

Sistema de control para mantener la temperatura constante del agua en un tanque de teknopor

Jaime Héctor Sotero Solís, Omar Miguel Aznarán Rodríguez
Profesor principal DE. Dpto. de Física UNPRG, Br en Física UNPRG

Resumen

La temperatura es una variable física necesaria de controlar en muchos procesos industriales. Este trabajo realiza la identificación, diseño e implementación de un sistema de control de temperatura del agua contenida en un tanque. Usando principios básicos se modeló el sistema y se determinó que su función de transferencia es de primer orden por lo que fue posible utilizar el método de Ziegler-Nichols para implementar los controladores P, PI y PID, los cuales se programaron usando el compilador Mikroc para un set point de 40°C. Estos controladores se grabaron en un microcontrolador PIC16F877A y se comprobó el funcionamiento de cada uno de ellos comprobándose que el controlador apropiado para nuestro sistema es el controlador Proporcional (P).

Palabra clave: Variable del proceso, variable manipulada, planta, set point, proceso, sistema, perturbación, lazo cerrado, lazo abierto, error, fuente de energía, conversión analógica digital, conversión digital analógica.

Abstract

The temperature is a necessary physical variable of controlling in many industrial processes. This work carries out the identification, design and implementation of a system of control of temperature of temperature control system of the water in a tank. Using basic principles the system was modeled and it was determined that their transfer function is of first order for what was possible to use the method of Ziegler-Nichols to implement the controllers P, PI and PID, which were programmed using the compiler Mikroc for one Sep point of 40°C. These controllers were recorded in a microcontrolador PIC16F877A and was proven the operation of each one of them being proven that the appropriate controller for our system is the Proportional controller (P).

Keywords: Variable of the process, manipulated variable, it plants, Sep point, process, system, interference, closed knot, I rope open, error, energy source, digital analogical conversion, analogical digital conversion.

Introducción

El control automático se ha vuelto una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de manufactura. Por lo cuál la teoría de control es un tema de interés para muchos científicos e ingenieros que desean dar nuevas ideas para obtener un desempeño óptimo de los sistemas dinámicos. El aspecto más importante de los sistemas de control es la estabilidad y para lograrlo es necesario conocer las características del sistema a través de su función de transferencia. Los sistemas de control generalmente son no lineales, pero es posible aproximarlos, por eso analizar la respuesta transitoria de la planta es el primer paso para implementar acciones de

control, pues el análisis de la respuesta transitoria da como resultado la función de transferencia que representará la planta a controlar.

Antecedentes

Anshuman BezborAh[1], describe el hardware para monitorear continuamente la temperatura con intervalos modificables por software, para ello hace uso del sensor LM35 y utiliza el conversor analógico digital (ADC) del microcontrolador PIC16F877A, los valores de temperatura son mostrados en un LCD (pantalla de cristal líquido). Serhat Yilmez[2], explica como la temperatura de un ambiente cerrado es mantenida constante usando un microcontrolador tipo PIC16F877. Para ello el microcontrolador realiza el proceso mediante elección de control fuzzy o control PID. El valor de temperatura es adquirido mediante el sensor de temperatura tipo LM35 y la salida de control determina la velocidad de un ventilador por medio de una señal modulada en amplitud (PWM) la cual dispara a un circuito basado en triac conectado a 220 Vac. El resultado del trabajo es la comparación de los dos controladores.

Base Teórica Científica

Existen dos formas básicas de control denominadas control analógico y control digital, ambos pueden ser de lazo abierto o lazo cerrado

Sistema de control digital en lazo cerrado[3]

La figura 1 muestra un sistema de control digital en lazo cerrado para sistemas en tiempo continuo.

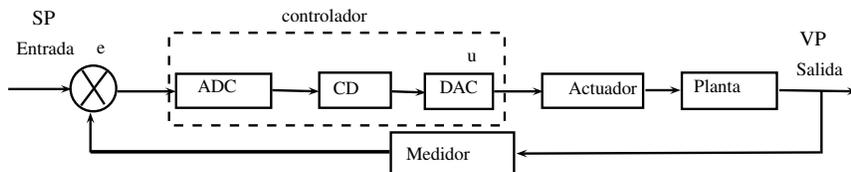


Figura 1.

Sistema de control digital en lazo cerrado

El valor deseado en la salida se coloca en la entrada del sistema y se llama set point (SP) el comparador recibe el SP y la señal de retroalimentación con la cual genera la señal de error analógica (e), esta se convierte en una señal de error digital mediante un convertidor analógico a digital (ADC). esta es modificada por el elemento de control digital (CD) de acuerdo a la estrategia de control programada convirtiéndose en señal analógica (u) mediante un convertidor digital a analógico (DAC), esta llega al subsistema actuador (también llamado corrector) el cual modifica la variable de salida llamada variable del proceso (VP) en la planta

Modelos matemáticos para sistemas en lazo cerrado[4]

La figura 2 muestra un sistema genérico de lazo cerrado

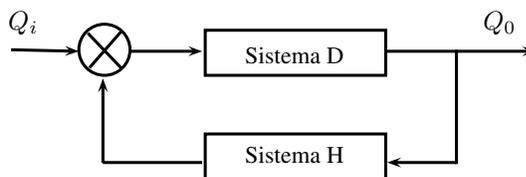


Figura 2. Modelo de sistema de lazo cerrado

Cada subsistema tiene su propia función de transferencia: $D(s)$ y $H(s)$ y la función de transferencia del sistema es

$$G_c(s) = \frac{D(s)}{1 + D(s)H(s)} \quad (1)$$

Bloques funcionales de sistemas térmicos[5]

Los bloques térmicos son: Resistencia térmica (R) y Capacitancia térmica (C). El valor de R depende del modo de transferencia del calor así tenemos:

En transferencia por conducción unidimensional en un sólido de longitud L y sección recta A es, $R = \frac{L}{A}$, y cuando la transferencia es por convección, y la superficie de separación es A , y h la constante de convección, la resistencia es, $R = \frac{1}{Ah}$

La capacitancia térmica es una medida del almacenamiento de la energía interna de un sistema. Y está definida en la siguiente ecuación :

$$q_1 - q_2 = C \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

Donde:

- $q_1 =$ flujo de calor generado dentro del sistema
- $q_2 =$ flujo de calor que sale del sistema
- $C =$ capacitancia térmica
- $T,$ Temperatura
- $t,$ tiempo

Controladores

El controlador es el subsistema que tiene como entrada la señal de error $e(t)$ y produce una salida $u(t)$ que es la entrada al subsistema actuador, la relación entre la salida y la entrada al controlador se denomina ley de control. Existen tres formas básicas de dicha ley:

- Control proporcional (P)
- control integral (I)
- control derivativo. (D)

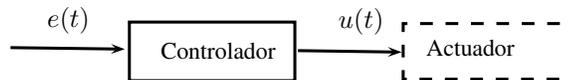


Figura 3. Diagrama de bloque del controlador

La figura 3, muestra el diagrama de bloque de un controlador, en donde

$$\text{Ley de control} = \frac{U(s)}{E(s)} \quad (3)$$

En las ecuaciones de transferencia de los controladores se acostumbra usar las constantes T_i y T_d definidas como:

$$T_i = \frac{K_p}{K_i}, \quad \text{llamada tiempo integral} \quad (4)$$

$$T_d = \frac{K_d}{K_p}, \quad \text{llamada tiempo derivativo} \quad (5)$$

Usando estas constantes las funciones de transferencia de los controladores son:

$$P : \quad G_c(s) = K_p \quad (6)$$

$$I : \quad G_c(s) = \frac{K_p}{T_i s} \quad (7)$$

$$D : \quad G_c(s) = K_p T_d s \quad (8)$$

$$PI : \quad G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (9)$$

$$PID : \quad G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (10)$$

Sintonización del controlador

El proceso que permite determinar los parámetros de un controlador se llama sintonización. Ziegler y Nichols[6] sugirieron métodos para sintonizar los controladores, esto es determinar los valores de los parámetros K_p , T_i y T_d ; usando la respuesta escalón experimental. No obstante, el sistema puede presentar un gran sobrepaso en su respuesta escalón de forma que resulte no aceptable. En tales casos se necesitará una serie de ajustes hasta que se obtenga el resultado deseado. De hecho los métodos de sintonía de Ziegler-Nichols dan una estimación razonable de los parámetros del controlador y proporcionan un punto de partida para una sintonía fina. La determinación de los parámetros se realiza mediante experimentos directos sobre la planta. Hay dos métodos denominados reglas de sintonía de Ziegler-Nichols., a continuación describimos el usado en este trabajo llamado método de la curva de reacción. El método de la curva de reacción se aplica a procesos cuya función de transferencia sea de orden uno o dos y se considera como un proceso de primer orden de ganancia K y constante de tiempo α , en cascada con un tiempo muerto τ ; esto es

$$G(s) = \frac{K}{\alpha s} e^{-\tau s} \quad (11)$$

El procedimiento consiste en abrir el lazo de control luego se aplica a la unidad de corrección una señal escalón, figura 4(a) y se grafica la variable de proceso en función del tiempo. Esta gráfica se conoce como curva de reacción del proceso. Si la curva de reacción tiene una forma de S estilizada, se usa el método de la pendiente la cual consiste en trazar una recta tangente al punto de inflexión de la curva. Con esta recta se obtienen los puntos que se indican en la figura 4(b) y se determinan los valores de τ y α . Otra forma de determinar los parámetros τ y α , es usando el método de Smith[8], para lo cual se determinan los puntos de la curva correspondientes al 63.2 % y 28.2 % de la ganancia, figura 4(c) y luego se usan las expresiones

$$\begin{cases} \alpha = \frac{3}{2}(t_1 - t_2) \\ \tau = t_2 - \alpha \end{cases} \quad (12)$$

Conocidos K , τ y α , se usan para calcular los parámetros K_p , T_i y T_d , con la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Sintonización de Ziegler-Nichols

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{\alpha}{k\tau}$		
PI	$0,9\left(\frac{\alpha}{k\tau}\right)$	$3,3\tau$	
PID	$1,2\left(\frac{\alpha}{k\tau}\right)$	2τ	$0,5\tau$

Datos Muestreados

Las computadoras digitales tienen entradas y salidas de señales que no son funciones del tiempo continuo sino una secuencia de pulsos. Una forma práctica de considerar estas señales es como señales continuas del tiempo que se han muestreado a intervalos regulares. Las muestras, constituyen una secuencia en tiempo discreto y su herramienta matemática es la transformada z .

Conversión de las leyes de control analógicas[3]

Para convertir un sistema de control analógico en un sistema de control digital, que usa las mismas leyes de control, se aproxima la función de transferencia de Laplace $G(s)$ a la función de transferencia- z de pulso $G(z)$. Dicha transformación da como resultado:

1. Control Proporcional

$$G_c(z) = K_p \quad (13)$$

2. Control Integral

$$G_c(z) = T \frac{Z}{Z-1} \quad (14)$$

3. Control derivativo

$$G_c(z) = \frac{1}{T} \left(\frac{Z-1}{Z} \right) \quad (15)$$

4. Control PID

$$G_c(z) = K_p \left(1 + \frac{T}{T_i} \left(\frac{z}{z-1} \right) + \frac{T_d}{T} \left(\frac{z-1}{z} \right) \right) \quad (16)$$

Modulación por ancho de pulso (PWM)[7]

Es posible modular de 0 a 100% la potencia que recibe una planta, para lograrlo se modula el tiempo de activación de dicha potencia un tiempo fijo T , menor al tiempo característico de respuesta de la planta. Esta técnica se llama "Modulación por ancho de pulso" (PWM) y es la utilizada en el trabajo. La figura 5, muestra la señal PWM.

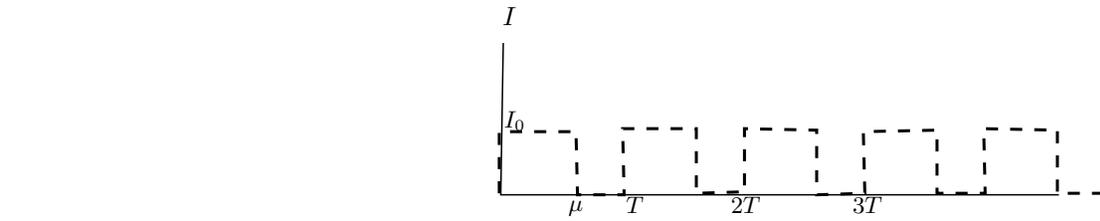


Figura 5. Señal PWM. T es el tiempo de activación y μ el ciclo de trabajo.

Si el elemento calefactor es un resistor de valor R , la potencia promedio que origina esta señal es

$$P_m = RI_0^2 \frac{\mu}{T} \quad (17)$$

Microcontroladores[8]

El Microcontrolador es un computador dedicado. En su memoria sólo reside un programa destinado a gobernar una aplicación determinada; sus líneas de entrada/salida soportan el conexionado de los sensores y actuadores a controlar y todos los recursos complementarios para su funcionamiento. Entre sus recursos más comunes se citan a los siguientes:

- a) Circuito de reloj, encargado de generar los impulsos que sincronizan el funcionamiento de todo el sistema.
- b) Temporizadores, orientados a controlar tiempos
- c) Perro Guardián (watchdog), destinado a provocar una reinicialización cuando el programa queda bloqueado.
- d) Conversores AD y DA, para poder recibir y enviar señales analógicas.
- e) Comparadores analógicos, para verificar el valor de una señal analógica
- f) Sistema de protección ante fallos de la alimentación.
- g) Estado de reposo, en el que el sistema queda “congelado” y el consumo de energía se reduce al mínimo.
- h) Salida PWM

Descripción del sistema

El diagrama de bloque del proceso está mostrado en la figura 6. Un calentador eléctrico es usado para elevar la temperatura del agua en el tanque y la idea es mantener la temperatura al valor de 40°C ., la temperatura del agua es medida usando un sensor analógico (LM35).

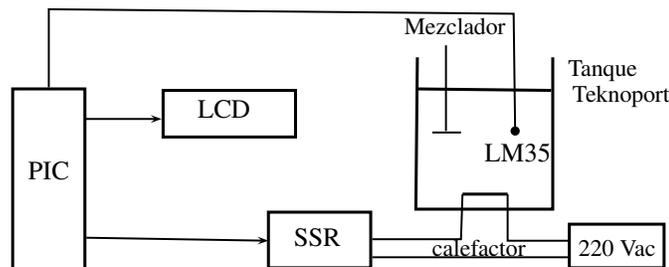


Figura 6. El proceso control de temperatura

La salida del sensor es convertido a formato digital y es comparada con la temperatura deseada (SP) para formar la señal de error. Algoritmos para control P, PI y PID han sido implementados y grabados en la memoria del microcontrolador tipo PIC16F877A, este se eligió porque tiene entrada ADC donde se conecta el sensor de temperatura, salida de modulación de ancho de pulso (PWM), usada para manejar el elemento calefactor a través del SSR (relay de estado sólido), puertos de salida/entrada para enviar datos a la pantalla LCD y seleccionar el tipo de control a ejecutar.

Modelo Matemático del tanque[13]

En el sistema tenemos transferencia de calor del elemento calefactor al agua, dado por

$$q_1 = \left(\sum_{i=1}^4 m_i c_i \right) \frac{dT}{dt}$$

Donde m_i son las masas del agua, teknoport, mezclador y sensor y c_i sus respectivos calores específicos, y T la temperatura del agua.

También tenemos transferencia de calor por convección a través de la superficie agua-aire, dado por la ley de enfriamiento de Newton

$$q_2 = hA(T - T_a)$$

Donde T_a , es la temperatura del aire, A es el área aire-agua y h , es el coeficiente de convección de la transferencia térmica

Haciendo $T_q = T - T_a$, y considerando que T_a es constante, la energía total del sistema es

$$q_1 + q_2 = Q = \left(\sum_{i=1}^4 m_i c_i \right) \frac{dT_q}{dt} + hAT_q \quad (18)$$

De donde resulta que la función de transferencia de la planta es:

$$\frac{T_q(s)}{Q(s)} = \frac{1}{sk_1 + k_2} \quad (19)$$

con $k_1 = \sum_{i=1}^4 m_i c_i$, $k_2 = hA$

Modelo matemático del calefactor

El calefactor funciona con señal PWM. Como: $R = 77\Omega$, $I_0 = 2,8A$, y $T = 1ms$ La potencia entregada por el calefactor en cada ciclo es:

$$\frac{P_{av}}{M} = 604 \times 10^3 (W/s) \quad (20)$$

Modelo matemático del sensor de temperatura

El sensor de temperatura usado el LM35DZ. Este provee una salida analógica de $10mV/^{\circ}C$, esto es

$$V_0 = 0,01T \quad (21)$$

Donde, T es la temperatura en $^{\circ}C$.

Experimento: Determinación de la curva de reacción

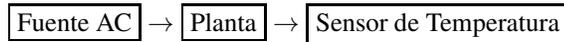


Figura 7. Diagrama de bloque del experimento

Procedimiento

1. Se conectó el circuito mostrado en la figura 7.
2. Un voltaje de 50 voltios es aplicado a la planta
3. Se registro la temperatura estabilizada que fue de 59°C
4. Se incremento el voltaje a 150 voltios y se registro la temperatura en función del tiempo en la tabla 2.
5. Se gráfico la curva de reacción, la cual mostramos en la Figura 8

Tabla 2 Temperatura en función del tiempo

Tiempo(s)	°C	Tiempo(s)	°C	Tiempo(s)	°C
0	59,1	2100	69,8	4200	75,7
100	59,1	2200	70,3	4300	75,5
200	60,1	2300	70,8	4400	75,7
300	60,8	2400	70,6	4500	75,5
400	61	2500	71,1	4600	76,2
500	62	2600	71,6	4700	76
600	62,8	2700	72	4800	76,2
700	63,2	2800	72,3	4900	76,4
800	63,5	2900	72,8	5000	76,7
900	64,2	3000	72,8	5100	76,4
1000	64,7	3100	72,8	5200	76,7
1100	65,4	3200	73,3	5300	76,9
1200	65,9	3300	73,5	5400	77,2
1300	66,2	3400	74	5500	77,4
1400	66,7	3500	74,2	5600	77,4
1500	67,2	3600	74,2	5700	77,2
1600	67,6	3700	74,7	5800	77,2
1700	67,9	3800	74,7	5900	77,4
1800	68,4	3900	75		
1900	69,1	4000	75		
2000	69,1	4100	75,7		

Los puntos *A* y *B* en la gráfica de la curva de reacción corresponden al 28,3 % y 63,2 % de la temperatura de establecimiento, usando el método de Smith se calcularon los valores de los parámetros de la planta y resultaron ser:

$$k = \frac{774 - 491}{150 - 50} \quad (22)$$

$$\alpha = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) = \frac{3}{2}(2278 - 861) = 2125 \quad (23)$$

$$\tau = t_1 - \alpha = 153$$

Con esto, la función de transferencia en lazo-abierto del sistema es de acuerdo a la ecuación (11)

$$G(s) = \frac{1,83e^{-153s}}{(1 + 2125s)} \quad (24)$$

Usando la tabla 2.1 obtenemos los parámetros para nuestros controladores, como indicamos en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros para controladores P, PI, PID - método de Ziegler-Nichols

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	7,5896		
PI	6,8306	504,9	
PID	7,5896	306	76,5

Diseño de los controladores

Usando la tabla 4.3 tenemos que la función de transferencia de los controladores son:

$$\text{Controlador P: } TF1 = \frac{U(s)}{E(s)} = 7,5893 \quad (25)$$

$$\text{Controlador PI: } TF2 = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{3448,5s + 6,83}{504,9s} \quad (26)$$

$$\text{Controlador PID: } TF3 = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{177988s^2 + 2326s + 7,6}{306s} \quad (27)$$

La Figura 9, muestra el diagrama de bloque del sistema con controlador P, PI o PID

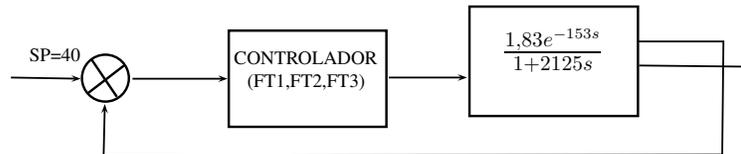


Figura 9. Sistema de control con controlador P, PI o PID

El software del controlador

El diagrama de flujo del programa que ejecuta el microcontrolador se da en la figura 10.

Resultados y Discusión

Controlador P

La tabla 4, contiene los datos obtenidos y en la figura 11 está la gráfica de estos puntos

Tabla 4. datos del controlador P

Tiempo(s)	Temperatura(c°)	Tiempo(s)	Temperatura(c°)	Tiempo(s)	Temperatura(c°)
0	33	702	40	1604	40
23	34	801	40	1703	40
102	35	900	40	1802	40
147	36	1000	40	1902	40
201	37	1104	40	2001	40
300	38	1203	40	1104	40
399	38	1302	40	1203	40
503	39	1401	40	1302	40
602	40	1500	40		

Controlador PI

La tabla 4.5 contiene los datos obtenidos y en la figura 11 está la gráfica de estos puntos

Tabla 5 Datos del controlador PI

Tiempo(s)	Temperatura(°C)	Tiempo(s)	Temperatura(°C)	Tiempo (s)	Temperatura(°C)
1	31	601	40	1503	40
100	32	700	40	1602	40
115	33	804	41	1701	40
204	34	908	41	1800	40
239	35	1002	41	1904	40
303	36	1101	41	2003	40
402	37	1205	41	2083	40
417	38	1304	41		
501	39	1404	40		

Controlador PID

La tabla 6 contiene los datos obtenidos y en la figura 11 está la gráfica de estos puntos

Tabla 6. Datos del controlador PID

Tiempo(s)	Temperatura(°C)	Tiempo(s)	Temperatura(°C)	Tiempo (s)	Temperatura(°C)
0	35	1001	40	2003	40
104	36	1100	40	2102	40
203	37	1200	40	2201	40
302	37	1304	40	2300	41
401	38	1403	40	2404	40
501	38	1502	40	2503	40
600	39	1601	40	2603	40
704	39	1700	40	2702	40
803	39	1804	41	2766	40
902	40	1904	40		

Conclusión

1. El controlador proporcional es el más apropiado para controlar la temperatura en el tanque de teknoport.
2. El sistema permite evaluar el comportamiento de los controladores P, PI y PID diseñados

Recomendaciones

Se sugiere que se implemente sistemas de control de nivel, presión, flujo, frecuencia, etc. usando microcontroladores.

Referencias

- [1] Anshuman, B.; *PIC16F877A-based Temperature monitoring system*, [http: kitsnspareres.com/admin/pdffiles/temp.pdf](http://kitsnspareres.com/admin/pdffiles/temp.pdf)
- [2] Yilmaz, S.; Tombaloglu, B.; Karabulutlu, K.; Gumus, Y.; Dincer, H.; *Temperature Control Applications By Means Of A PIC16F877 Microcontroller*, [http: emo.org.tr/ekler/bf99bb5df6533b6_ek.pdf](http://emo.org.tr/ekler/bf99bb5df6533b6_ek.pdf)
- [3] Ogata, K.; *Sistemas de control en tiempo discreto*, 2da Ed. Pearson
- [4] Ogata, K.; *Ingeniería de control moderna*, 5ta Ed, Pearson
- [5] Incropera, F.; Dewitt, D.; *Fundamentos de transferencia de calor*, 4ta E. Pearson.
- [6] Powell, F; Emani-Naeini, A.; *Control de Sistemas dinámicos con retroalimentación*, 1ra Ed, Adison Wesley.
- [7] Kohl, I.; *Examples of Applications with the Pulse Width Modulator TL5001* [http: ti.com/lit/an/slva05/slva05.pdf](http://ti.com/lit/an/slva05/slva05.pdf)
- [8] *Hoja de datos del Microcontrolador 16F877A*.