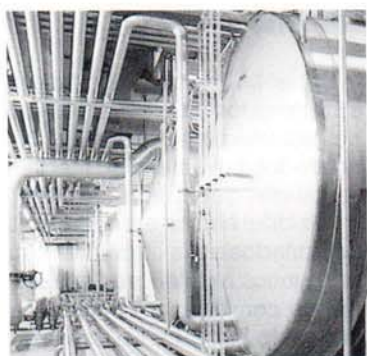


Controladores PID: ajuste de parámetros

Fernando Morilla García



Profesor titular del área de Ingeniería de Sistemas y Automática, en el departamento de Informática y Automática de la Facultad de Ciencias, UNED

Sumario

1. Introducción
2. Estimación de características del proceso
 - 2.1. Estimación en lazo abierto
 - 2.2. Estimación en lazo cerrado
 - 2.3. Recomendaciones
3. Fórmulas de sintonía
 - 3.1. Generalidades
 - 3.2. Recomendaciones
4. Conclusiones
5. Bibliografía

Palabras clave:

Controladores PID
Métodos de sintonía

Keywords:

PID Controllers
Tuning Methods

La mayoría de fabricantes de reguladores industriales están dotando a sus equipos de: ayudas al ajuste de parámetros (sintonía automática o presintonía), o de procedimientos de ajuste automático (autosintonía). Todo ello es resultado de una evolución tecnológica, en la que el regulador asume tareas de los ingenieros de procesos con el fin de ahorrar tiempo en la puesta en marcha de una planta o de sacar un mayor rendimiento al sistema de control. Los resultados que se pueden esperar de estos reguladores están condicionados por el método que emplean y por la información que necesitan. Este artículo pretende servir de guía práctica en el ajuste manual de controladores PID y en el uso de reguladores industriales con tal fin.

The majority of manufacturers are offering equipment with: parameter adjustment aids (automatic tuning or pretuning) or with automatic adjustment procedures (autotuning). This has come about as a result of a technical evolution, which involves the regulator taking on the process engineers' tasks with the aim of saving time when starting up a factory plant or obtaining more benefits from the control system. The results which are to be expected from these regulators are conditioned by the methods they use and by the information they require. This article aims to provide a practical guide to the manual tuning of PID controllers and for the use of industrial regulators employed for this purpose.

Controladores PID: ajuste de parámetros

1. Introducción

La primera decisión en el diseño de un sistema de control PID es la elección del controlador. A una buena elección de éste (P, PI, PD o PID), ayudan los conocimientos básicos sobre controladores PID (algoritmos y estructuras de control) tratados en [5], y la experiencia que se tenga sobre el proceso a controlar. En este sentido son muy útiles las recomendaciones de Shinskey en [7].

A continuación se debe efectuar el ajuste de los parámetros (sintonía) para que la respuesta del sistema en lazo cerrado tenga unas características determinadas (criterio de sintonía). El ajuste de parámetros se convierte así en una tarea muy frecuente en plantas industriales, no sólo en los trabajos de puesta en marcha, sino también cuando se detectan cambios sustanciales de comportamiento en el proceso controlado.

En las primeras aplicaciones de control PID, el ajuste se basaba únicamente en la propia experiencia del usuario o en métodos analíticos, pero rápidamente Ziegler y Nichols (1942) propusieron técnicas empíricas que tuvieron una buena aceptación, y que han servido de base a métodos más recientes.

Los métodos empíricos o experimentales de ajuste de parámetros están especialmente orientados al mundo industrial, donde existen grandes dificultades para obtener una descripción analítica de los procesos. Constan fundamentalmente de dos pasos:

- **Paso 1:** Estimación de ciertas características de la dinámica del proceso a controlar. La estimación se puede efectuar en lazo abierto, como se describe en el apartado 2.1., o en lazo cerrado, como se describe en el apartado 2.2.
- **Paso 2:** Cálculo de los parámetros del controlador. Para ello se aplican las fórmulas de sintonía, como se indica en el apartado 3, que son relaciones em-

píricas entre los parámetros del controlador elegido y las características del proceso estimadas en el paso anterior.

El hecho de que estos métodos den sólo valores aproximados para los parámetros del controlador hace generalmente necesario un tercer paso (ajuste fino de los parámetros), mediante observación de la respuesta del sistema en lazo cerrado.

Las diferencias entre los distintos métodos empíricos, citados en la literatura y que se han incorporado en algunos reguladores industriales, radican en la forma de combinar la técnica de estimación y las fórmulas de sintonía. En este artículo se describen las técnicas y las fórmulas habituales en procesos industriales, se comentan las ventajas y desventajas de cada una de ellas, y se dan algunas recomendaciones para su uso.

2. Estimación de las características del proceso

En general no es posible describir completamente un proceso industrial, de ahí que se empleen para ello técnicas de aproximación. Estas técnicas se basan en que ciertas características dinámicas se pueden observar (estimar) en las respuestas del proceso a determinadas señales.

2.1. Estimación en lazo abierto

Esta técnica de estimación se basa en que la mayoría de los procesos industriales tienen respuesta monótona creciente estable a una entrada escalón, como muestra la figura 1. Entre dichas respuestas se observan ligeras diferencias. Concretamente, la respuesta 1 es característica de procesos rápidos, en los que intervienen caudales, niveles, presiones; y la respuesta 4 es característica de procesos lentos en los que intervienen temperaturas. Las respuestas 2 y 3 representan características intermedias.

La similitud entre la respuestas de la figura 1 y la respuesta de un proceso de primer orden con retardo puro, figura 2, es un argumento válido para aceptar que un modelo de este tipo, aunque simple, es una buena aproximación a los procesos industriales, generalmente de órdenes muy superiores. El modelo elegido tiene tres parámetros (la ganancia en el estado estacionario K , la constante de tiempo T_p y el retardo T_d).

Dada la respuesta del proceso, existen diversas técnicas de estimación gráfica para un modelo de este tipo. Todas ellas hacen uso de determinadas propiedades de la respuesta del modelo. Nuestra experiencia [4] es que las propiedades indicadas en la figura 2 son suficientes para obtener una buena estimación y se recomienda el siguiente procedimiento:

- Obtener K como el cociente entre el cambio obser-

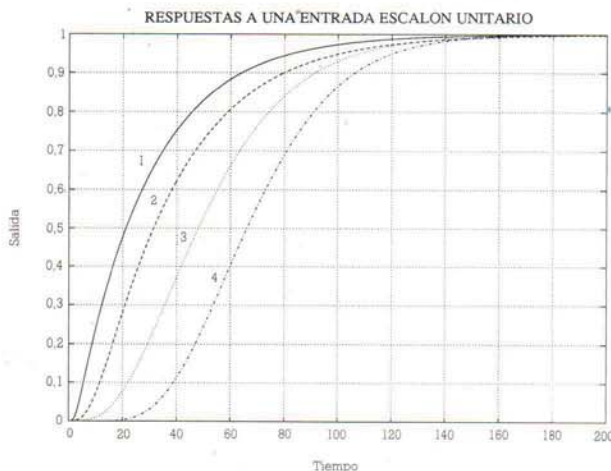


Fig. 1. Respuestas de cuatro procesos industriales representativos.

Controladores PID ajuste de parámetros

vado en la salida y el cambio provocado a la entrada del proceso.

- Medir t_1 y t_2 (instantes en los que la respuesta del proceso alcanza el 28,3 % y el 63,2 % del valor estacionario).
- Obtener T_p y T_o como

$$T_p = 1,5 (t_2 - t_1) \quad (1)$$

$$T_o = t_2 - T_p \quad (2)$$

La tabla 1 muestra los resultados obtenidos para las respuestas de la figura 1. Se observa que el proceso 1 tiene una razón retardo-constante de tiempo muy pequeña, luego es representativo de los procesos con constante de tiempo dominante. En cambio, el proceso 4 es representativo de procesos con retardo dominante.

Esta técnica de estimación es la que utiliza, por ejemplo, el algoritmo de auto-ajuste Easy-Tune de Fisher & Porter.

2.2. Estimación en lazo cerrado

Ciertas características dinámicas de los procesos también se pueden determinar a partir de su respuesta en frecuencia. Existen varios métodos experimentales para la determinación indirecta de un punto de la respuesta en frecuencia, concretamente para determinar la ganancia crítica (K_c) y el período de oscilación mantenida (t_c), definidos como: la ganancia de un controlador proporcional a partir de la cual, el sistema en lazo cerrado deja de ser estable, y el período de la oscilación que se consigue con ese valor de ganancia.

A continuación se describen dos de estos métodos, el método de la oscilación mantenida y el método del relé. La tabla 1 recoge los resultados de la estimación en lazo cerrado, por el método de la oscilación mantenida, para los cuatro procesos de la figura 1. El proceso con constante de tiempo dominante tiene la mayor ganancia crítica y el menor período de oscilación mantenida, mientras que el proceso con retardo dominante tiene la menor ganancia crítica y el mayor período de oscilación.

El método de la oscilación mantenida, propuesto por Ziegler y Nichols en 1942, consiste en:

- Cerrar el lazo de control con el controlador en modo proporcional únicamente.
- Con la ganancia proporcional K_p a un valor arbitrario, provocar pequeños cambios bruscos en el punto de consigna y observar la respuesta del sistema.
- Aumentar o disminuir K_p hasta conseguir en el paso anterior que el sistema oscile con una amplitud constante. Anotar el valor de la ganancia proporcional en ese instante como K_c , y medir el período de la oscilación mantenida t_c .

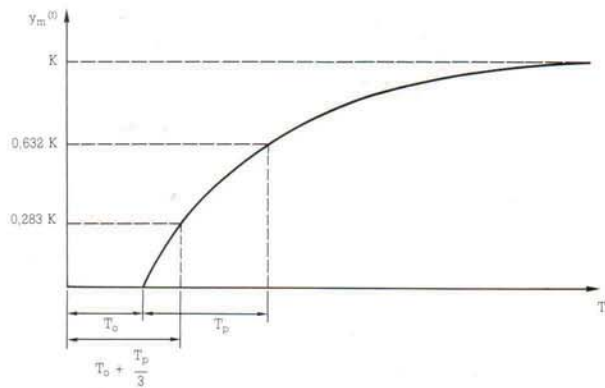


Fig. 2. Respuesta a una entrada escalón unitario del modelo de primer orden con retardo puro.

El método del relé, propuesto por Aström y Hagglund en 1984, consiste en:

- Sustituir el controlador proporcional, utilizado en el método anterior, por un relé (controlador todo-nada). Aplicar un solo salto escalón en la señal de referencia y esperar a que la respuesta del sistema alcance el ciclo límite.
- El período del ciclo límite es aproximadamente t_c , y la ganancia crítica se obtiene de la siguiente aproximación $K_c = 4d/\pi a$, siendo d la amplitud del relé y a la amplitud (pico a pico) del ciclo límite.

Este último método lo utiliza, por ejemplo, el regulador ECA-40 de Satt Control Instruments.

2.3. Recomendaciones

El método de la oscilación mantenida, aunque da resultados precisos, presenta serios inconvenientes: es un método fundamentalmente de prueba

Característica	Procesos			
	1	2	3	4
K	1	1	1	1
T_p	26.8	31.2	34.7	34.0
T_o	2.4	9.4	22.7	51.0
T_o/T_p	0.09	0.30	0.65	1.50
K_c	24.3	11.2	4.7	2.1
t_c	9.0	31.2	77.3	129.0

Tabla 1. Características estimadas para los procesos de la figura 1.

Controladores PID ajuste de parámetros

Controlador	Parámetros	Lazo cerrado	Lazo abierto
P	K_p	$0.5 K_c$	$\frac{T_p}{K T_o}$
PI	K_p	$0.45 K_c$	$0.9 \frac{T_p}{K T_o}$
	T_I	$\frac{t_c}{1.2}$	$\frac{T_o}{0.3}$
PID	K_p	$0.6 K_c$	$1.2 \frac{T_p}{K T_o}$
	T_I	$\frac{t_c}{2}$	$2T_o$
	T_D	$\frac{t_c}{8}$	$0.5T_o$

Tabla 2. Fórmulas de sintonía de Ziegler y Nichols.

y error, puede requerir excesivo tiempo, y existe el peligro de inestabilizar el sistema.

El método del relé y el método en lazo abierto, aunque dan resultados aproximados, presentan la ventaja respecto al método de la oscilación mantenida de que basta con someter el proceso a un único cambio en su entrada, y el tiempo empleado en la estimación será generalmente menor o mucho menor. De estos métodos, se recomienda generalmente la estimación en lazo abierto porque es más fácil registrar la respuesta de un proceso a una entrada escalón que conseguir una oscilación mantenida de amplitud apreciable, y porque las fórmulas de sintonía ofrecen un

Autores		Lopez y otros		Rovira y otros	
Cambio		en la carga		en la consigna	
Criterio	Modo	a	b	a	b
MIAE	P	0.984	-0.986	0.758	-0.861
	I	0.608	-0.707	-0.323	1.020
MISE	P	1.305	-0.959	-	-
	I	0.492	-0.739	-	-
MITAE	P	0.859	-0.977	0.586	-0.916
	I	0.674	-0.680	-0.165	1.030

Tabla 3. Constantes de sintonía para controladores PI.

mayor número de combinaciones para los parámetros determinados por esta técnica.

3. Fórmulas de sintonía

Estas fórmulas, propuestas por distintos autores, proporcionan un método rápido y cómodo para la determinación de parámetros del controlador PID (en sus distintas particularizaciones P, PI y PID, y en sus distintas modalidades no interactivo, interactivo y paralelo), a partir de las características estimadas del proceso, y según el criterio de sintonía elegido; razón de amortiguamiento 1/4, MIAE (mínima integral del valor absoluto del error), MISE (del cuadrado del error), MITAE (del valor absoluto del error ponderado en el tiempo).

- *Fórmulas de Ziegler y Nichols (1942)*, tabla 2: Para controladores P, PI y PID (no interactivo), a partir de las características (K_c y t_c) o (K , T_p y T_o) del proceso, cuando el criterio de sintonía es razón de amortiguamiento 1/4 para cambios en la carga. En el caso PID se observa que $T_D = T_I/4$ independientemente del proceso. Estas fórmulas las utiliza, por ejemplo, aunque con ligeras modificaciones el algoritmo de autosintonía Exact de Foxboro.
- *Fórmulas de Lopez, Murrill y Smith (1967)*: Para sintonía de controladores PI y PID (no interactivo) con criterios integrales MIAE, MISE y MITAE para cambios en la carga. Se pueden expresar de la forma general:

$$Y = a \cdot \left(\frac{T_o}{T_p} \right)^b \quad (3)$$

siendo Y igual a $K K_p$ para el cálculo de la ganancia proporcional, T_p/T_I para el cálculo de la constante de tiempo integral, y T_D/T_p para el cálculo de la constante de tiempo derivativa. Por otra parte, a y b son las constantes que dependen del parámetro a calcular y del tipo de controlador. Sus valores se incluyen en las tablas 3 y 4.

Estas fórmulas y más concretamente las que se refieren al criterio MITAE las utiliza, por ejemplo, el algoritmo Easy-Tune de Fischer & Porter.

- *Fórmulas de Rovira, Murrill y Smith (1969)*, tablas 3 y 4: Para sintonía de controladores PI y PID (no interactivo) con criterios integrales MIAE y MITAE para cambios en el punto de consigna. Es válida la formulación general (3) excepto para el cálculo de la constante de tiempo integral, que se debe utilizar

$$\frac{T_p}{T_I} = a \frac{T_o}{T_p} + b \quad (4)$$

Controladores PID ajuste de parámetros

PID		No interactivo				Interactivo				Paralelo			
Autores		Lopez y otros		Rovira y otros		Kaya y Scheib		Kaya y Scheib		Kaya y Scheib		Kaya y Scheib	
Cambio		en la carga		en la consigna		en la carga		en la consigna		en la carga		en la consigna	
Modo	Criterio	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
P I D	MIAE	1,435	-0,921	1,086	-0,869	0,981	-0,762	0,650	-1,044	1,315	-0,883	1,130	-0,813
		0,878	-0,749	-0,130	0,740	0,910	-1,052	0,095	-0,990	1,259	-1,376	-5,724	5,753
		0,482	-1,137	0,348	0,914	0,600	0,898	0,508	1,084	0,566	0,457	0,322	0,177
P I D	MISE	1,495	-0,945	-	-	1,119	-0,897	0,720	-1,031	1,345	-0,931	1,262	-0,839
		1,101	-0,771	-	-	0,799	-0,955	-0,181	1,127	1,659	-1,257	-6,019	6,036
		0,560	1,006	-	-	0,548	0,878	0,546	0,864	0,797	0,419	0,476	0,246
P I D	MITAE	1,357	-0,947	0,965	-0,855	0,779	-1,064	1,128	-0,804	1,318	-0,794	0,984	-0,499
		0,842	-0,738	-0,147	0,796	1,143	-0,709	0,029	0,998	1,125	-1,426	-2,298	2,713
		0,381	0,995	0,308	0,929	0,571	1,038	0,428	1,008	0,495	0,419	0,214	0,168

Tabla 4. Constantes de sintonía para controladores PID

- *Fórmulas de Kaya y Scheib (1988)*, tabla 4: Ofrecen soluciones al problema de la sintonía cuando el algoritmo de control PID es interactivo o paralelo, con criterios integrales MIAE, MISE y MITAE tanto para cambios en la carga como en el punto de consigna. Se deben emplear la dos formulaciones, la general (3) y la específica (4).

3.1. Generalidades

Todas las fórmulas descritas anteriormente son empíricas, ya que se han obtenido de forma experimental, como resultado de experiencias con procesos industriales típicos [8], o como resultado de simulaciones con el modelo de primer orden con retardo puro [1, 2, 6]. Este carácter empírico hace que todas ellas tengan un rango limitado de aplicación, la primera limitación es que el proceso debe ser estable en lazo abierto. Las fórmulas (3 y 4) requieren además que la respuesta del proceso a una entrada escalón sea monótona creciente y que el retardo y la constante de tiempo estimados verifiquen la condición $T_o/T_p < 1$.

La tendencia actual en la industria es la utilización de controladores discretos. Las fórmulas anteriores, que se han obtenido para controladores analógicos, también sirven para sintonizar controladores PID discretos, de la forma siguiente:

- Si el periodo de muestreo es muy pequeño respecto a las constantes de tiempo del proceso, se debe considerar al controlador como su fuera analógico

y aplicar las mismas fórmulas.

- Si se quieren utilizar las fórmulas de Ziegler y Nichols en lazo cerrado, la estimación de k_c y t_c se debe hacer con el mismo periodo de muestreo que va a tener el controlador.
- Si se ha hecho una estimación en lazo abierto, se debe utilizar como parámetro T_o en las fórmulas de sintonía el retardo corregido, que se obtiene sumando medio periodo de muestreo al retardo estimado.

La sintonía en procesos industriales se basa generalmente en criterios temporales, concretamente en especificaciones sobre la respuesta del sistema en lazo cerrado a cambios bruscos en el punto de consigna o en la carga. Las fórmulas anteriores contemplan los criterios tradicionalmente más utilizados (razón de amortiguamiento 1/4 y criterios integrales), por tanto ofrecen múltiples soluciones al problema de la sintonía.

3.2. Recomendaciones

Tras numerosas simulaciones, con los procesos de la figura 1 y distintos controladores ajustados por estos métodos, se observa que cualquiera de las fórmulas anteriores cumple su objetivo de facilitar unos parámetros próximos a los óptimos. En definitiva, con los métodos empíricos de sintonía se obtienen respuestas del sistema estables, con tiempos de asentamiento más o menos adecuados, sirvan de ejemplo las respuestas de la figura 3.

Controladores PID ajuste de parámetros

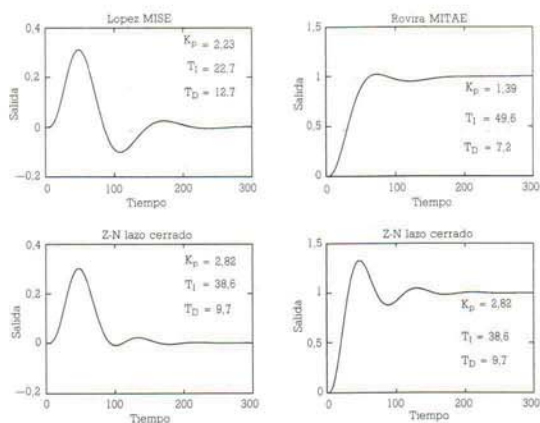


Fig. 3. Respuestas del proceso 3 con control PID (no interactivo) para cambios en la carga (gráficas de la izquierda) y en el punto de consigna (gráficas de la derecha), con los ajustes de parámetros recomendados en el apartado 3.2.

También se observa que, elegido el controlador, no existen grandes diferencias entre la utilización de uno u otro criterio integral de sintonía. Cualquiera de los criterios para cambios en la carga da lugar a respuestas con sobreelongaciones apreciables, sirva de ejemplo la respuesta superior izquierda de la figura 3. Y cualquiera de los criterios para cambios en el punto de consigna da lugar a respuestas con pequeñas sobreelongaciones o sobreamortiguadas, sirva de ejemplo la respuesta superior derecha de la figura 3.

Dado un proceso y un controlador, la elección de la fórmula más adecuada puede resultar difícil hasta que se adquiere experiencia. Nuestra experiencia [4] nos permite hacer las siguientes recomendaciones.

- Si se desea buena respuesta a cambio en la carga, es decir, que el sistema recupere rápidamente su estado estacionario frente a perturbaciones externas, es conveniente utilizar la fórmula (3) con las constantes correspondientes al criterio MISE para ese tipo de cambio y tipo de controlador (Tablas 3 y 4).
- Si se desea una buena respuesta a cambio en el punto de consigna, es decir, que el sistema pase al nuevo estado estacionario en el menor tiempo posible, es conveniente utilizar las fórmulas (3 y 4) con las constantes correspondientes al criterio MITAE para ese tipo de cambio y tipo de controlador (tablas 3 y 4).
- Y si lo que se desea es un buen compromiso entre ambas respuestas, es decir, prevenir al sistema de grandes desviaciones respecto al punto de consigna cuando se producen cambios en la carga o perturbaciones y conseguir respuestas con tiempos de subida y tiempos de asentamiento aceptables para cambios en el punto de consigna, es conveniente utilizar las fórmulas de Ziegler y Nichols en lazo cerrado (Tabla 2) o la fórmula (3) con las constantes correspondientes al criterio MITAE para cambio en la carga y al tipo de controlador (Tablas 3 y 4).

La figura 3 es un ejemplo de los resultados obtenidos siguiendo las recomendaciones anteriores, para el proceso 3 de la figura 1.

4. Conclusiones

Las técnicas de estimación por su simplicidad no facilitan un conocimiento a fondo del proceso, pero sí una aproximación a sus características más significativas. La utilización de estas técnicas puede suponer un ahorro de tiempo en la puesta en marcha de una planta o un mayor rendimiento del sistema de control, por lo que son muy recomendables.

Las fórmulas de sintonía no suelen dar resultados totalmente satisfactorios. No obstante, son muy útiles en la presintonía del controlador, ya que el operario siempre tiene la posibilidad de realizar pequeños ajustes entorno a los parámetros determinados, hasta conseguir la respuesta adecuada del sistema en lazo cerrado.

Los métodos empíricos de sintonía (combinaciones de una técnica de estimación y unas fórmulas de sintonía) no constituyen la solución completa al problema (ajuste de parámetros en controladores PID), sino una primera aproximación a los valores óptimos, con los consiguientes ahorro de tiempo y calidad de control. No obstante, siempre existe el problema de que, cuando cambien las condiciones dinámicas del proceso, dejen de ser adecuados los parámetros fijados anteriormente, y sea necesario repetir la sintonía. Una solución a este problema son los métodos de auto-sintonía.

5. Bibliografía

- [1] Kaya, A., Scheib, T.J. *Tuning of PID controls of different structures*. Control Engineering, July 1988, pp. 62-65.
- [2] Lopez, A.M., Miller, J.A., Murrill, P.W., Smith, C.L. *Tuning controllers with error-integral criteria*. Instrumentation Technology, vol. 14, nº 11, 1967.
- [3] Morilla, F. *Contribución a los métodos de autosintonía de reguladores PID*. Tesis doctoral. UNED, 1987.
- [4] Morilla, F., Dormido, S., Fernández, J.L., Canto, M. A. *A systematic study of PID controller tuning methods*. Proc. IASTED International Symposium 'Modeling Identification and Control', 1989, pp. 383-386.
- [5] Morilla, F. *Controladores PID: Algoritmos y Estructuras*. Automática e Instrumentación, Julio 1990.
- [6] Rovira, A.A., Murrill, P.W., Smith, C.L. *Tuning controllers for set-point changes*. Instruments and Control Systems. December, 1969.
- [7] Shinskey, F.G. *Process-Control Systems: Application/Design/Adjustment*. Second edition. Mcgraw-Hill Book Company, 1979.
- [8] Ziegler, J.G., Nichols, N.B. *Optimum setting for automatic controllers*. Trans. ASME, 64, pp. 759-768, 1942.