

Herramienta de Análisis y Diseño de Sistemas de Control Basada en Hojas de Cálculo Excel

Nourdine Aliane

Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática, Universidad Europea de Madrid, Villaviciosa de Odón- Madrid, España, 28670
(e-mail: nourdine.aliane@uem.es)

Resumen: Este artículo presenta una herramienta para el análisis y diseño de sistemas de control basada en hojas de cálculo Excel. Esta herramienta es un conjunto de subrutinas y funciones desarrolladas con el lenguaje VBA. En la actualidad, esta herramienta se limita al manejo de sistemas lineales representados mediante la función de transferencia. El usuario puede especificar modelos, obtener sus respuestas transitorias y en frecuencia, simular un sistema realimentado a través de un controlador, o ajustar los parámetros de un controlador de forma interactiva. Además, la herramienta permite al usuario mantener varias simulaciones en una misma hoja de cálculo, y su carácter interactivo hace posible observar el efecto de varios parámetros sobre el comportamiento de los sistemas de forma inmediata. Para ilustrar el alcance y algunas características de esta herramienta, se han incluido varios ejemplos. Copyright © 2009 CEA.

Palabras Clave: Control, Sistemas lineales, Simulación, Hojas de Calculo.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las hojas de cálculo han sido reconocidas como plataformas para la realización de cálculos científicos. Su simplicidad de programación, su rico conjunto de funciones de librería y su gran capacidad de generación de gráficos, hacen que las hojas de cálculos sean herramientas atractivas en varios campos de la ingeniería (Craig, 2006; Levie, 2001; Foster, 1998; Xu, 1999). Por otro lado, los paquetes de hojas de cálculo modernos se distribuyen con lenguajes de macros que mejora sustancialmente su versatilidad. En el caso de Excel, la introducción del lenguaje “Visual BASIC for Application” (VBA) permite a los programadores extender las capacidades de Excel desarrollando complementos específicos. En efecto, VBA tiene la flexibilidad de un lenguaje de programación de propósito general, y naturalmente, se puede utilizar para programar los métodos de cálculo numérico. Los libros (Gottfried, 2005; David, 2006; Webb, 2006) constituyen una excelente bibliografía para iniciarse en la utilización de Excel para el cálculo científico.

Las hojas de cálculo han sido también utilizadas en el ámbito educativo con el objeto de diseñar demostraciones y simulaciones de laboratorio en varios campos de la ingeniería (Chahab 2004; Ferreira, 2004; Oke, 2004; Schumack, 2004; Silva, 1994). Su disponibilidad y la conveniencia de sus representaciones gráficas hacen que sean una herramienta didáctica potente.

En el área del control automático, las hojas de cálculo no han recibido suficiente atención, y los científicos en este campo utilizan de forma preferente los paquetes de software profesional como Matlab/Simulink, Labview o similares. No obstante, se han encontrado en la literatura algunos trabajos relacionados con el control automático que utiliza las hojas de cálculo como en (El-Hadj *et al.*, 2000; 2001; 2002; 2003; Rives y Lacks, 2002). En efecto, Excel ofrece un entorno suficiente para desarrollar

simulaciones complejas que involucren sistemas continuos, discretos, mixtos, lineales, y no lineales.

Este artículo presenta COCT (command-oriented control toolbox), un complemento para Excel enfocado al análisis y diseño de sistemas de control (Aliane 2008). Esta herramienta es un conjunto rutinas desarrolladas con el lenguaje VBA y organizadas a modo de una toolbox de control. COCT está disponible en <http://www.esp.uem.es/aliane/riai/COCT.zip>.

El resto del artículo está estructurado de la siguiente forma. La sección 2 presenta el alcance de la herramienta COCT. A continuación, la sección 3 explica como se introduce una función de transferencia en una hoja de cálculo y presenta algunas técnicas de parametrización de los modelos. En la sección 4, se explican como se obtienen las respuestas transitoria y en frecuencia de los sistemas lineales así como la descripción de las propiedades más destacadas de la herramienta. La sección 5 presenta la simulación de sistemas realimentados. Por último, la sección 6 concluye este trabajo y sugiere algunas ideas sobre las posibles extensiones de la herramienta.

2. ALCANCE DE LA HERRAMIENTA COCT

COCT es un complemento para Excel organizado a modo de una toolbox de control. En la actualidad, COCT se limita al manejo de sistemas lineales de una entrada y una salida (SISO) representados mediante la función de transferencia.

Este complemento permite utilizar una hoja de cálculo como un contenedor para especificar modelos, obtener sus respuestas transitorias y en frecuencia, realizar simulaciones de sistemas realimentados a través de controladores como los PID o redes de compensación, etc. Estos objetos se pueden introducir en las celdas como datos convencionales o alternativamente obtenerlos haciendo uso de funciones específicas y fórmulas. La figura 1 muestra el aspecto general de una hoja de cálculo vinculada al entorno COCT.

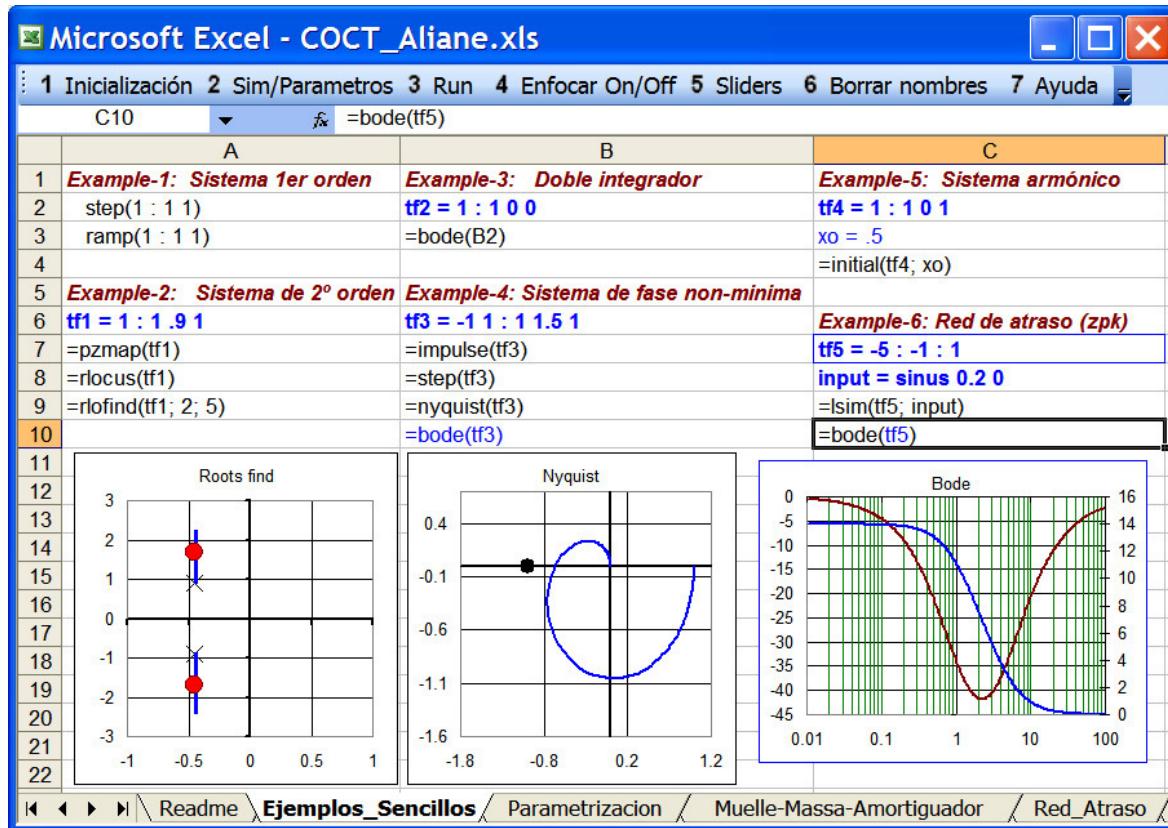


Figura 1. Aspecto general del entorno COCT.

COCT permite mantener varias simulaciones en una misma hoja de cálculo, y el usuario puede pasar de una simulación a otra moviendo el foco de una celda a otra. En la figura 1, se puede observar una hoja de cálculo con varios modelos y simulaciones. Nótese también que la hoja de cálculo está configurada para mostrar las formulas. Algunos de estos ejemplos se detallarán más adelante.

El entorno COCT se caracteriza por su interactividad en el sentido de que permite efectuar cambios en algunos parámetros de un sistema y observar sus efectos de forma inmediata. Esta propiedad es similar al concepto de “*dynamic pictures*” (Wittenmark *et al.*, 1998), y que está presente en las herramientas educativas como *CCSdemo* (Wittenmark *et al.*, 1998), *Ictools* (Johansson *et al.*, 1998), *LSAD* (Dormido *et al.*, 2005), o las más recientes herramientas *PID-Basics*, *PID-Loop-Shaping* y *PID-Windup* que el usuario puede encontrar en <http://www.calerga.com/contrib/1/index.html> (Guzman *et al.*, 2008). La interactividad es particularmente importante en la fase de diseño de un sistema de control, ya que permite simplificar de forma significativa el proceso iterativo de prueba y error (Dormido, 2005). En este aspecto, COCT ofrece varios mecanismos que permiten al usuario iterar de forma sencilla para buscar el cumplimiento de las especificaciones.

Además de los recursos de COCT, el usuario dispone de varias utilidades convencionales de Excel como el uso de fórmulas, la posibilidad de integrar en las propias hojas de cálculo de controles como las barras de desplazamiento, o la creación de gráficos, por citar algunos ejemplos. Por lo tanto, COCT permite realizar el análisis y el diseño de sistemas de control dentro de un marco de trabajo rico en utilidades.

3. ESPECIFICACION DE UNA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

En el entorno de COCT, una función de transferencia (FT) se puede especificar utilizando la forma polinomial o la forma factorizada (cero-polo-ganancia), y se puede introducir en una celda de varias maneras. Para ilustrar este procedimiento, consideraremos las funciones de transferencia

$$\text{tf1}(s) = \frac{s - 2}{s^2 + 2s + 3}$$

y

$$\text{tf2}(s) = 4 \frac{(s - 1)}{(s + 2)(s + 3)}.$$

Estos dos modelos se introducen en celdas separadas como simples cadenas de texto tal y como se muestra en la figura 2.

	A	B	C
1	$\text{tf1} = 1 : -2 : 1 \ 2 \ 3$	$\text{tf2} = 1 : -2 : -3 : 4$	

Figura 2. Definición de una FT en el entorno COCT.

En la celda A1 se ha introducido la FT tf1 como dos sub-cadenas separadas por el símbolo “:” representando el numerador y el denominador respectivamente. Los coeficientes de los polinomios están en orden decreciente de potencias. Por otra parte, la FT tf2 con una representación factorizada, está introducida en la celda B1 como tres sub-cadenas separadas por los símbolos “:”, donde la primera sub-cadena representa el

conjunto de los ceros, la segunda el conjunto de los polos, y la tercera la ganancia estática del sistema. Estas dos formas se reconocen de forma automática por el número de ocurrencias del carácter ":" en las celdas. Las cadenas solo se interpretan como sistemas dinámicos cuando se pasan a los procedimientos relacionados con la simulación.

El entorno de COCT ofrece la posibilidad de nombrar las celdas indirectamente y asignar nombre a los objetos que contienen. Por ejemplo, se pueden utilizar los nombres asociados a funciones de transferencia como referencia en vez de los rótulos clásicos de columna y fila. Esta propiedad se ha programado como un procedimiento VBA que reconoce las asignaciones de tipo "alias = ítem" y que asigna el nombre "alias" a la celda correspondiente. Esta operación se efectúa de forma transparente al finalizar la introducción de un objeto en una celda, simplificando así el procedimiento tradicional de (Insertar->Nombre->Crear). Nombrar las celdas ofrece otras ventajas como permitir realizar las operaciones de cortar y pegar bloques de celdas sin preocuparse de las direcciones relativas y permite organizar y estructurar mejor las simulaciones de una hoja de cálculo.

3.1 Parametrización de las funciones de transferencia

Para proporcionar al usuario un mecanismo versátil en la parametrización de los modelos, se ha diseñado una función de usuarios "=tf()" polimórfica que acepta varios tipos de argumentos: una celda, un rango de celdas, y cadenas de texto. De forma similar, se ha diseñado una segunda función "=zpk()" para crear funciones de transferencia en su forma factorizada. Este mecanismo nos permite vincular los parámetros de un modelo directamente a las celdas de una hoja de cálculo, dando así la posibilidad al usuario de realizar el análisis de escenarios "what-if experiments". La figura 3a muestra este mecanismo.

Todas las entradas deben leerse de arriba abajo siguiendo las columnas. En la columna A, la FT introducida en la celda A5 referencia las celdas A3 y A4 que representan el numerador y el denominador respectivamente. La columna B muestra otra alternativa en la que se referencia a los nombres *num* y *den*. La FT introducida en C5 referencia el numerador introducido en C1 y el denominador definido en el rango C3:C5. De forma similar, las funciones de transferencia introducidas en D5 y E6 están definidas utilizando la función "=zpk()". Nótese también que los modelos introducidos en las celdas C5 y E6 están completamente parametrizados y que todos sus parámetros se pueden modificar de forma individualizada, actualizándose así las funciones de transferencia correspondientes de forma automática. Las formulas del ejemplo de la figura 3a producen los resultados que se muestran en la figura 3b. Finalmente, una FT se puede visualizar con un formato más amigable tal y como se muestra en la figura 3c.

4. SISTEMAS EN LAZO ABIERTO

Los aspectos más relevantes en el estudio de sistemas lineales están relacionados con la respuesta transitoria y en frecuencia. Estas respuestas se utilizan para describir las propiedades dinámicas de los sistemas como el tiempo de respuesta, el tiempo de establecimiento, el sobre nivel, el amortiguamiento, el error estático, el ancho de banda, etc.

En el entorno COCT, las respuestas transitorias y en frecuencia se consideran como objetos gráficos. Estos objetos pueden ser las respuestas transitorias ante las señales típicas como el impulso, el escalón, la rampa, la sinusode, o las respuestas en frecuencia como los diagramas de Bode, el diagrama de Nyquist, y la visualización gráfica de los márgenes de ganancia y de fase.

	A	B	C	D	E
1			1		-1
2			1	zeros = -1 -2	-2
3	1	num = 1 -2	2	polos = -3 -3	-2
4	1 0.5 1	den = 1 2 1	1	=zpk(zeros;polos;1)	4
5	=tf(A3; A4)	=tf(num; den)	=tf(C1; C2:C4)	=zp2tf(D4)	=zpk(E1; E2:E3;E4)
6					=zp2tf(E5)

Figura 3a. Ejemplo de utilización de las funciones "=tf()" y "=zpk()".

	A	B	C	D	E
5	sys = 1 : 1 0.5 1	sys = 1 -2: 1 2 3	sys = 1: 1 2 1	sys = 1 3 2 : 1 6 9	zp = -1: -2 -2 : 4

Figura 3b. Resultados de las formulas de la figura 4a.

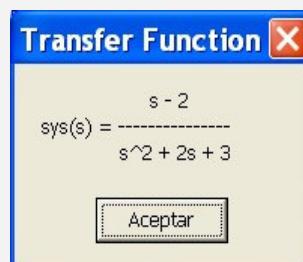


Figura 3c. Visualización amigable de la FT definida en la celda B5.

Un objeto gráfico se puede introducir directamente en una celda como una cadena de texto, u obtenerlo a través de una función específica como “=step()”, “=ramp()”, “=bode()”, etc. El manejo de estas funciones es similar a las fórmulas convencionales de Excel. La figura 4 muestra un ejemplo, donde la celda A1 define la respuesta a un escalón de un sistema de 2º orden. Nótese que el argumento de la función es una FT. Por otro lado, en la celda A3 se utiliza la fórmula “=bode()” que tiene como argumento una FT definida previamente en la celda A2.

	A	B
1	step(1 : 1 0.5 1)	
2	tf1 = 1 1 : 1 0.5 1	
3	=bode(tf1)	

Figura 4. Respuestas transitoria y en frecuencia.

Para desplegar el gráfico de una respuesta determinada, el usuario solo tiene que mover el foco sobre la celda correspondiente y a continuación presionar la tecla de *Retorno de Carro*.

Es importante señalar que se pueden definir varios análisis y simulaciones en una misma hoja de cálculo, y el paso de una simulación a otra se lleva a cabo moviendo el foco de una celda a otra, permitiendo así al usuario realizar comparaciones entre simulaciones de forma sencilla y rápida.

Ejemplo: Hoja de cálculo con varios sistemas

La figura 5a muestra un fragmento de hoja de cálculo con varios sistemas y simulaciones. Las simulaciones están organizadas en columnas, y todas las entradas en cursiva representan comentarios.

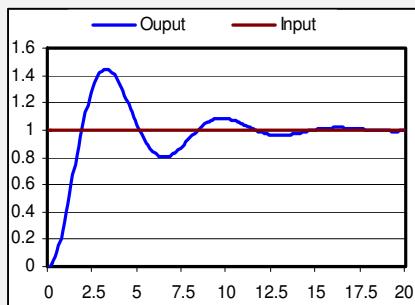
La celda A2 define la FT de un sistema de primer orden, y las celdas A3 y A4 definen sus respuestas a un escalón y a un impulso respectivamente. La celda A8 define la FT de un sistema armónico y en la celda A10 define su respuesta a una condición inicial. De forma similar, la celda B4 define la FT de un doble integrador y en la celda B5 su diagrama de Nyquist. En la celda D8, está definido un sistema de segundo orden parametrizado en términos de su factor de amortiguamiento y su frecuencia natural introducidos en las celdas D2 y D3 respectivamente. Nótese que cambios en estas dos celdas actualizaría el modelo de forma automática.

La selección de la celda B9 y la ejecución de la simulación desplegará la respuesta a un escalón del FT correspondiente (ver figura 5b). A continuación, si movemos el foco a la celda B10 y ejecutamos de nuevo la simulación, se desplegarán los diagramas de Bode del mismo sistema (ver figura 5c).

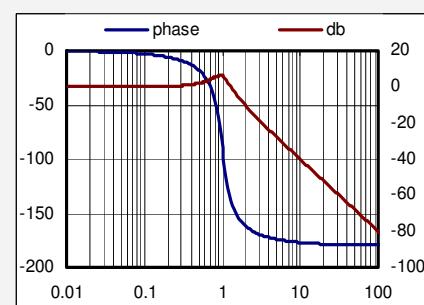
COCT ofrece un mecanismo que mejora la interactividad, permitiendo establecer el foco sobre una simulación y lanzarla a ejecución al detectarse cualquier cambio en la hoja de cálculo. Esta característica permite observar el efecto de algunos parámetros sobre el comportamiento de los sistemas sin teclear ningún comando. El usuario puede enfocar una simulación registrándola mediante botón *Enfocar* de la barra de herramienta, o moviendo el foco sobre la celda de la simulación deseada.

	A	B	C	D
1	Sistema de 1er orden	Doble integrador	Sistema de 2º orden parametrizado	
2	tf1 = 1 : 2 1	1	ξ	0.7
3	=step(tf1)	1 0 0	ω_n	2
4	=impulse(A2)	=tf(B2; B3)	num	=D3^2
5	Sistema armónico	=nyquist(B4)	den	1
6	n = 1	Sistema de 2º orden		=2*D2*D3
7	d = 1 0 1	num = 1		=D3^2
8	=tf(n, d)	den = 1 0.5 1	Sistema	=tf(D4; D5:D7)
9	x0 = 1	=step(num; den)		=step(D8)
10	=initial(A8, x0)	=bode(num; den)		=ramp(D8)

Figura 5a. Una hoja de cálculo con varias simulaciones.



b)



c)

Figura 5b. Respuesta a un escalón de un sistema de 2º orden.

Figura 5c. Diagramas de Bode del mismo sistema.

Finalmente, la variación de los parámetros se puede efectuar mediante barras de desplazamiento (sliders), que se pueden insertar en una hoja de cálculo. El siguiente ejemplo ilustra esta propiedad

Ejemplo: Sistema masa-muelle-amortiguador

Consideramos el sistema dinámico de masa-muelle-amortiguador cuya ecuación diferencial es

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = F(t),$$

donde $y(t)$ es el desplazamiento de una masa m sometida a una fuerza externa $F(t)$, c es la constante de amortiguamiento, y k la constante del muelle. La FT entre la fuerza y el desplazamiento está dada por

$$G(s) = \frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + cs + k}.$$

El factor de amortiguamiento ζ y de la frecuencia natural ω_n del sistema están dadas por

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}, \text{ y } \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

La simulación del sistema se muestra en la figura 6.

	A	B	C
1	Numerador	1	
2	m	=C2/10	
3	c	=C3/10	
4	k	=C3/10	
5	ζ	=B3/(2*sqrt(B2*B4))	
6	ω_n	=sqrt(B4/B2)	
7		=tf(B1; B2:B4)	
8		=step(B7)	

Figura 6. Sistema masa-muelle-amortiguador.

El modelo introducido en la celda B7 está parametrizado y se actualiza de forma automática ante cualquier cambio en los parámetros definidos en las celdas B2:B4. Estos parámetros, a su vez, están asociados a tres barras de desplazamiento como medio para efectuar cambios en sus valores. Las formulas para calcular el factor de amortiguamiento ζ y la frecuencia natural ω_n del sistema están introducidas en las celdas B5 y B6 respectivamente. Finalmente, es importante señalar que si se establece el foco sobre la celda B8, entonces la respuesta al escalón del sistema se actualizará cada vez que se hace un clic sobre una de las tres barras de desplazamiento. Señalar que los valores generados por los “sliders” son enteros, por lo que es preciso efectuar alguna división para definir incrementos más adecuados en el cambio de los parámetros del sistema.

5. SISTEMAS EN LAZO CERRADO

El entorno COCT ofrece también la posibilidad de simular un control en lazo cerrado. La estructura de control implementada en COCT está esquematisada en la figura 7 donde el sistema está sometido a una entrada de referencia r y una perturbación

externa d . Para caracterizar un sistema de control, no es suficiente con presentar su respuesta ante la señal de referencia, sino que es también relevante visualizar la respuesta del sistema ante las perturbaciones, así como la señal de control correspondiente.

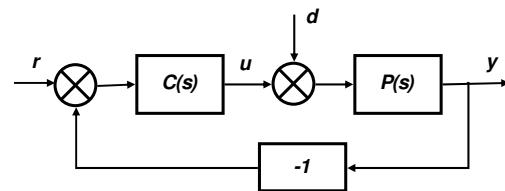


Figura 7. Esquema de control implementado en COCT.

En el entorno COCT, un lazo de control se define mediante la función “=cloop(tf1; tf2; r; [d])”, donde $tf1$ define el sistema a controlar, $tf2$ el controlador, r la señal de referencia, y $[d]$ un parámetro opcional para especificar una perturbación externa. El siguiente ejemplo ilustra un ejemplo de diseño.

Ejemplo: Compensación mediante una red de atraso

Una red de atraso tiene la siguiente FT

$$C(s) = K \frac{s+z}{s+p} = K_c \frac{\tau s + 1}{\beta \tau s + 1},$$

donde $z > p > 0$, $\tau = \frac{1}{z}$, $\beta = \frac{z}{p}$, y $K_c = \beta K$.

En general, la compensación mediante una red de atraso plantea especificaciones sobre el error estático y el margen de fase. El diseño se realiza en el dominio de la frecuencia utilizando los diagramas de Bode siguiendo un procedimiento puramente gráfico. El primer paso consiste en determinar la ganancia K que cumple con el requisito del error estático. A continuación, se dibujan los diagramas de Bode del sistema modificado por la ganancia del compensador, que luego se utilizarán para determinar las posiciones del polo y del cero del compensador que cumplan con el requisito del margen de fase. Para esto, consideraremos el sistema cuya FT es

$$G_p(s) = \frac{100}{(s+10)^2},$$

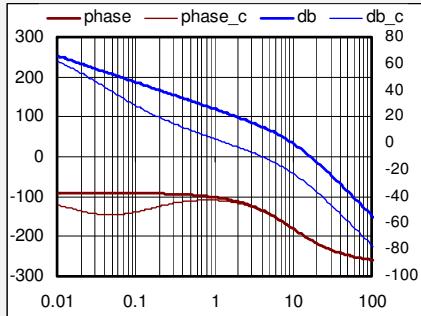
donde se plantean las especificaciones de una constante de error en velocidad Kv de 15 y un margen de fase de al menos 45° .

La simulación de este ejemplo está dada en la figura 8a. El sistema está definido en la celda A5, mientras que la red de atraso está definida en la celda C5. Los parámetros de la red (ganancia, polo y cero) se han introducido en celdas separadas y están asociados a tres barras de desplazamiento. El sistema compensado está definido en la celda C7 utilizando la conexión serie entre el sistema y la red de atraso.

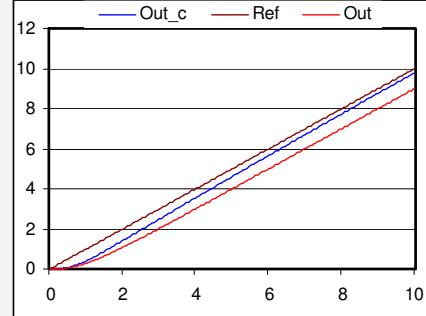
El diseño de la red de compensación se puede completar de forma interactiva viendo como influye la posición del polo y del cero sobre las especificaciones, y buscar así el mejor compromiso. Las figuras 8b y 8c muestran los diagramas de Bode y las respuestas ante una rampa de los sistemas sin compensar y compensado.

	A	B	C	D	E
1	<i>Sistema sin compensar</i>	<i>Sistema compensado</i>			
2	<i>Zero = []</i>	$K = Kc/\beta$	$=\text{zpk}(A2; A3; A4)$	$=E2/E4$	Kc
3	<i>Polos = 0 -10 -10</i>	$z = 1/\tau$	$=1/E3$	τ	
4	<i>Ganancia = 100</i>	$p = 1/(\beta \tau)$	$=1/(E3*E4)$	β	
5	$=\text{zpk}(A2; A3; A4)$	<i>Red de</i>	$=\text{zpk}(C2; C3; C4)$		
6	$=\text{bode}(A5)$		$=\text{bode}(C5)$		
7		$C(s)GP(s)$	$=\text{serie}(A5; C5)$		
8	<i>ref = ramp 1 0</i>		$=\text{bode}(C7)$		
9	$=\text{cloop}(A5; 1; A8)$		$=\text{cloop}(C7; 1; A8)$		

Figura 8a. Compensación mediante una red de atraso.



b)



c)

Figura 8b. Diagramas de bode del sistema sin compensar y compensado.

Figura 8c. Respuestas ante una rampa del sistema sin compensar y compensado. Las respuestas corresponden al ajuste ($K=1.5$, $z=0.15$, y $p=0.015$).

5.1 PID control

Los controladores PID son los más utilizados en el control de procesos industriales, y por lo que se ha juzgado conveniente implementar una función que devuelva la FT de un controlador PID mediante la especificación de sus tres parámetros. El algoritmo implementado corresponde al PID con filtro en su término derivativo, y cuya FT está dada por

$$K(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + T_d s / N} \right),$$

donde K_p , T_i y T_d son los parámetros del regulador, y N es un parámetro que permite colocar el polo del filtro de la acción derivativa.

Un PID se define mediante la función “ $=\text{pid_c}(K_p; Ti; Td; [N])$ ”, siendo N es un parámetro opcional.

Ejemplo: Control con un PID

Este ejemplo ilustra un control mediante un controlador PID de un sistema de tercer orden cuya FT está dada por

$$G_p(s) = \frac{1}{(s+1)^3}.$$

La simulación de este ejemplo se puede ver en la figura 9a.

	A	B	C
1	<i>Sistema</i>	$tf = 1 : 1 3 3 1$	
3	K	$=C3/10$	
4	Ti	$=C4/10$	
5	Td	$=C5/10$	
6	<i>PID</i>	$=\text{pid_c}(B3; B4; B5)$	
7	<i>Referencia</i>	$r = \text{step } 1 0$	
8	<i>Perturbación</i>	$d = \text{step } 1 10$	
9	<i>Lazo cerrado</i>	$=\text{cloop}(B1; B6; B7; B8)$	

Figura 9a. Control mediante un controlador PID.

La FT del sistema está definida en la celda B1, mientras que los parámetros K_p , T_i y T_d del PID están introducidos en las celdas B3, B4 y B5, respectivamente. Estos parámetros están asociados a tres barras de desplazamiento para poder cambiar su valor. La FT del PID está introducida en la celda B6. El objeto nombrado r de la celda B7 define un escalón unitario que se aplica en el instante $t = 0$ segundos, mientras que el objeto d de la celda B8 define una perturbación en forma de escalón unitario que se aplicará en el instante $t = 10$ segundos. La simulación del lazo cerrado está definida en la celda B9

Las figuras 9b y 9c muestran la respuesta del sistema ante las señales de referencia y de perturbación, así como la señal de control. Mediante esta simulación, el usuario puede realizar el ajuste de los parámetros de un PID de forma interactiva.

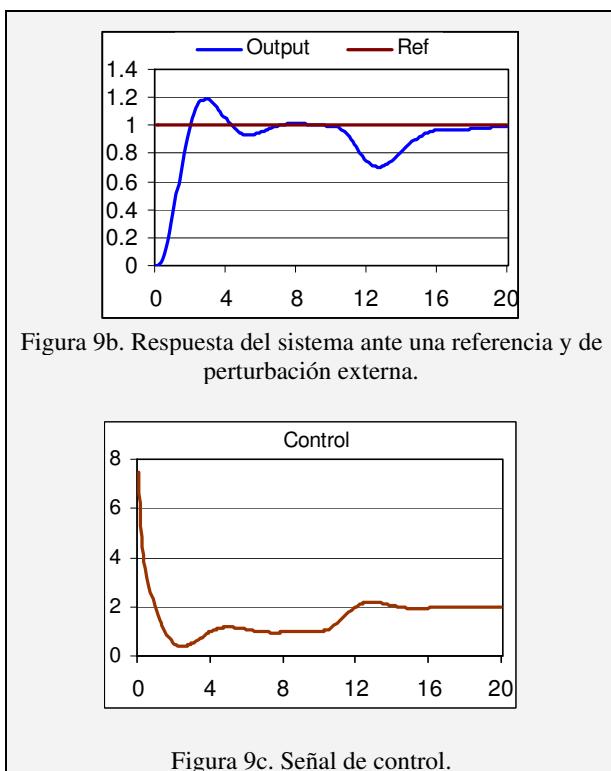


Figura 9b. Respuesta del sistema ante una referencia y de perturbación externa.

Figura 9c. Señal de control.

6. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

En este artículo se ha presentado COCT, una herramienta para el análisis y diseño de sistemas de control basada en hojas de cálculo Excel. En la actualidad, COCT está limitada al manejo de los sistemas lineales representados mediante la función de transferencia. En el entorno de COCT, el usuario puede especificar modelos, obtener sus respuestas transitorias y en frecuencia, simular un control en lazo cerrado, ajustar los parámetros de un controlador de forma interactiva, etc. El entorno COCT es interactivo y permite mantener varias simulaciones en una misma hoja de cálculo. Además, el usuario puede combinar sus simulaciones con los recursos convencionales de Excel como la utilización de fórmulas o la integración de los controles como las barras de desplazamiento, mejorando de forma sustancial el marco de trabajo. COCT es un libro de Excel cuyo uso no requiere ningún software específico, y su manejo es similar al uso convencional de las hojas de cálculo.

Como toda herramienta nueva, COCT tiene sus limitaciones como son el uso exclusivo de la función de transferencia para representar los sistemas dinámicos o la imposibilidad de manejar sistemas con retardos. Estas limitaciones se irán solventando en futuras versiones. Por otra parte, COCT presenta varias posibilidades de extensión, y actualmente, estamos utilizando el entorno COCT en combinación con las diversas funcionalidades de Excel para diseñar módulos interactivos para la enseñanza de control automático. Estamos, igualmente, contemplando la posibilidad de ampliar el entorno COCT para la adquisición de datos y el control de sistemas en tiempo real.

REFERENCIAS

Chehab, A., y A. El-Hajj, (2004). Spreadsheet Applications in Electrical Engineering: A Review, *Int. J. of Eng. Educ.*, **20(6)**, 902-908.

- Aliane, N. (2008), Spreadsheet-Based Control-System Analysis and Design, *IEEE Control System Magazine*, **28(5)**, 108-113
- Craig T. C., (2006). *Engineering with the Spreadsheet: Structural Engineering Templates Using Excel*, American Society of Civil Engineers -ASCE Press.
- David, M. B., (2006). *Excel Scientific and Engineering Cookbook*, 1st edition, O'Reilly.
- Dormido, S., (2005). The Role of Interactivity in Control Learning, *Int. J. of Eng. Educ.*, **21(6)**, 1122-1133.
- El-Hadj, A., K. Y. Kabalan y S. Khouri, (2000). A Linear Control System Simulation Toolbox Using Spreadsheets. *IEEE Control Systems Magazine*, **20(6)**, 8-14.
- El-Hadj, A., S. Karaki And K. Kabalan, (2002). Graphical Simulation of an Analogue Computer Using Spreadsheets, *Int. J. of Eng. Educ.*, **18(6)**, 704-710.
- El-Hadj, A., S. Karaki y K. Y. Kabalan, (2003). Digital Control Systems Simulation Using Spreadsheets. *Journal of Computer Applic. in Eng. Educ.*, **11(1)**, 6-12.
- El-Hadj, A., S. Karaki y Y. K. Karim, (2001). A Nonlinear Control System Simulation Toolbox Using Spreadsheets. *Proc. of International Conference on Modelling and Simulation*, Pittsburgh, U.S.A, 83-87.
- Ferreira E. F, R. Lima & R. Salcedo, (2004). Spreadsheets in Chemical Engineering Education: Tool in Process Design and Process Integration, *Int. J. of Eng. Educ.*, **20(6)**, 928-938.
- Foster K. R, (1998). Software tools: Technology 1998 analysis and forecast, *IEEE Spectrum*, **35(1)**, 52-66,
- Gottfried, B.S., (2005). *Spreadsheet Tools for Engineers using Excel*, 3rd edition, McGraw-Hill.
- Guzmán J. L., K. J. Åström, S. Dormido, T. Hägglund, y Y. Piguet, (2008). Interactive learning modules for PID control, *IEEE Control System Magazine*, **28(5)**, pp. 118-134.
- Johansson, M., Gåfvert, M., Åström, K. J, (1998). Interactive Tools for Education in Automatic Control, *IEEE Control Systems Magazine*, **18(3)**, pp. 33-40.
- Levie, R., (2001). *How to Use Excel in Analytical Chemistry and in General Scientific Data Analysis*, University Press, Cambridge.
- Oke, S. A., (2004). Spreadsheet Applications in Engineering Education: A Review, *Int. J. of Eng. Educ.*, **20(6)**, 893-901.
- Rives C. y Lacks D. J., (2002). Teaching process control with a numerical approach based on spreadsheets, *Chemical Eng. Educ.*, **36(3)**, 242-248.
- Schumack, M, (2004). Use of a Spreadsheet Package to Demonstrate Fundamentals of Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer", *Int. J. of Eng. Educ.*, **20(6)**, 974-983.
- Silva, A. A., (1994). Simulating electrical circuits with an electronic spreadsheet, *Computers and Education*, **22(4)**, 345-353.
- Webb, J. and S. Saunders, (2006). *Programming Excel with VBA and .NET*, O'Reilly.
- Wittenmark, B., B. Häglund y H. M. Johansson, (1998). Dynamic Pictures and Interactive Learning, *IEEE Control Systems Magazine*, **18(3)**, 26-32.
- Xu W., Y. Liu, D. Koval, y M. A. Lipsett, (1999). Using Spreadsheet Software as a Platform for Power System Analysis, *IEEE Computer Applications in Power*, **12(4)**, 41-45.