

# Sobre el uso de hardware electrónico de bajo costo y la simulación en la enseñanza de sistemas de control

Pedroni, Juan P.<sup>1,2</sup>, Cova, Walter J. D.<sup>2</sup> y Pontelli, Agustín R.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo Robótica y Sistemas Integrados, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

<sup>2</sup>Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional La Rioja, La Rioja, Argentina.

Fecha de recepción del manuscrito: 25/08/2014

Fecha de aceptación del manuscrito: 12/11/2014

Fecha de publicación: 16/03/2015

**Resumen**—Un planteamiento comúnmente formulado por los estudiantes de ingeniería se refiere a la escasez de prácticas experimentales y de laboratorio que sirvan para materializar los conocimientos teóricos adquiridos durante el cursado de las materias. En este trabajo se comparten detalles de las experiencias realizadas a lo largo de algunos años integrando modelos de simulación por computadora y físicos y sistemas de microcontroladores de bajo costo a cursos de grado de sistemas de control en carreras de ingeniería de diversas orientaciones. Se destaca asimismo la importancia de brindar particular atención a los problemas asociados al aprendizaje mediado por la simulación en la realización de los trabajos prácticos.

**Palabras clave**— Simulación, Sistemas de Control, Hardware-in-the-loop.

**Abstract**—A common complaint among engineering grade students is the lack of experimental and laboratory practices that help materializing the theoretical knowledge acquired during regular courses. This paper shares the experience attained over several years by integrating computer and physical simulation models and low-cost microcontrollers for control system grade-level courses among different careers, each with a different orientation. It is also stressed the importance of paying special attention to the problems associated with learning mediated by simulation in the realization of practices.

**Keywords**— Simulation, Control Systems, Hardware-in-the-loop.

## INTRODUCCIÓN

Un planteo común entre los estudiantes de las distintas carreras de ingeniería del interior del país es la falta de trabajos prácticos de laboratorio en los que se materialicen los conocimientos teóricos adquiridos durante el dictado de las materias. Puntualmente, la experiencia es clave para comprender fenómenos propios de los sistemas realimentados. Por otra parte, la situación económica de las universidades públicas en Argentina y las dificultades encontradas al momento de importar equipamiento no siempre permiten montar o mantener un laboratorio con la tecnología adecuada, por lo que muchas veces los docentes deben recurrir a su ingenio para utilizar los recursos disponibles, siempre tratando que el alumno no pierda de vista el concepto que se intenta transmitir, atoisgado por un sinfín de variables y detalles que son propios a las aplicaciones prácticas.

El objetivo de este trabajo es compartir las experiencias adquiridas a lo largo de tres años de trabajo integrando

tecnología de bajo costo al dictado de materias del área de Sistemas de Control para diferentes especialidades de Ingeniería en tres universidades del interior del país. La formación e intereses de los alumnos participantes son en consecuencia muy heterogéneos, lo que ha contribuido a generalizar los alcances de la experiencia realizada.

El presente trabajo se organiza de la siguiente manera: en la Sección II se describe la problemática detectada, mientras que en la Sección III se detallan las soluciones propuestas. Seguidamente, en la Sección IV se comenta la aplicación de las soluciones a los distintos cursos de Sistemas de Control de las carreras mencionadas. En la Sección V se comentan algunos aspectos atinentes al uso de la simulación en la enseñanza. La Sección VI expone las conclusiones alcanzadas.

## PLANTEO DE LA PROBLEMÁTICA

La importancia de las prácticas de laboratorio para fijar los conocimientos teóricos relacionados con cualquier materia aplicativa de las carreras de ingeniería es innegable. El alumno debe ser preparado para enfrentar los desafíos de la práctica profesional, llevando los modelos, teorías y sistemas idealizados de la literatura al complejo mundo real. En ese sentido, es importante que el cuerpo docente acorte

Dirección de contacto:

Juan Pablo Pedroni, Avenida Vélez Sarsfield 1611 Ciudad Universitaria, X5016 CGA, Tel +54 351 4858117, jppedroni@gmail.com

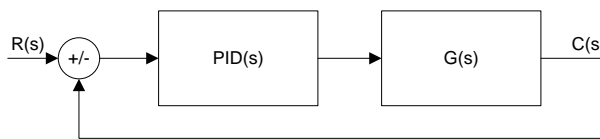
tanto como sea posible las diferencias entre teoría y práctica, para lo cual se presentan dos alternativas igualmente válidas: la simulación en computadora y la práctica en laboratorio.

La simulación en computadora es en esencia la alternativa más económica y simple. Existen en la actualidad paquetes de software (algunos de ellos de licencia libre) con capacidad suficiente para simular numéricamente sistemas de alta complejidad. Esta técnica es de aplicación necesaria pero, según la experiencia recogida, insuficiente. A modo de ejemplo, se citan a continuación dos situaciones que se han debido enfrentar con frecuencia: a) el modelo simulado puede ser manipulado para lograr el resultado esperado; b) muchas veces el modelo de simulación puede ser correcto pero los resultados mal interpretados. En la Sección V se profundiza este tema.

La práctica en laboratorio es, sin duda, la mejor alternativa para confrontar teoría y realidad. Lamentablemente, un laboratorio de control con equipamientos didáctico e idóneo no siempre es económicamente viable, por lo que la alternativa del hágalo-usted-mismo debe ser contemplada. Empero este camino puede terminar con el alumno en el extremo opuesto de donde se busca posicionarlo: en vez de concentrarse en lo conceptual, el alumno pierde energía y tiempo intentando poner en marcha un circuito electrónico, o acaba con un modelo no lineal para aplicar conceptos propios de los sistemas lineales. Para empeorar aún más las cosas, los alumnos de sistemas de control de algunas de las carreras, no cuentan al momento del dictado con los conocimientos necesarios como para diseñar un circuito electrónico, poblarlo, verificar su funcionamiento y usarlo en el laboratorio.

**SOLUCIONES PROPUESTAS**

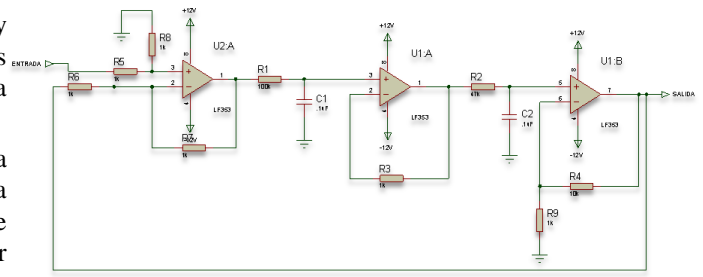
Se plantean dos alternativas de hardware distintas, la primera, completamente analógica; la segunda, de características discretas. Ambas conformadas por una planta y un controlador: Ambos diagramas de bloques se presentan en las Fig 1. Y Fig 4.



**Fig. 1:** Diagrama de bloques del sistema continuo a lazo cerrado.

El primer sistema se utiliza para explicar los conceptos claves de los sistemas de control lineales, tales como la respuesta temporal (se estudian tanto el régimen transitorio como el error en estado estable), la respuesta en frecuencia, los efectos de la realimentación y las acciones proporcional, integral y derivativa de compensadores.

El segundo sistema, de mayor complejidad, posibilita implementar diferentes leyes de control, tales como el PID de tiempo discreto o la compensación por modos deslizantes.



**Fig. 2:** Síntesis de la planta analógica.

**Implementación de un Sistema de Control Lineal en Tiempo Continuo.**

Está constituida por una planta lineal de segundo orden subamortiguada y ganancia no unitaria, un comparador y un compensador tipo PID restringido.

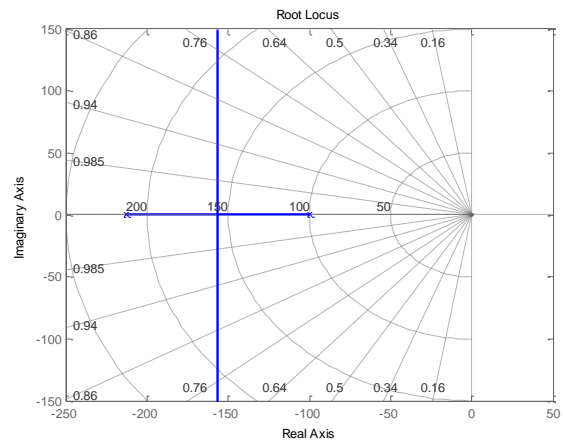
La función de transferencia de la planta está dada por (1):

$$G(s) = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \tag{1}$$

En la Fig. 2 se presenta la red de amplificadores operacionales utilizada para su síntesis. Si bien desde el punto de vista electrónico la configuración no es óptima, cuenta con una ventaja didáctica: en esta red, los polos de lazo cerrado son fácilmente ajustables cambiando los componentes electrónicos, o ajustando la ganancia. Así, fijando los valores de capacitores y resistencias como en (2) y (3), se puede cambiar la ganancia del sistema a lazo cerrado variando la relación entre las resistencias  $R_8$  y  $R_9$ , obteniéndose una gama de respuestas temporales según se anticipa del lugar de raíces de Fig. 3.

$$G_1(s) = \frac{1/R_1 C_1}{s + 1/R_1 C_1} = \frac{1/(100K\Omega \times 0.1\mu F)}{s + 1/(100K\Omega \times 0.1\mu F)} = \frac{100}{s + 100} \tag{2}$$

$$G_2(s) = \frac{k/R_2 C_2}{s + 1/R_2 C_2} = \frac{11/(47K\Omega \times 0.1\mu F)}{s + 1/(47K\Omega \times 0.1\mu F)} = \frac{2340}{s + 212.8} \tag{3}$$



**Fig. 3:** Lugar de Raíces de la Planta Analógica.

La función de transferencia del controlador sintetizado es la del PID con derivador restringido (4), tal como se presenta en [1], donde  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  representan las constantes

proporcional, integral y derivativa respectivamente, que también se realiza utilizando amplificadores operacionales.

$$PID(s) = K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\alpha T_d s + 1} \right] \quad (4)$$

**Implementación de un Sistema de Control No Lineal en Tiempo Discreto.**

Para el controlador digital se eligió como planta de estudio un motor de corriente continua de baja potencia y un microcontrolador de la familia Arduino para la adquisición de datos, generación de señal de referencia e implementación de las leyes de control, con su shield correspondiente para manejo de motores DC. El motor tiene asociado a su eje un encoder incremental en un extremo y una carga variable en el otro.

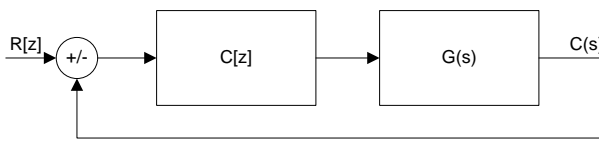


Fig. 4: Diagrama de bloques de sistema digital a lazo cerrado.

La principal componente no lineal es la fricción estática del motor, la cual es significativamente alta.

Para aprovechar las capacidades de comunicación serial del microcontrolador, se implementó una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en inglés) en PC.

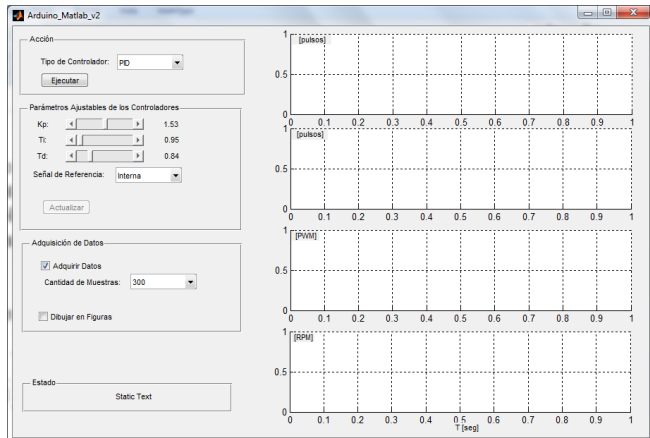


Fig. 5: GUI del controlador digital.

La interfaz gráfica cumple con dos cometidos: Por un lado permite configurar las opciones del ensayo, tales como la ley de control y sus parámetros; por otro permite registrar las señales de interés, como la señal de referencia, la lectura del encoder incremental, y la acción de control, entre otras. En el caso de ejecutar una ley de control PID, se registran las acciones proporcional, integral y derivativa por separado.

A modo de ejemplo, una de las leyes de control que se implementaron es la PID discretizada (5):

$$u_{[k]} = K_p \left[ e_{[k]} + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^{k-1} e_{[i]} + \frac{T_d}{T} (e_{[k]} - e_{[k-1]}) \right] \quad (5)$$

Donde  $e$  representa la señal de error,  $u$  la acción de control,  $T$  el período de muestreo y  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  las

constantes proporcional, integral y derivativa respectivamente.

**APLICACIONES**

Los dos kits implementados han sido utilizados en el dictado de tópicos de control en tiempo continuo y tiempo discreto, para alumnos de grado de las carreras de Ingeniería Electrónica (dictada en FCEFyN, UNC y UTN Regional La Rioja), Ingeniería en Computación (FCEFyN, UNC), Ingeniería Biomédica (FCEFyN, UNC) e Ingeniería en Sistemas de Información (UTN Regional Córdoba). Las asignaturas de control son troncales en algunas de estas carreras y de carácter prácticamente informativo en otras. Además, los conocimientos en electrónica analógica y digital son muy diferentes en cada caso, no sólo por el alcance de la carrera sino por el semestre de dictado de la materia. Con estas consideraciones, los prácticos de laboratorio han sido adaptados a las necesidades de cada carrera, pudiéndose diferenciar en los grupos que se detallan a continuación.

**Experiencia en carreras de grado donde la teoría de control no es un eje principal.**

Tal es el caso de dos carreras: Ingeniería Biomédica e Ingeniería en Sistemas de Información. El enfoque en cada carrera es diferente: mientras que en Ingeniería Biomédica se hace hincapié en la experiencia de adquisición de datos, el modelado y los efectos de la compensación, el foco para Ingeniería en Sistemas de Información apunta a la implementación de controladores digitales.

Para estos últimos, el trabajo de laboratorio se simplifica al diseño de un compensador en tiempo discreto para una planta cuya función de transferencia se conoce. Dado que la carga horaria de la materia impide desarrollar los contenidos básicos del control lineal en tiempo continuo y en tiempo discreto, se optó -siguiendo a [2] y [3]- por enseñar un método simplificado de diseño, que consiste en diseñar el compensador en tiempo continuo y discretizarlo a una frecuencia de muestreo de al menos diez veces el ancho de banda de la planta. De esta forma, un compensador PI cuya función de transferencia en tiempo continuo es (6) se discretiza según (7) aplicando la aproximación de Tustin.

$$PI(s) = \frac{K_p(T_i s + 1)}{T_i s} \quad (6)$$

Luego se explica a los estudiantes la forma de sintetizar la función de transferencia (7) en un microcontrolador.

$$PI(z) = \frac{K_p \left( \frac{T}{2T_i} + 1 \right) z + K_p \frac{T - 2T_i}{2T_i}}{z - 1} \quad (7)$$

Simplificando la notación de (7) en (8), se multiplican numerador y denominador por un retardo unitario, obteniéndose luego la expresión (9), que relaciona la salida del controlador con la señal de error  $e(z)$ .

$$PI(z) = \frac{r_1 z - r_0}{z - 1} \quad (8)$$

$$\frac{u(z)}{e(z)} = \frac{r_1 - r_0 z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (9)$$

Al antitransformar esta última expresión se obtiene la ecuación (10), que es de fácil implementación en cualquier lenguaje de programación:

$$u_{[k]} = r_1 e_{[k]} - r_0 e_{[k-1]} + u_{[k-1]} \quad (10)$$

En la Fig. 6 se ejemplifica el código que se presenta a los alumnos, en el entorno de programación de licencia libre elegido por la cátedra.

```
digitalWrite(PinIntTimerSoft,LOW); // Para medir la veloc
}
void LazoCerradoPID() { ... }
double LazoCerradoPI(double ek, double r0, double r1)
{
    static double ek_1=0;
    static double uk_1=0;

    double uk=r1*ek-r0*ek_1+uk_1;
    ek_1=ek;
    uk_1=uk;
    return uk;
}
void ActualizarServo()
{
    //===== ACTUALIZACIÓN DE SERVO =====//
}
```

Fig. 6: Implementación de la ley de control PI en un entorno de programación C.

El código es compilado y ejecutado por el docente en el microcontrolador Arduino frente al curso, variándose entre cada ejecución los valores de  $K_p$  y  $T_i$ . Los resultados son expuestos y comentados.

Los alumnos de la carrera de Ingeniería Biomédica se introducen en los tópicos de control lineal a mitad de su carrera, con escasos conocimientos de electrónica práctica. Para ellos, el personal de la cátedra implementó los circuitos analógicos (ver Fig. 7) junto con una guía de laboratorio en la que se explica de qué manera conectarlos, alimentarlos, inyectar una señal de referencia y medir la salida con un osciloscopio.



Fig. 7: Planta analógica sintetizada con amplificadores operacionales.

La planta es sometida a un análisis completo: los alumnos determinan su respuesta en frecuencia y caracterizan la

respuesta temporal. En la Fig. 8 se muestra la respuesta temporal del sistema ante una entrada escalón, tal como la capturan los alumnos en el osciloscopio.

Con estos parámetros obtienen el modelo matemático de la planta (que como ya se comentó, es un sistema de segundo orden subamortiguado) y diseñan un compensador PID para eliminar el error en estado estable, disminuir el sobrepasamiento y mejorar el tiempo de establecimiento. Antes de volver al laboratorio, simulan computacionalmente la respuesta temporal del sistema compensado. En el laboratorio conectan el circuito PID, también implementado con redes de amplificadores operacionales, y obtienen la respuesta al escalón del sistema compensado que se muestra en la Fig. 9.

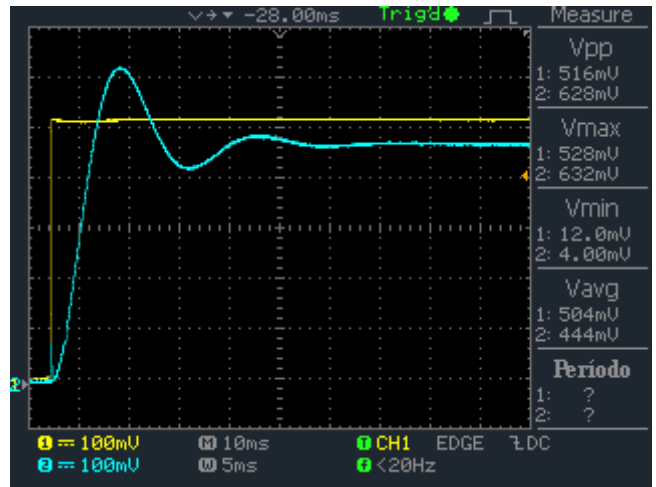


Fig. 8: Respuesta temporal de la planta a lazo abierto, tomada con un osciloscopio digital.

Adicionalmente, el circuito permite observar las salidas de la parte proporcional, integral y derivativa del compensador, permitiendo a los alumnos investigar sobre los efectos de cada acción de control por separado.

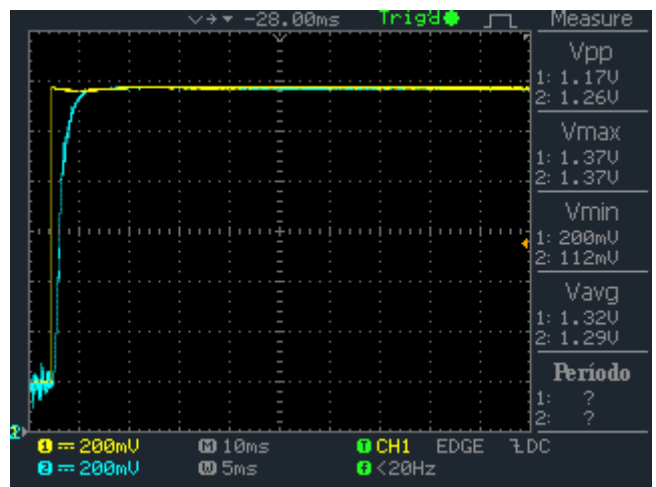


Fig. 9: Respuesta temporal de la planta a lazo cerrado.

La experiencia de aplicar esta modalidad de trabajo a lo largo de 3 años ha sido altamente satisfactoria. La propuesta es bien recibida entre los alumnos, quienes en general luego de realizar la práctica se muestran más interesados en los contenidos de la materia.



**Experiencia en carreras de grado donde la teoría de control es un eje principal, con alumnos intermedios**

Esta experiencia se da con un grupo mixto de alumnos de las carreras Ingeniería Electrónica e Ingeniería en Computación, con la materia Sistemas de Control situada a mitad de las carreras. Dado que los conocimientos en electrónica analógica y digital no son a esta altura de la carrera suficientes para sintetizar e implementar la planta analógica ni para programar el controlador discreto, se aplica la misma metodología de trabajo mencionada en el apartado anterior, esto es, se utilizan las plantas de la Fig. 7 y las mismas guías de estudio para caracterizar, modelar y simular la respuesta temporal de sistemas de segundo orden. A continuación se encomienda el diseño de un controlador PID, que es simulado y luego implementado en el laboratorio.

A pesar de que la ingeniería de control es una de las orientaciones de las carreras, por no ser la práctica de laboratorio obligatoria no se aprecia el mismo entusiasmo demostrado por los alumnos de otras orientaciones.

**Experiencia en carrera de grado con orientación al control con alumnos avanzados.**

La última experiencia que se describe, se da con alumnos del último año de la carrera Ingeniería Electrónica, con orientación al control. El número de alumnos cursantes es normalmente reducido.

Siendo que estos alumnos pueden ser más exigidos, se les plantea la resolución de ambos prácticos de laboratorio. En el primero los alumnos – en grupos de dos - deben integrar la planta analógica, medir su respuesta al escalón, modelizarla, simularla y comparar el modelo obtenido con el calculado teóricamente, para luego diseñar e implementar. Finalmente la respuesta del sistema a lazo cerrado es evaluada en el laboratorio. Los resultados que obtienen son similares a los que se presentaron en las Fig. 7 y Fig. 9, por lo que no serán repetidos.

Seguidamente son introducidos a la teoría de control en tiempo discreto. Los conocimientos son aplicados en el diseño de controladores discretos para sistemas no lineales. La respuesta temporal de estos sistemas es simulada en modelos como los de la Fig. 10, donde el controlador diseñado se modela mediante una ecuación en diferencias como (10), implementada en un lenguaje de programación. Se pretende con esto acercar lo más posible la simulación al entorno de trabajo real.

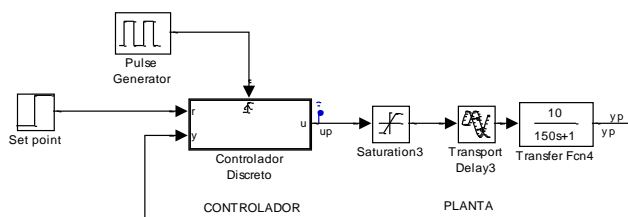


Fig. 10: Modelo de Simulación de un Controlador de Tiempo Discreto.

En este modelo de simulación la planta en estudio es modelada de manera tradicional, usando un bloque de función de transferencia para la parte lineal, mientras que las no linealidades se modelan con los bloques respectivos.

El controlador se programa dentro de un bloque que se ejecuta a la frecuencia indicada por el generador de pulsos.



Fig. 11: Implementación de los alumnos del Controlador discreto y driver de motor DC.

Terminada esta etapa, los alumnos son introducidos al práctico de implementación del controlador discreto. Se les permite elegir entre usar el hardware provisto por la cátedra o implementar el propio. Por lo general escogen la implementación en microcontroladores PIC, ya que están familiarizados con ellos. Un ejemplo de implementación se muestra en la Fig. 11. Gracias al modelo de simulación implementado, les resulta relativamente sencillo programar los microcontroladores.

Año tras año la reacción de los alumnos ante estos prácticos es muy buena. Siempre se muestran entusiasmados, aprovechando algunos de ellos el controlador discreto como componente de sus trabajos finales de grado. Por lo general presentan prácticos con que superan holgadamente las exigencias académicas planteadas.

En la Tabla I se presentan algunos elementos para el análisis cuantitativo de la respuesta de los alumnos. Sobre datos relevados entre los años 2012 y 2013 en algunas de las carreras mencionadas, se destaca el porcentaje de alumnos que aprobaron los trabajos prácticos con calificaciones sobresalientes.

TABLA 1: PORCENTAJE DE PRÁCTICOS CON CALIF. 8, 9 Y 10.

Año	Carrera	Alumnos	% Excel.
2012	Biomédica	50	72
	Electrónica (6to año)	9	75
2013	Biomédica	47	68
	Electrónica (6to año)	10	70
	Electrónica / Computación	5	30

**SOBRE EL APRENDIZAJE MEDIADO POR LA SIMULACIÓN**

Son indiscutibles las ventajas aportadas por la simulación computacional tanto en la práctica profesional como en la enseñanza de las ingenierías y de las ciencias naturales en general. Por su parte, prácticamente la totalidad de las disciplinas integradas en las ciencias sociales emplean actualmente la simulación computacional en sus investigaciones, puesto que la experimentación directa

sobre grupos humanos suscita problemas éticos que restringen fuertemente tanto sus alcances como la posibilidad de su realización. Por ello se defiende que la simulación representa en el ámbito de las ciencias sociales una tercera y nueva modalidad de investigación científica, que complementa los métodos clásicos de inducción y deducción [4].

“Magister dixit” era el recurrente argumento a la autoridad de los antiguos que constituía el fundamento —y a menudo la conclusión— de las discusiones escolásticas medievales. Hoy se asiste a una transferencia del peso de la “prueba científica” desde los hombros de los antiguos maestros a las más anchas y cómodas espaldas de la herramienta computacional. Con la misma carencia de espíritu crítico con que en el pasado se recurría a los maestros reconocidos, se manifiesta hoy la tendencia a defender aseveraciones sólo porque son el resultado de cálculos computacionales o, peor aún, “porque lo dice internet”.

Es entonces imperativo formar a los alumnos para que sean capaces de validar y verificar los resultados de las simulaciones computacionales a las que se ven enfrentados y sean capaces de analizar su plausibilidad a la luz de sus conocimientos acerca de los sistemas simulados.

La definición de simulación propuesta por Bratley et al. [5]: «Simular es excitar al modelo de un sistema con entradas adecuadas y observar las salidas correspondientes», posee la virtud de puntualizar que se deben emplear las “entradas adecuadas” para que la simulación sea válida. Aquí la simulación se representa como un experimento aplicado a un modelo del sistema en estudio, destacándose que el par {experimento, modelo} ha de ser válido, para que la simulación no conduzca a resultados falsos.

Es necesario que el docente insista en el concepto que un modelo representa a un sistema en condiciones muy particulares de operación. Resulta así pertinente la concepción de modelo debida a Marvin Minski [7]: «Un modelo (M) para un sistema (S) y un experimento (E), es cualquier objeto al que puede aplicarse E para responder preguntas acerca de S

Los experimentos de laboratorio que se llevan a cabo sobre el sistema real en estudio (o sistema-objetivo) son siempre válidos, puesto que el sistema real es obviamente válido para cualquier experimento, mientras que un modelo no posee esta propiedad. Como consecuencia, resulta particularmente importante que junto con la descripción del modelo se acompañe necesariamente la estipulación de su marco experimental, donde se establezca el conjunto de experimentos soportados por el modelo. Como bien dice Celier [7]: «... muy a menudo la simulación se convierte en una historia de amor con final triste: creamos un modelo de un sistema y nos enamoramos de él. Como habitualmente el amor es ciego, lo olvidamos todo acerca del marco experimental, olvidamos que no estamos en el mundo real, sino en una muy limitada representación del mismo: en una palabra, nos convertimos en adictos al modelo» con la obvia —y penosamente frustrante— consecuencia que los resultados de la simulación no se verifican en la práctica.

Con las precauciones del caso, la simulación es la única técnica disponible para analizar el comportamiento de sistemas arbitrarios, como alternativa de la experimentación

directa. Las técnicas analíticas son muy importantes, pero muchos sistemas son analíticamente intratables, o bien requieren de un conjunto de simplificaciones muy difícilmente justificables o solamente verificables mediante experimentación o simulación.

Existe toda una multiplicidad de razones para aplicar la simulación como herramienta en el ámbito de la ingeniería. Centrando el enfoque en el proceso de aprendizaje de las disciplinas científicas, la simulación por computadora ofrece la posibilidad de realizar experimentos virtuales en los que la totalidad de las variables de control, las variables de estado y/o los parámetros del sistema-objetivo son accesibles para el estudiante, en una escala de tiempo adecuada, sin los eventuales peligros materiales o personales asociados a la experimentación física y con la posibilidad de introducir o suprimir perturbaciones y efectos de segundo orden, siempre dentro de los límites impuestos tanto por el marco experimental del modelo empleado, como por las peculiaridades del método numérico que lo implementa computacionalmente.

El estudiante ha de ser consciente del empleo de modelos idealizados en las simulaciones que emprende. Los modelos idealizados constituyen una deliberada simplificación de algo complicado a fin de hacerlo más tratable. Filosóficamente se distinguen dos clases de idealizaciones: las aristotélicas y las galileanas. Una idealización aristotélica consiste en despojar a un objeto concreto de todas aquellas propiedades que no resultan relevantes para el problema en estudio (un ejemplo es el modelo clásico del sistema planetario, que describe a los planetas como teniendo tan sólo masa y forma geométrica, prescindiendo de las restantes propiedades). Las idealizaciones galileanas por su parte involucran la introducción de distorsiones deliberadas en el tratamiento de problemas complicados (masas puntuales, líquidos sin viscosidad, superficies libres de fricción, son ejemplos de idealizaciones galileanas).

¿Qué puede aseverar acerca de la realidad un modelo que incluya abstracciones y/o distorsiones? ¿Qué aprendizaje se puede alcanzar por medio de las simulaciones sobre esta clase de modelos? Esta cuestión puede ser respondida desde el realismo perspectivista de Giere y Rueger de acuerdo con el cual cada modelo particular revela un aspecto del fenómeno en estudio y, tomados en conjunto, los modelos brindan una explicación más completa [8].

Advertir adecuadamente al estudiante acerca de todas estas cuestiones, es una tarea ineludible que ha de realizar el docente, a fin de lograr una correcta interpretación de los resultados que brinda la simulación, especialmente en implementaciones de tipo analógico como las citadas más arriba. Paralelamente resulta conveniente que los primeros trabajos de simulación con aplicación a control sean realizados sobre sistemas simples, para los cuales el estudiante dispone de soluciones analíticas que le permiten validar su modelo y verificar los resultados alcanzados.

## CONCLUSIONES

Basados en la experiencia adquirida a lo largo de los años los autores están en condiciones de afirmar que la utilización de modelos de simulación y prácticos de laboratorio incide en el proceso de aprendizaje de manera

positiva. La implementación de laboratorios con componentes de bajo y fácil adquisición costo es factible.

Se remarca la importancia de incentivar al alumno para que integre los conocimientos teóricos en un ambiente un poco más cercano a lo que enfrentará en su vida profesional.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran agradecer a los Departamentos de Electrónica de la FCEFYN de la UNC y de la UTN Facultad Regional La Rioja, así como al Departamento de Sistemas de Información de la UTN Facultad Regional Córdoba por el apoyo y espacio cedidos. De la misma manera, se agradece a los ayudantes alumnos María Cristina Nieto Cano y Carla Díaz por su colaboración en estos proyectos.

## REFERENCIAS

- [1] Moreno L., Garrido S. y Balaguer C. (2003): *Ingeniería de Control. Modelado, análisis y control de sistemas dinámicos*, Primera edición. Ariel Ciencia, Barcelona, 2003.
- [2] Schumacher W., Maurer M., (2011): *Grundlagen der Regelungstechnik*, Vorlesungsskript, Stand: 06.10.2011. [Online]. Disponible en [http://www.ifr.ing.tu-bs.de/static/files/lehre/vorlesungen/gdr/Skript\\_GdR.pdf](http://www.ifr.ing.tu-bs.de/static/files/lehre/vorlesungen/gdr/Skript_GdR.pdf)
- [3] Lunze J., (2005): *Regelungstechnik 2– Mehrgössensysteme, Digitale Regelung*. 3a. edición. Springer Verlag, Heidelberg, 2005.
- [4] Axelrod, Robert (2005): "Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences". University of Michigan. Disponible en <http://www-personal.umich.edu/~axe/research/AdvancingArtSim2005.pdf>
- [5] Bratley, P., Fox, B. y Schrage, L., (1987): *A Guide to Simulation. Second Edition*. Springer-Verlag, New York, 1987.
- [6] Minski, Marvin (1965): "Models, Minds and Machines", *Proceedings IFIP Congress 1965*: 45-49.
- [7] Cellier, François E., (1991): *Continuous System Modeling*. Springer Verlag, New York, 1991. Pág. 9.
- [8] Frigg, Roman y Hartmann, Stephan (2012): "Models in Science", en Zalta et al. (editors) *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Fall 2012 Edition. Disponible en <http://plato.stanford.edu/archives/fall2012/entries/models-science/>