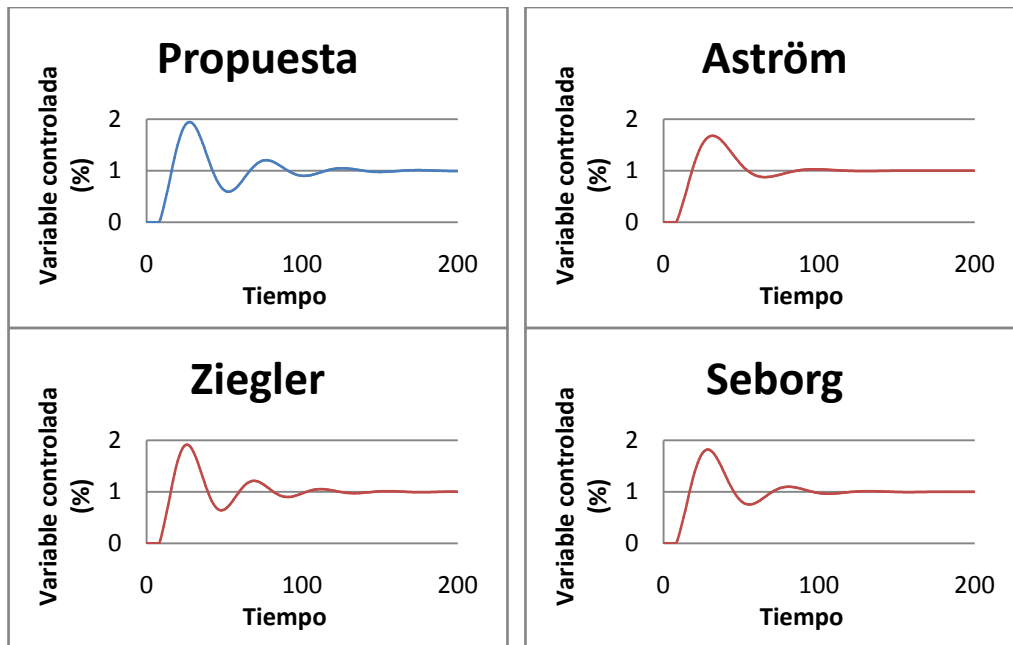
Grafica 4. Esquema para el control del nivel inferior de una torre de destilación manipulando la entrada vapor al rehervidor. Tomado con modificaciones de Chien y Fruehauf, 1991.

Se comparó con Ziegler y Nichols, Aström , y las expresiones propuestas por Seborg en su libro para los valores de τ_c . Los valores de los parámetros introducidos al controlador se muestran en la tabla 1. (O'Dwyer 2006, Seborg, Edgar y Mellichamp 2003)

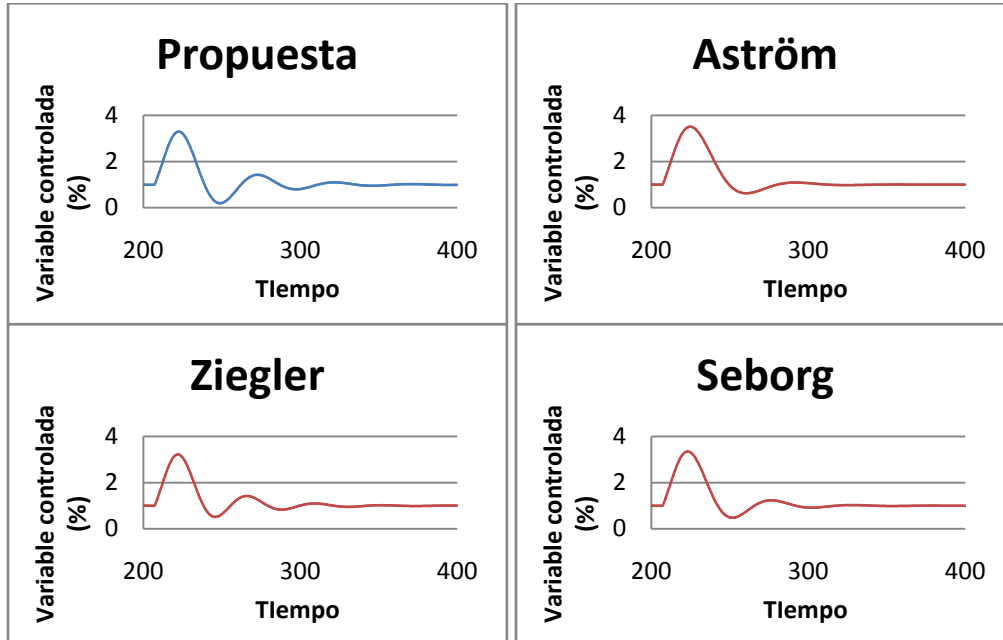
Tabla 1. Valores de los parámetros del controlador.

	Propuesto	Ziegler y Nichols	Aström	Seborg ($\tau_c=\theta$)
K_c	0.53848	0.608108	0.425676	0.506757
t_i	19.53901	24.66667	23.68	22.2

La respuesta del sistema ante cambios en el punto de control se muestra en la Grafica 2 y la respuesta ante perturbaciones en la Grafica 5



Grafica 5. Respuesta del sistema ante cambios en el punto de control



Grafica 6. Respuesta del sistema ante perturbaciones

A la simulación realizada se le cuantificaron algunos indicadores de desempeño, entre los cuales se encuentran el trabajo de la variable manipulada (TVM), tiempo

de respuesta (t_s), Integral del valor absoluto del error (IAE), integral del cuadrado del error (ICE). (Tabla 3)

Tabla 2. Indicadores de desempeño obtenidos

Punto de control	Propuesta	Ziegler y Nichols	Aström	Chen y seborg (Skogestad)
ICE	24.2846	21.6056	18.7227	20.4358
TVM	2.6050	2.8033	1.1936	1.8488
t_s	124.2944	131.9482	95.2798	104.6445
IAE	39.2624	35.0845	30.0447	32.4197
Perturbaciones	Propuesta	Ziegler y Nichols	Aström	Chen y seborg (Skogestad)
ICE	87.2111	73.9823	118.8197	91.1118
TVM	4.5113	4.4089	2.6815	3.4520
t_s	121.3818	108.7885	91.5516	101.9790
IAE	68.0069	57.2161	70.2708	61.9541

3.1. Robustez

Como indicador de la robustez de los métodos de sintonía seleccionados, se utilizó la razón de K última sobre K óptima (K_u/K) y θ última sobre θ óptima (θ_u/θ). Esto permite tener un valor cuantitativo de la robustez del sistema automático de control (SAC).

Para calcular los valores últimos permitidos para cada controlador se utilizó nuevamente criterio de estabilidad de Bode para sistemas lineales e invariantes en el tiempo, generando un sistema de ecuación el cual se extraen los valores buscados. Adicionalmente se sintonizó el controlador para la torre mencionada previamente, Grafica 4 ($K=0.2$ y $\theta=7.4$).

Tabla 3. Evaluación de la robustez

	Punto de control	
	K_u/K	θ_u/θ
Propuesta	9.213082	40.91777
Ziegler y Nichol	8.182562	46.04866
Aström	11.68442	62.01988
Chen y Seborg	9.807579	49.24584

4. Discusión

Los resultados obtenidos de las diversas pruebas, muestran una similitud entre el método propuesto y los encontrados en la literatura. Sin embargo la propuesta de Aström al ser comparada con las otras, es superior en lo referente a la robustez. También es notorio al comparar la propuesta con los resultados obtenidos de Chen y Seborg, la optimización del indicador ICE conlleva el deterioro de otros elementos de la regla de sintonía.

Adicionalmente es notoria la mejora entre el trabajo de Chen y Seborg, el de Aström al compararlos con el desarrollado por Ziegler y Nichols. En donde se presenta una considerable superioridad entre los valores de varios de los indicadores y la robustez.

La propuesta presenta mejoría en la robustez cuando se compara con Ziegler y Nichols. También presenta superioridad en la ICE en atenuación de perturbaciones, con respecto a Aström y a Seborg. Sin embargo en los indicadores restantes se encuentra un rezago notorio entre la propuesta y los métodos con los cuales se comparó.

Para la selección final del método para la sintonización del SAC, es necesario considerar los requisitos del proceso. Tomando en consideración que el valor de t_c no debería ser menor al valor calculado por la ecuación 4, debido a que un valor inferior a este daría como resultado un proceso inestable según el criterio BIBO.

Bibliografía

Chen, Dan, y Dale E. Seborg. «PI/PID Controller Design Based on Direct Synthesis Disturbance Rejection.» *Ind Eng Chem Res*, 2002: 4807-4822.

Chien, I-Lung, y P. S. Fruehauf. «Consider IMC Tuning to Improve Controller Performance.» *Chem. Eng. Prog.* 86 (1990): 33-41.

O'Dwyer, Aidan. *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. Singapore: Imperial College Press, 2006.

Seborg, Dale E., Thomas F. Edgar, y Duncan A. Mellichamp. *Process Dynamics and Control*. 2 ed. John Wiley & Sons, Inc., 2003.

Tyreus, Bjurn D, y William L Luyben. «Tuning PI controllers for integratpr/Dead time processes.» *Ind. Eng. Chem. Res.* 31 (1992): 2625-2628.

Ziegler, J. G., y N. B. Nichols. «Optimum Settings for Automatic Controllers.» *Transactions of the ASME* 64 (1942): 759-768.