

# Simulación análoga - digital para el diseño de un Control

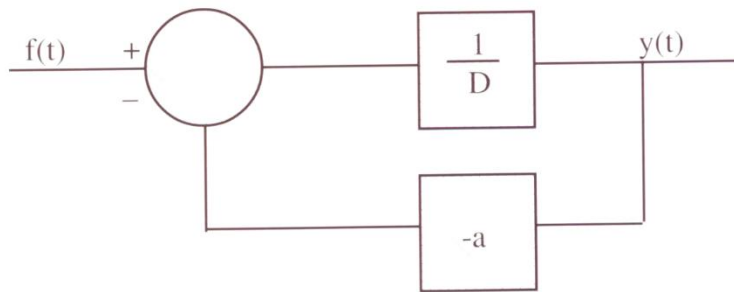
Ing. Jorge Enrique Salazar  
 Profesor Asociado U.F.P.S.  
 Departamento de Electricidad y  
 Electrónica

La simulación consiste en una serie de experimentos sobre un modelo. El modelo puede ser físico o matemático; el primero reproduce en escala reducida los componentes y las condiciones de trabajo de un proceso y, el segundo proporciona una representación de un proceso en términos de las relaciones que describen su desarrollo, entendiéndose por proceso cualquier operación que se vaya a controlar.

En el diseño de equipos de control de una planta, generalmente aparecen inconvenientes para la adecuada definición de los parámetros del control de frecuencia y del control de voltaje. Los principios de simulación analógica pueden llevarse a un lenguaje de computación digital que permita obtener respuestas, tanto internas dentro de las etapas del control bajo diseño,

como externas en el dominio del tiempo y que determinan la escogencia de los parámetros de interés, mediante técnicas de ensayo y error orientado.

Si por ejemplo, se tiene un diagrama de bloques estandarizados de la forma:



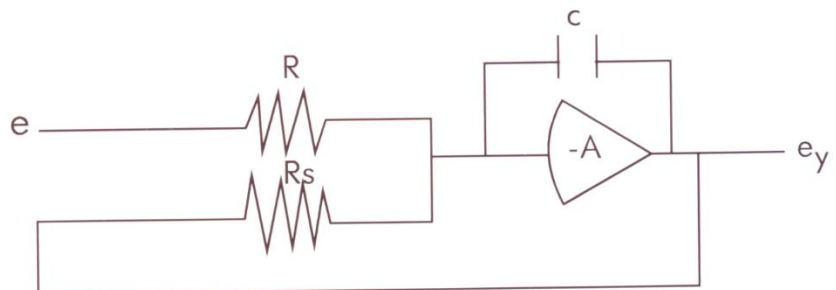
Su función de transferencia o relación causa efecto se expresa como:

$$Y(t) = f(t) / (D-a)$$

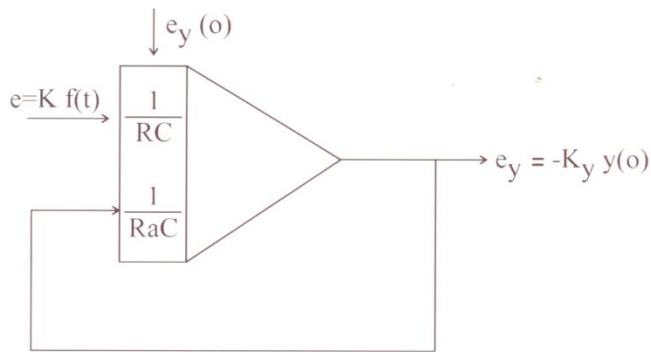
Dicha función en términos de voltaje, se expresa como:

$$e_y = -1 / D ( (1/RC) e + (1/Ra C) e_y )$$

Cuyo diagrama electrónico es:



Su diagrama de computación analógica o de simulación será:



El triángulo precedido de un rectángulo representa un integrador de primer orden, el cual es un operador que cambia de signo a la función de entrada.

Expresado como un diagrama de bloques, su función de transferencia en términos de la variable de Laplace "s" del tipo:



$$F(s) = K / (sT + 1) = E_o(s) / E_i(s)$$

Haciendo la transformación inversa de Laplace se obtiene la respuesta en el tiempo variando los parámetros de control K y del tiempo T logrando optimizarse la respuesta para lograr una estabilidad de respuesta en sistemas de primer orden. En sistemas de ordenes superiores se logra lo

mismo con la variación de los correspondientes parámetros de control.

Con diagramas de bloques similares y dependiendo de las raíces de la ecuación característica de la función de transferencia se pueden obtener diagramas de computación o de simulación analógica para sistemas de ordenes superiores haciendo una expansión en fracciones parciales y tratando de obtener primero los diagramas de bloques para sistemas de control con polos sencillos, polos repetidos o polos complejos conjugados y aplicando la técnica de diseño de los diagramas de bloques, ya sea en forma de controlador, forma del observador o en la forma en paralelo. A partir de la representación en diagramas de bloques se puede construir bien sea el respectivo diagrama electrónico o su correspondiente diagrama de simulación analógica.

El siguiente ejemplo, se tomó de la implementación de un programa de computación del libro "Simulación por Computadora" relacionado en la bibliografía, el cual se adaptó en el curso de **SIMULACION ANALOGICA** haciéndolo funcional e introduciéndole el método de RUNGE KUTTA para verificar el porcentaje de error en este sistema de primer orden con retraso y haciendo la suposición de que las funciones de transferencia de la válvula, del quemador y del termómetro son iguales a uno para poder suponer que el objeto de control, el recipiente con aire, es un objeto lineal de orden

uno con la constante  $T1$  del tiempo, y que la tubería introduce el retraso al sistema de la forma EXP (ps), en donde  $p$  es el retraso y  $S$  es la variable compleja.

## EJEMPLO: SISTEMA DE CONTROL CON RETRASO

Se considera un sistema de control de temperatura con retraso, indicando esquemáticamente en la siguiente figura. Se controla la temperatura de aire en un recipiente (R). El aire circula entre el recipiente y un calentador (C) a través del ventilador (V) y la tubería (TB) de tal forma que después de calentarse alcanza el recipiente con retraso  $p$  segundos. La temperatura ( $T$ ) se mide en el recipiente y se compara con la temperatura deseada ( $U$ ) en el controlador (RG). El controlador manda una señal proporcional al error de control  $U-T$  a la válvula (VA) que controla el flujo de combustible para el quemador (Q), según la señal del controlador.

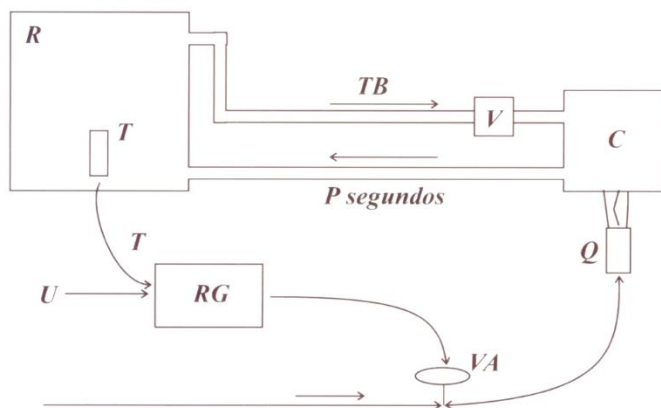
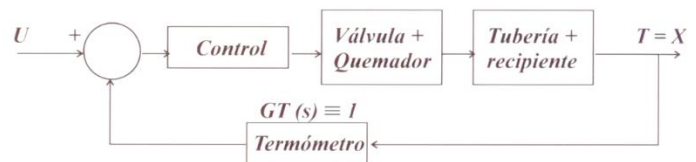


Figura No. 1  
Sistema de control de temperatura con retraso

Diagrama de bloque del sistema:



Objeto de control = Recipiente con aire.

La función de transferencia para el recipiente es:

$$G(S) = 1 / (T1s + 1)$$

$T1$  = Constante de tiempo para el recipiente = 5 segundos (Se escogió este valor después de haber corrido varias simulaciones).

El error de control es:

$$e = u(t) - x(t)$$

$u(t)$  = Valor deseado de la temperatura.

$x(t)$  = Valor real de la temperatura.

Las ecuaciones para la tubería y el recipiente son:

$$x(t) + T1(dx/dt) = K e(t - p)$$

$p$  = Retraso

$K$  = Coeficiente de ganancia del controlador

La ecuación del modelo es:

$$\dot{x}(t) = (K u(t-p) - x(t-p)) / T1$$

Donde **K**, **T1** y **p** son las variables que caracterizan al sistema.

Se realizó un curso programa en Pascal que simula la respuesta al eslabón unitario, esto es a una señal escalonada de la temperatura deseada. El programa resuelve la ecuación modelo y guarda los resultados en un arreglo Y cada M pasos. Se muestra un ejemplo de simulación para tres valores de ganancia del regulador  $K = 8, 12, 16$  notándose que a medida que éste crece, el sistema pierde estabilidad. Para el caso se tomó además  $p$ , el retraso, igual a 0,3 segundos, el tiempo final de simulación  $T_{FIN} = 10$  segundos y el incremento del tiempo de la solución  $H = 0,05$  segundos.

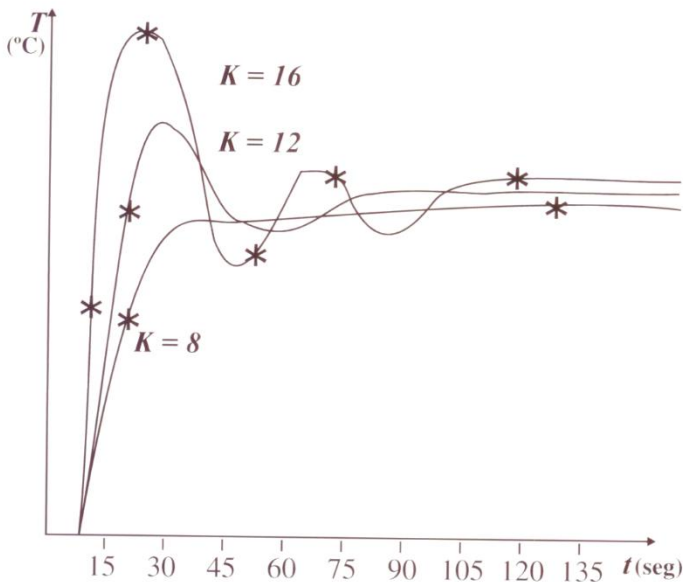


Figura 2  
Simulación de ganancia del regulador

El sistema considerado es un sistema de control con realimentación unitaria, cuyo ajuste del controlador corresponde a un modo proporcional en donde la función de transferencia es:

$$X(S) / U(S) = G(S) = K / (Ts + (K+1))$$

El valor de salida en régimen permanente haciendo uso del teorema del valor final es:

$$X_p = \lim_{t \rightarrow \infty} X(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot X(s)$$

Como la función escalón en la entrada  $R(S) = 1$ , el valor de salida en régimen permanente es:

$$X_p = \lim_{s \rightarrow 0} K / (Ts + K + 1) = K / (K+1)$$

El error en régimen permanente se obtiene como la diferencia entre el valor de entrada y el valor de salida. Este error será:

$$e_{rp} = 1 / (K+1)$$

Para obtener un error mínimo, la constante  $K$  deberá tener un valor grande. La siguiente tabla muestra la variación del error para diferentes valores de  $K$ , la cual muestra que no se logra eliminar el error.

Los valores correspondientes a los resultados de la simulación para los diferentes K especificados anteriormente, se muestran en la siguiente Tabla para el tiempo t en segundos y la temperatura T en °C, así:

K	SALIDA PERMANENTE	SALIDA PERMANENTE	ERROR REGIMEN PERMANENTE EXPERIMENTAL
0,38	0,27	0,25	0,75
1,00	0,5	0,495	0,5
2,00	0,66	0,66	0,34
5,00	0,83	0,82	0,18
8,00	0,88	0,87	0,12
10,00	0,9	0,9	0,1
12,00	0,92	0,92	0,076
16,00	0,94	0,94	0,058
	TEORICO	EXPERIMENTAL	

Las anteriores tablas comprueban la validez teórica para sistemas con realimentación unitaria y su estabilidad en régimen permanente, según lo expone Benjamín C. Kuo en SISTEMAS DE CONTROL AUTOMATICO, página 370 a 372 y corroborándose además que la estabilidad disminuye a medida que el KR aumenta.

K											
8	T	0	0	0	0	18	36	53	69	82	92
8	t	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
12	T	0	0	0	0	27	53	79	103	120	130
12	t	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
16	T	0	0	0	0	36	71	106	137	156	163
16	t	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45

## BIBLIOGRAFIA

STANISLAW, Raczynski. Simulación por computadoras. México : Limusa (1993) 208 p.

SCOTT, Donal E. Introducción al análisis de circuitos : un enfoque sistémico; McGraw Hill (1989) 717 p.

KATSUHIKO, Ogata. Ingeniería de control moderna. Prentice Hall (1990) 1020 p.

STUBEREAUD, Diestefano. Retroalimentación y Sistemas de control, McGraw Hill. 636 p.