

# Herramienta para el aprendizaje por proyectos en la enseñanza de la identificación y control de sistemas dinámicos

Carlos F. Rengifo, *Member, IEEE*, and Diego A. Bravo, *Member, IEEE*

**Resumen**—This paper presents a teaching tool for modeling and control of dynamical systems using the project-based learning approach. This approach allows engineering and basic science students, develop skills in programming, electronic design, using fundamental physics to model and control complex dynamic systems. The tool consists of a code generator that automatically writes a program for the Arduino board in order to obtain the mathematical model of the dynamic system from experimental data and implement a suitable controller. This tool was tested in the course of Identification and simulation of Systems, of the Universidad del Cauca, proving to be a quick and easy tool for students learning program in Industrial Automation Engineering.

**Index Terms**—Control, Dynamics Systems, System Identification, Project-based learning.

## I. INTRODUCCIÓN

El modelado de un sistema dinámico es el proceso mediante el cual se representa un sistema real utilizando leyes físicas, generalmente esta descrito mediante ecuaciones diferenciales cuyos coeficientes se a sumen c onocidos, [ 1]. E l d iseño de experimentos para medir estos coeficientes e s d ispendioso y requiere de gran experiencia, [2].

En muchos casos en el diseño de sistemas de control es más difícil modelar el sistema dinámico que diseñar el controlador, se puede diseñar un excelente controlador y obtener muy buenos resultados en la simulación por computador, pero si el modelo con el que se trabajando no representa adecuadamente al sistema, los resultados obtenidos no serán satisfactorios. La identificación p ermite construir representaciones matemáticas de sistemas dinámicos a partir de datos experimentales, tales representaciones pueden ser *no-parámétricas* como la respuesta al impulso y la respuesta en frecuencia, o *parámétricas* como los coeficientes d e un modelo matemático, [3].

Por otra parte, los problemas actuales de las ciencias básicas y la ingeniería exigen una educación que permita a los futuros profesionales desarrollar habilidades en distintas disciplinas que incluyen la física, la teoría de control y la programación como herramientas fundamentales que

permitirán abordar y generar soluciones a estos desafíos, [4].

El Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) es una estrategia activa de educación que además de preocuparse por encontrar la solución de un problema, también busca el desarrollo de habilidades de los estudiantes durante el proceso de aprendizaje y promueve el uso de las Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC's). Para el ABP es importante además de solucionar problemas, estar en capacidad de enfrentarse a tareas complejas, [5].

En [6] se discute sobre el presente y futuro de los laboratorios virtuales y remotos (VRLs) para la enseñanza y práctica de la teoría de control. Los VRLs están diseñados para experimentos interactivos, los estudiantes pueden monitorear y controlar las variables físicas mediante interfaces gráficas de usuario, el hardware (controlador, planta, sensores, acondicionadores de señal y tarjeta de adquisición de datos) no es interconectado ni manipulado por los estudiantes. En nuestro ejercicio en la docencia de sistemas de control e identificación de sistemas dinámicos entendemos que el estudiante debe adquirir estas competencias en el manejo del hardware y software para desarrollar habilidades que les permitan enfrentarse al mundo laboral.

Dentro de este contexto, el curso de *Identificación y Simulación de Sistemas* se presenta como una excelente oportunidad para integrar las destrezas adquiridas por los estudiantes en materias como física, programación y teoría de control con el propósito de diseñar, modelar, simular y controlar sistemas dinámicos. Para lograr este objetivo, se desarrollo una herramienta software que permite modelar y controlar sistemas dinámicos a partir de un generador de código software para la tarjeta electrónica Arduino. En el artículo [7], se describe una herramienta para la implementación de controladores digitales. Sin embargo esta no permite el modelado del sistema dinámico a controlar, siendo esta la diferencia principal de nuestra herramienta en comparación con otros trabajos, [8], [9].

El trabajo presentado en este artículo describe el uso de la herramienta con un caso de estudio (circuito eléctrico), el software desarrollado permite generar señales de prueba para el sistema, además de implementar en hardware el controlador apropiado. Se muestra una metodología para la enseñanza del modelado y control de sistemas dinámicos a partir de datos experimentales.

Carlos F. Rengifo trabaja en el Departamento de Electrónica Instrumentación y Control de la Universidad del Cauca, Colombia. e-mail: cafe-ren@unicauca.edu.co

Diego A. Bravo trabaja en el Departamento de Física de la Universidad del Cauca, Colombia. e-mail: dibravo@unicauca.edu.co

Manuscrito recibido en Julio 30, 2019; revisado Agosto 30, 2019.

La aplicación de esta herramienta en la enseñanza del modelado de sistemas dinámicos, que se destacan por tener una gran abstracción matemática que algunas veces dificulta el aprendizaje de algunos estudiantes, demostró ser de gran ayuda en la comprensión del modelado y control de sistemas. Este documento está estructurado de la siguiente manera: la sección II describe la metodología usada para encontrar el modelo matemático a partir de datos experimentales y el caso de estudio, la descripción y funcionamiento de la herramienta se escribe en la sección III. Finalmente se presentan los resultados en la sección IV y se concluye el artículo en la sección V.

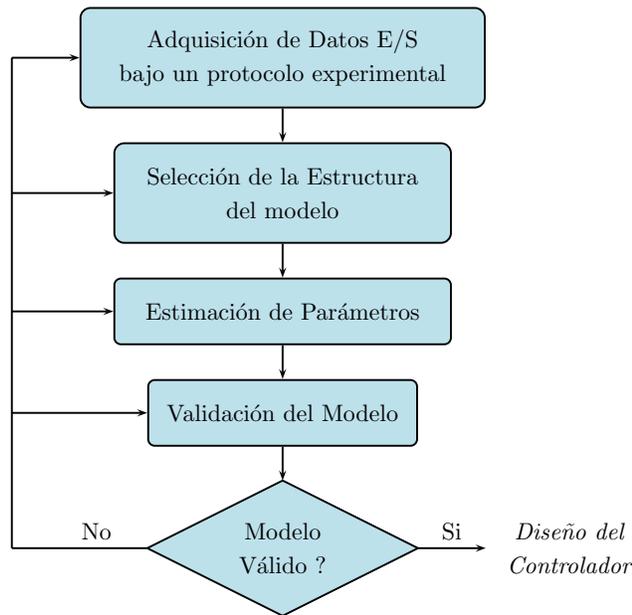


Figura 1. Metodología para la Identificación de Sistemas

## II. METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

La identificación de sistemas es una aproximación experimental para determinar el modelo dinámico de un sistema, que incluye cuatro pasos, [3]:

1. Adquisición de datos entrada-salida mediante un protocolo experimental.
2. Selección de la estructura del modelo.
3. Estimación de los parámetros del modelo.
4. Validación del modelo identificado (estructura y valores de los parámetros).

Un experimento de identificación necesita la comprensión de los cuatro pasos anteriores. Los métodos específicos utilizados en cada etapa dependen del tipo de modelo deseado (parámetrotrico o no parámetrotrico, de tiempo continuo o tiempo discreto) y de las condiciones experimentales (por ejemplo: hipótesis sobre el ruido, identificación en lazo cerrado o abierto). La validación es el paso obligatorio para decidir si el modelo identificado es aceptado o rechazado.

No existe un único algoritmo de estimación de parámetros y un único protocolo experimental que siempre entregue un buen modelo a partir de identificación. Además, los modelos obtenidos no siempre pasan las pruebas de validación. En este caso, es necesario reconsiderar los algoritmos de estimación, la complejidad (estructura) del modelo o las condiciones experimentales. La identificación de sistemas debe ser considerado como un procedimiento iterativo como el de la Figura 1.

Con el fin de obtener un buen modelo identificado, la señal de excitación (aplicada a la entrada del sistema) debe contener un amplio espectro de frecuencias. Esta señal debe ser superpuesta a la señal de control en estado estable correspondiente al punto de operación alrededor del cual se desea identificar el modelo del sistema.

Como regla general, se usa una señal SBPA (secuencia binaria pseudo aleatoria) con una magnitud pequeña. Un estudio detallado de las distintas señales de prueba utilizadas en identificación de sistemas dinámicos, se presenta en [10]. La adquisición de datos es hecha generalmente en un banco de pruebas, usando un computador con una tarjeta de adquisición de datos de entrada y salida E/S, en este caso utilizamos la tarjeta Arduino UNO.

### II-A. Caso de Estudio

El curso de *identificación y simulación de sistemas* de la Universidad del Cauca se desarrolla en un semestre de 16 semanas, tiene cuatro créditos académicos (En Colombia, un crédito académico = 48 horas de trabajo para el estudiante). Es un curso teórico-práctico, donde la teoría es afianzada con el desarrollo de proyectos para experimentos de identificación de sistemas dinámicos.

Con el fin de ilustrar los pasos que requiere la aplicación para generar el modelo matemático que representa al sistema dinámico, se utilizará como caso de estudio el circuito eléctrico presentado en la Figura 2.

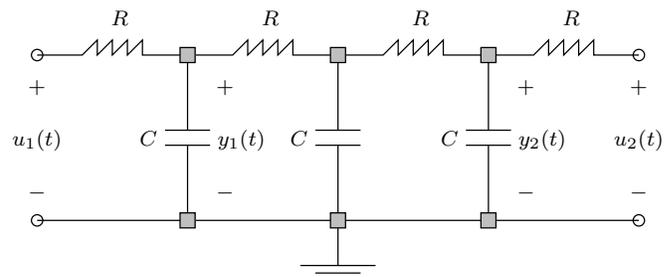


Figura 2. Sistema a identificar y controlar.

El objetivo de la herramienta es obtener el modelo matemático del circuito eléctrico ilustrado en la Figura 2 a partir de las señales  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ ,  $y_1(t)$  y  $y_2(t)$ . Una

vez obtenido este modelo se diseñará e implementará un controlador que permita que las señales de salida  $y_1(t)$  y  $y_2(t)$  sigan señales de referencia tipo escalón.

El modelo matemático en espacio de estados puede calcularse a partir de las leyes de kirchhoff, [11].

Ecuación de Estado:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-2}{RC} & 0 & \frac{1}{RC} \\ 0 & \frac{-2}{RC} & \frac{1}{RC} \\ \frac{1}{RC} & \frac{1}{RC} & \frac{-2}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & \frac{1}{RC} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ecuación de salida:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Aunque es deseable tener las ecuaciones (1) y (2), la identificación permite obtener el modelo matemático (numérico) que representa al sistema real entorno a un punto de operación. En la siguiente sección se explicará en detalle cada uno de los pasos descritos para utilizar la herramienta.

### III. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA

La herramienta desarrollada permite modelar cualquier sistema dinámico donde las señales de entrada y salida puedan ser medidas con la tarjeta electrónica Arduino. En el caso de un sistema mecánico, este debe tener sensores y actuadores de tipo electrónico para interfazar las señales de entrada-salida a la tarjeta.

Para utilizar la herramienta el usuario debe seguir los siguientes pasos:

1. Configuración del puerto de comunicación.
2. Generación de datos de entrada-salida.
3. Estimación de los parámetros del modelo del sistema dinámico.
4. Validación del modelo.
5. Diseño e implementación del controlador.

Para utilizar la herramienta software se requieren los siguientes elementos: (i) el circuito presentado en la Figura 2, (ii) una tarjeta Arduino con conversores analógico-digital y salidas PWM (Pulse Width Modulation) (iii) un computador con Matlab 2009a o superior y (iv) El software suministrado por el docente para realizar la practica.

#### III-A. Configuración del puerto de comunicación

En la Figura 3 se presenta el diagrama de conexión entre la tarjeta Arduino, el circuito eléctrico y el computador.

Para configurar el puerto de comunicación, se debe garantizar que Matlab y la tarjeta Arduino utilicen el mismo puerto serial.

#### III-B. Generación de datos de entrada-salida

En la Figura 4 se presentan las señales de entrada al circuito de la Figura 2. Durante los primeros 5 segundos las señales de entrada toman un valor constante de 2,5 voltios. Este intervalo de tiempo es suficiente para que la planta alcance el estado estacionario. Al cabo de estos 5 segundos se adiciona una extra-señal a cada una de las señales constantes de 2,5 voltios. Cada extra-señal toma de manera aleatoria uno de dos valores: 0,5 ó -0,5 voltios (ambos valores tiene una probabilidad del 50 %). La amplitud de las extra-señales se actualiza cada 50 ms.

Debe tenerse presente que la tarjeta Arduino considerada en esta practica solo puede generar señales PWM de 5 voltios. Así, si por ejemplo el ciclo de trabajo de la señal PWM se configura en el 80 %, el voltaje promedio de salida será  $0,8 \times 5 = 4$  voltios. Para obtener la señal presentada en la Figura 4 el ciclo de trabajo debe fijarse al 50 % durante los primeros 5 segundos y posteriormente dicho ciclo debe tomar un valor bien sea del 40 % (2 voltios) o del 60 % (3 voltios).

Para generar una señal PWM con una tarjeta Arduino se utiliza la función `analogWrite`. Esta función recibe dos argumentos de entrada. El primero es el pin PWM que se desea configurar, en nuestro caso el pin 9 para  $u_1(t)$  y el pin 10 para  $u_2(t)$ , y el segundo el ancho del pulso expresado como un numero entre 0 y 255. El siguiente fragmento de código en C muestra las sentencias utilizadas para generar  $u_1(t)$  y  $u_2(t)$  con  $t \geq 5$ .

```
U1 = 255 * (Offset + 0.1*sign(random(-100,100)));
U2 = 255 * (Offset + 0.1*sign(random(-100,100)));
```

La función `random` genera un número aleatorio entre -100 y 100 con distribución probabilística uniforme. La función `sign` retorna +1 o -1 dependiendo del signo del numero entregado por `random`. La constante `Offset` se fija en 0,5 para que la variables U1 y U2 tomen o bien el valor 153 ( $255 \times 0,6$ ) o bien 102 ( $255 \times 0,4$ ).

#### III-C. Estimación de los parámetros del modelo

En esta parte se utilizan los datos generados en la sección anterior con el fin de obtener un modelo en espacio de estados del circuito eléctrico de la Figura 2. Dicho modelo se supondrá de la forma:

$$\begin{aligned} x(kh + h) &= A x(kh) + B u(kh) + K e(kh) \\ y(kh) &= C x(kh) + D u(kh) + e(kh) \end{aligned} \quad (3)$$

Donde  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  son matrices en espacio de estados,  $K$  es la matriz de perturbaciones o disturbios,  $u(kh)$  y  $y(kh)$  la entrada y la salida respectivamente,  $X(kh)$  es el vector de estados y  $e(kh)$  la perturbación para un periodo de muestreo  $h$ .

La validación del modelo y el diseño e implementación del controlador hacen parte de la sección IV.

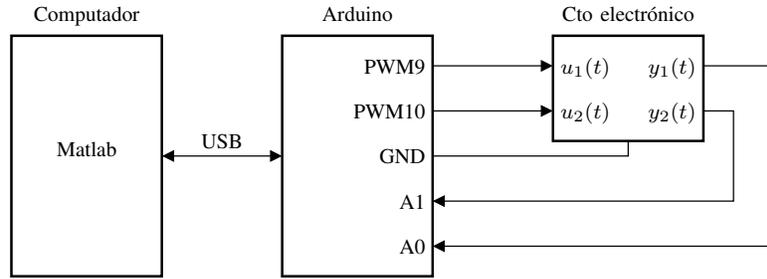


Figura 3. Diagrama en bloques que indica la conexión entre la tarjeta Arduino, el circuito eléctrico y el computador.

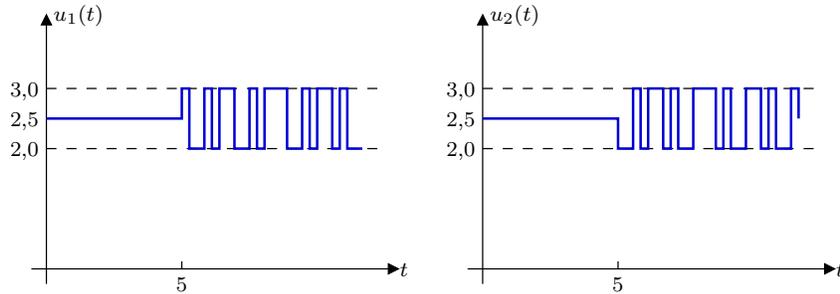


Figura 4. Señales de entrada utilizada para generar los datos de entrada-salida.

#### IV. RESULTADOS

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos con la herramienta. La generación de datos entrada salida, se muestra en la Figura 5.

Los coeficientes del modelo obtenido dependen de los datos adquiridos, en este caso las matrices de estado calculadas por el programa escrito en la sección III-C son:

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} 0,67166 & -0,013758 & -0,046408 \\ -0,0259 & 0,36362 & 0,0056997 \\ -0,71218 & 0,037861 & 0,2232 \end{bmatrix} \\
 B &= \begin{bmatrix} 0,021326 & 0,025451 \\ -0,044938 & 0,041032 \\ 0,032256 & 0,03481 \end{bmatrix} \\
 C &= \begin{bmatrix} 6,4153 & -4,0166 & 0,35583 \\ 7,0483 & 3,3708 & 0,3756 \end{bmatrix} \\
 D &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 E &= \begin{bmatrix} 0,010902 & -0,0084566 \\ -0,0013574 & 0,0048517 \\ 0,14614 & -0,41494 \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

#### Validación del modelo

Cuando se desarrolla un experimento de identificación el objetivo es obtener un modelo con el cual representar un sistema dinámico particular. Una vez obtenida esta representación la fase siguiente es la validación, es decir conocer que tan bueno es el modelo. La fase de validación es

la evaluación de la concordancia entre los datos observados y el modelo.

En la Figura 6 se presenta el nivel de ajuste entre los datos medidos y el modelo.

Se observa una concordancia del 95% entre la salida predicha por el modelo y los datos medidos. Otra forma de validación de un modelo paramétrico se puede hacer mediante el análisis de los residuos, es decir aquellas componentes de los datos que no pueden ser explicadas por el modelo. De acuerdo con los criterios de prueba de ruido blanco, un buen modelo tiene la función de auto-correlación residual dentro del intervalo de confianza de las estimaciones correspondientes, indicando que los residuos no están correlacionados, [3]. La Figura 7 comprueban que se cumple con el test de ruido blanco, entonces la parte determinista del modelo dinámico es válida.

Una vez es el modelo es válido, es posible diseñar un controlador apropiado, como lo indica la Figura 1 de la sección II.

#### Diseño e implementación del controlador

En esta parte, el objetivo es diseñar un controlador para el sistema dinámico modelado a partir de datos experimentales. El usuario de la herramienta debe especificar la función de transferencia en lazo cerrado deseada  $G_{cl}$  para diseñar el controlador. Para el sistema a controlar se escogió la siguiente función de transferencia en lazo cerrado:

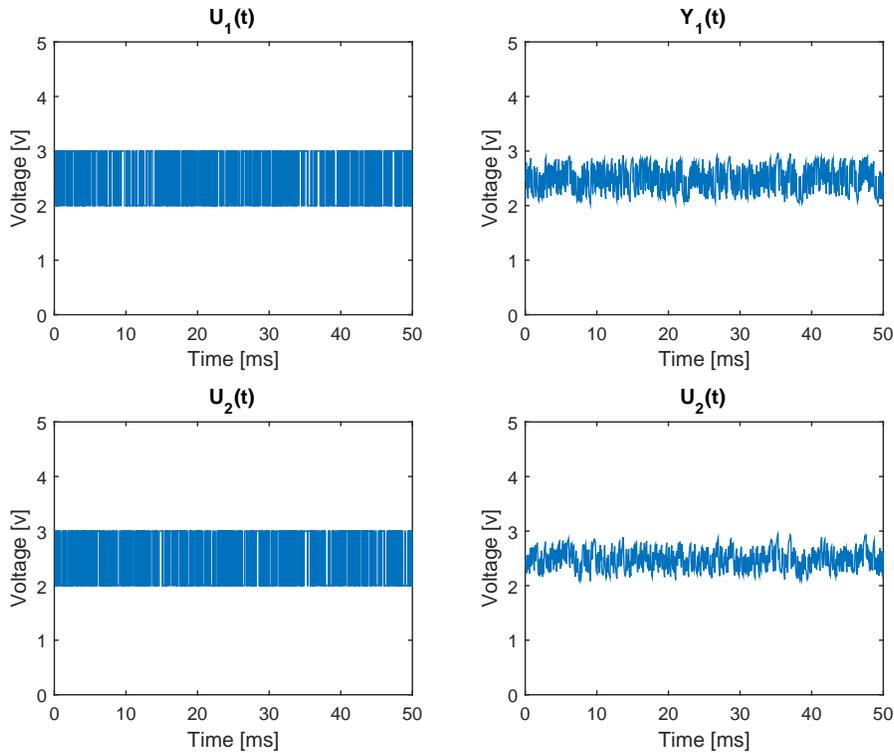


Figura 5. Señales Entrada-Salida generadas y medidas por la tarjeta Arduino.

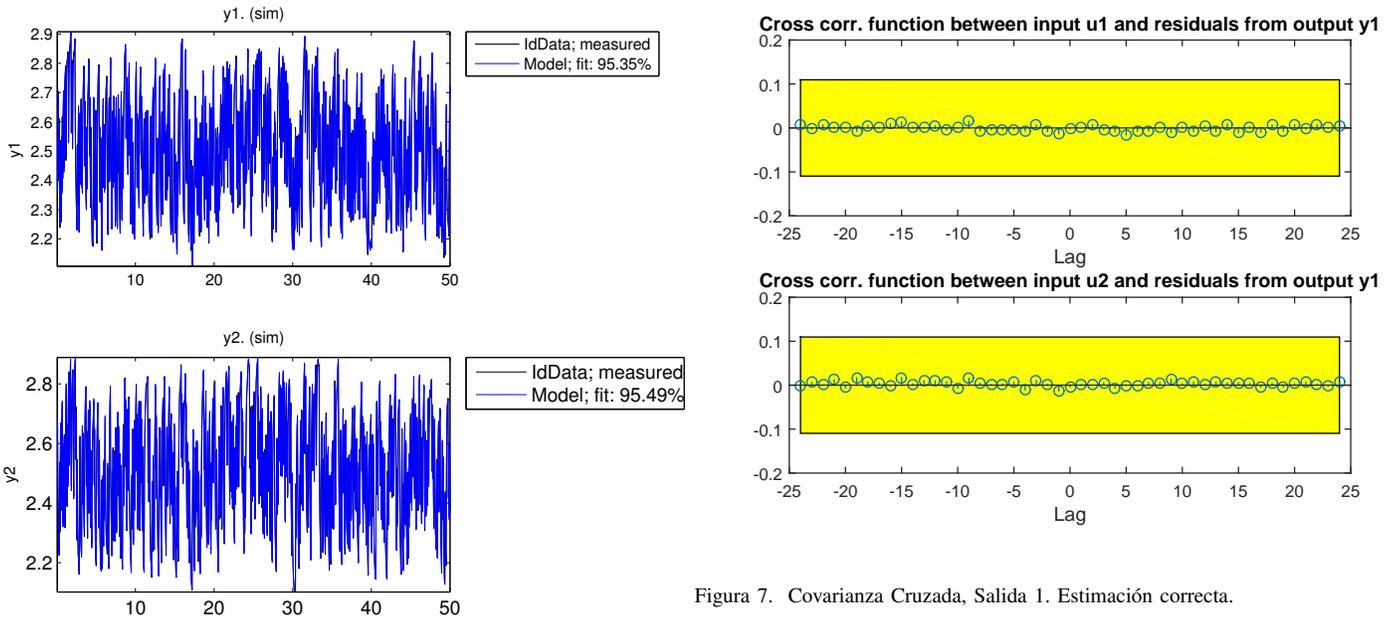


Figura 6. Ajuste entre los datos medidos y el modelo en espacio de estados obtenido.

Figura 7. Covarianza Cruzada, Salida 1. Estimación correcta.

El modelo del controlador  $G_c$  se puede calcular usando la ecuación (6), [12].

$$G_c(z) = G(z)^{-1} G_{cl}(z) [I - G_{cl}(z)]^{-1} \quad (6)$$

Donde  $G(z)$  es la función de transferencia del modelo (4), la variable  $z$  significa que los modelos son de tiempo

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{0,5s + 1} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1(s) \\ r_2(s) \end{bmatrix} \quad (5)$$

discreto,  $I$  representa una matriz identidad de  $2 \times 2$ .

La herramienta dispone de una función que genera una implementación en lenguaje C del controlador obtenido en el paso precedente, la realización implementada en esta función es una *realización serie*, [13].

La respuesta del controlador implementado se puede apreciar en la Figura 9. Se observa el desacople entre las referencias  $r_1(t)$  y  $r_2(t)$  introducidas en la función de transferencia en lazo cerrado deseada, (5). La referencia  $r_1(t)$  no afecta la salida  $y_2(t)$  y viceversa.

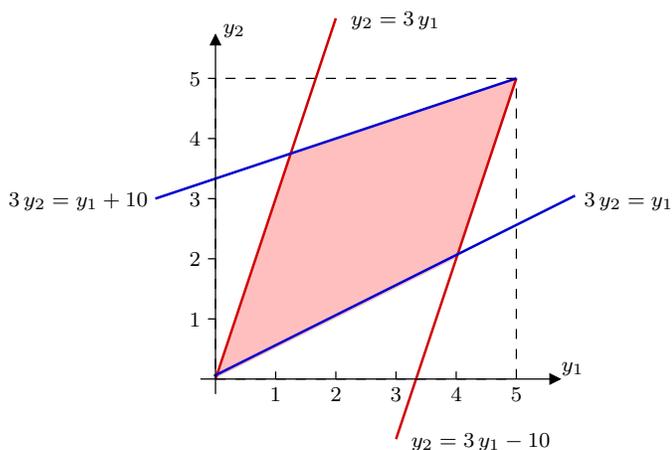


Figura 8. Valores alcanzables en estado estacionario por las salidas  $y_1(t)$  y  $y_2(t)$  cuando las señales de control  $u_1(t)$  y  $u_2(t)$  están restringidas al rango  $[0, 5]$  voltios.

Se observa que cuando las señales de referencia  $r_1(t)$  y  $r_2(t)$  se encuentran dentro del polígono presentado en la Figura 8, la salida  $y_1(t)$  seguirá la referencia  $r_1(t)$  y la salida  $y_2(t)$  la referencia  $r_2(t)$ . Si el par  $(r_1, r_2)$  sale del polígono, al menos uno de los dos actuadores estará saturado y las salidas no podrán seguir las señales de consigna. Este es el caso si por ejemplo se selecciona  $r_1(t) = 5 \text{ V}$  y  $r_2(t) = 0 \text{ V}$ .

Para presentar a los estudiantes la aplicación de las ecuaciones (3) y(6), (modelo dinámico y controlador respectivamente); se elaboró una guía donde después de una breve introducción teórica, se aplica, a manera de ejemplo, la secuencia de pasos descrita en la sección II al modelado y control del sistema dinámico presentado en la Figuras 2. . El objetivo, de este ejercicio es que los estudiantes relacionen la teoría con la práctica mediante la solución de un problema real, tratando de desarrollar un ambiente de aprendizaje basado en proyectos que promueva el desarrollo de competencias transversales para enfrentar el desánimo generalizado de los estudiantes de ingeniería por el aprendizaje de la física, teoría de control, programación y electrónica, atribuida en parte, a la des-articulación entre la enseñanza de estas disciplinas con el propósito mismo de su formación profesional, [14].

TABLA I  
PREGUNTAS DE EVALUACIÓN DE LA HERRAMIENTA

Preguntas
P1: ¿Considera usted que la guía suministrada por el docente para realizar la práctica de laboratorio es suficientemente clara?
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ SI</li> <li>▪ NO</li> </ul>
P2: ¿Cuál de las siguientes actividades describe mejor el propósito de la práctica realizada?
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dar a conocer la plataforma Arduino</li> <li>▪ Implementar un controlador de tiempo discreto</li> <li>▪ Modelar un sistema dinámico a partir de datos experimentales para controlarlo</li> <li>▪ Estudiar el comportamiento de circuitos eléctricos resistivo</li> <li>▪ Conocer un sistema de adquisición y despliegue de datos en Matlab</li> </ul>
P3: ¿Cuál fue su nivel de motivación durante la realización de la práctica laboratorio?
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Muy bajo (moría del aburrimiento): 1 <sup>1</sup></li> <li>▪ Muy alto (me pareció interesante): 5</li> </ul>
P4: ¿Cómo considera usted que fue el aporte de la práctica de laboratorio realizada a su aprendizaje sobre identificación de sistemas dinámicos?
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No me aportó: 1</li> <li>▪ Fue muy importante para mi aprendizaje: 5</li> </ul>
P5: ¿Considera usted que podría aplicar lo aprendido en la práctica de laboratorio a otro sistema dinámico distinto de un circuito eléctrico, por ejemplo un motor de DC?
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Difícilmente: 1</li> <li>▪ Fácilmente: 5</li> </ul>

### Evaluación de la Herramienta

Con el fin de evaluar la usabilidad de la herramienta software [15], se diseñó e implementó una encuesta (Tabla I) con cinco preguntas que permitieron concluir que es una herramienta de fácil y rápido aprendizaje por los estudiantes del programa de Ingeniería en Automática Industrial. La muestra utilizada fue de 40 estudiantes matriculados en el curso de *Identificación y simulación de sistemas*, a continuación se muestran los resultados.

La Figura 10 muestra los resultados en diagramas de barras y pastel de las respuestas a las preguntas 1 al 4. Se observa un alto porcentaje de estudiantes motivados al realizar la práctica, además de que la guía para utilizar la herramienta es bastante clara y el propósito de la misma que es identificar y controlar sistemas dinámicos fue bien interpretado por un alto número de estudiantes (68%), un (60%) de los estudiantes estaba muy motivado al momento de utilizar la herramienta en el experimento de identificación. También se evidencia que un alto porcentaje de estudiantes considera que la herramienta es importante para su formación profesional.

Los resultados a la pregunta (P5) se presentan en la Tabla II, un 40% de los estudiantes encuestados piensa que es fácilmente adaptar la herramienta para la identificación de sistemas dinámicos más complejos, como por ejemplo la identificación de un motor de corriente continua.

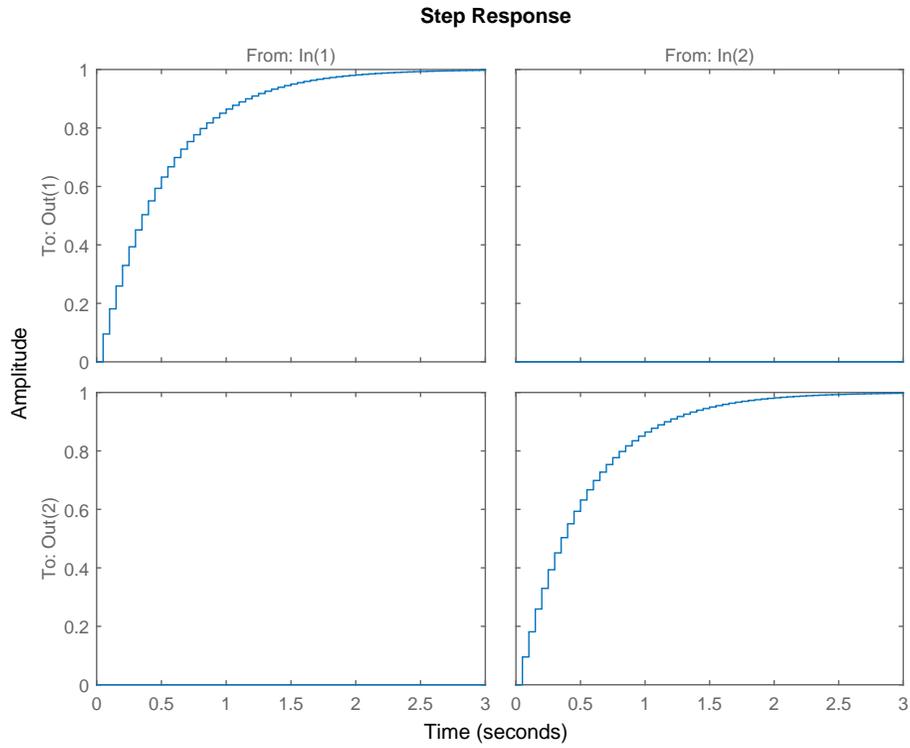


Figura 9. Respuesta al escalón del sistema dinámico con el controlador implementado.

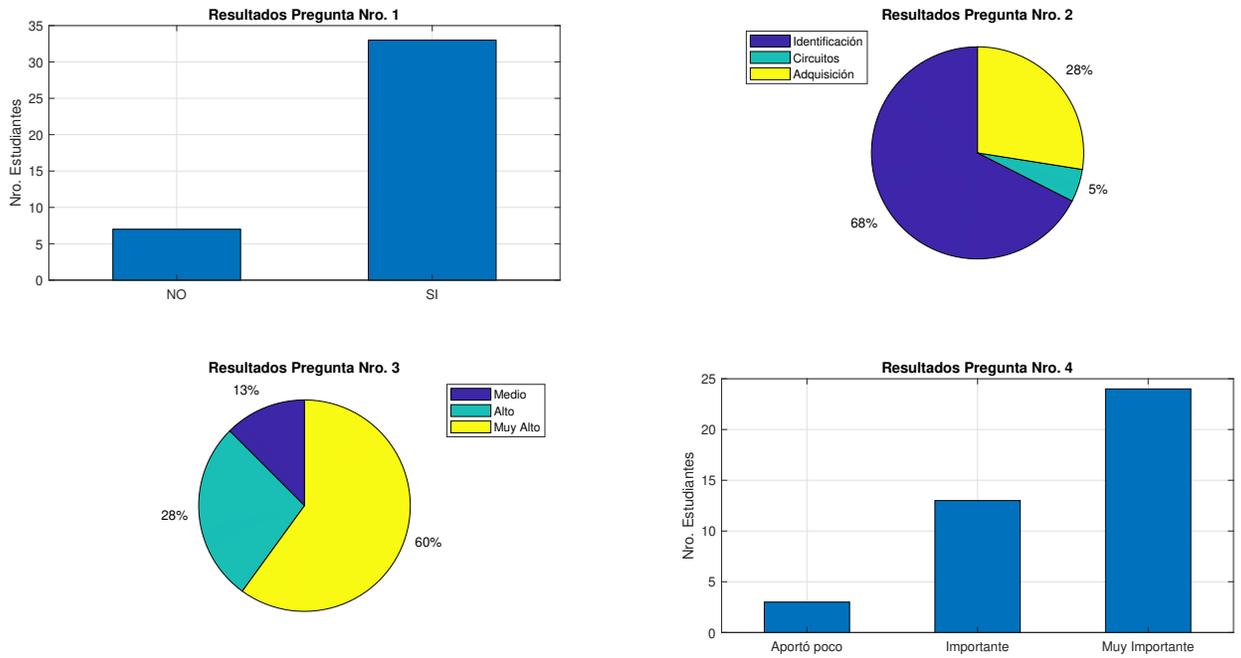


Figura 10. Resultados a las preguntas 1, 2, 3 y 4.

## V. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En el caso de la formación de ingenieros en Automática, el modelado y control de sistemas dinámicos es una competencia

TABLA II  
RESULTADOS PREGUNTA 5

Descripción	No.	%
Difícilmente:	1	5 %
	2	0 %
	3	27.5 %
	4	27.5 %
Fácilmente:	5	40 %

muy importante a ser desarrollada por parte de los futuros profesionales. La herramienta desarrollada permite modelar sistemas dinámicos a partir de datos experimentales e implementar un control apropiado en una arquitectura digital open-source como la tarjeta electrónica Arduino.

El objetivo de identificar un sistema es formarse una idea de su comportamiento dinámico, el diseño de un controlador nunca debe partir de: "Se tiene un modelo matemático perfecto del sistema", siempre debe considerarse la incertidumbre asociada con los valores de los coeficientes del modelo-Incertidumbre estructurada- y la incertidumbre asociada con las dinámicas No modeladas -Incertidumbre No Estructurada-, [16].

Un gran porcentaje de estudiantes consideró que la herramienta es de fácil aprendizaje e importante para su formación profesional.

En perspectiva se tiene implementar una interfaz gráfica que permita al usuario introducir la función de transferencia en lazo cerrado deseada. Adicionalmente se están estudiando algoritmos para permitir el modelado de sistemas dinámicos no-lineales.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo expresan sus más sinceros agradecimientos a la Universidad del Cauca por todo el apoyo que les fue dado en la realización del proyecto.

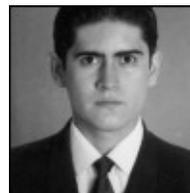
#### REFERENCIAS

- [1] L. Ljung and T. Glad, *Modeling of Dynamic Systems*, ser. Prentice-Hall information and system sciences series. PTR Prentice Hall, 1994.
- [2] D. A. Bravo, "Modelado de sistemas dinámicos a partir de datos experimentales," *Revista Colombiana de Física*, vol. 40, no. 2, pp. 411–413, Julio 2008.
- [3] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*, ser. Prentice-Hall information and system sciences series. Prentice Hall PTR, 1999.
- [4] D. A. Bravo and C. F. Rengifo, "Herramienta para la enseñanza de las ecuaciones de Lagrange basada en la simulación de sistemas dinámicos," *Revista Mexicana de Física*, vol. 60, no. 2, pp. 111–115, 2014.
- [5] L. Fernández-Samacá, J. M. Ramírez, and M. L. Orozco Gutiérrez, "Project-based learning approach for control system courses," *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, vol. 23, pp. 94 – 107, 02 2012.
- [6] R. Heradio, L. de la Torre, and S. Dormido, "Virtual and remote labs in control education: A survey," *Annual Reviews in Control*, vol. 42, pp. 1 – 10, 2016.
- [7] Y. H. Bolaños, L. F. Pineda, and V. H. Mosquera, "Sistema didáctico para la implementación de controladores digitales," *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, vol. 2, no. 20, 2013.
- [8] A. G. S. P. and W. Francisco, "Simulación de controladores digitales," *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 17, pp. 309 – 316, 12 2009.

- [9] J. P. A. Fajardo, "Desarrollo de un sistema para la implementación de controladores lineales multivariables," Master's thesis, Universidad Nacional De Colombia, 2010.
- [10] D. A. Bravo and E. F. Mejía, "Señales de prueba utilizadas en identificación de sistemas dinámicos," *Revista Colombiana de Física*, vol. 43, no. 3, pp. 696–701, Octubre 2011.
- [11] W. H. Hayt, J. E. Kemmerly, and S. M. Durbin, *Engineering circuit analysis*, 8th ed. McGraw-Hill, 2012.
- [12] I. D. Landau, *Digital Control Systems*. Springer, 2006.
- [13] K. Aström and B. Wittenmark., *Computer Controlled Systems*. Prentice Hall, 1996.
- [14] M. Corchuelo, "Una aproximación a los procesos de formación de ingenieros," *Revista Electrónica de la Red de Investigación Educativa*, vol. 1, pp. 1–22, 2004.
- [15] I. Velásquez and M. Sosa, "La usabilidad del software educativo como potenciador de nuevas formas de pensamiento," *Revista Iberoamericana de educación*, vol. 50, no. 4, p. 3, 2009.
- [16] D. A. Bravo., *Identificación de Sistemas Multivariables*. EAE, 2012.



**Carlos Rengifo** (M'04) recibió su grado como Ingeniero Electricista y Maestría en Automática de la Universidad del Valle en Colombia. En 2010, obtuvo su Doctorado en Ecole Centrale de Nantes en Francia. Actualmente es profesor titular en la Universidad del Cauca (Colombia). Sus intereses de investigación incluyen el modelado y control de robots y sistemas biomecánicos.



**Diego Bravo** (M'18) recibió su grado como Ingeniero Físico de la Universidad del Cauca y de Magíster en Ingeniería de la Universidad del Valle. En el 2016 se graduó de Doctor en la Universidad del Cauca. Actualmente es profesor titular en la Universidad del Cauca (Colombia). Sus intereses de investigación incluyen el modelado y control de sistemas dinámicos e Identificación de sistemas.