



Innovation in research and engineering education:
key factors for global competitiveness

*Innovación en investigación y educación en ingeniería:
factores claves para la competitividad global*

CONCEPTOS Y EXPERIENCIAS EN LA ENSEÑANZA DE LA ASIGNATURA SERVOMECANISMOS

Ricardo E. Ramírez, Víctor H. Grisales Palacio

**Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia**

Resumen

El quehacer del Ingeniero Mecatrónico está enfocado principalmente al diseño y aplicación de soluciones de ingeniería para el control de máquinas y procesos.

En este marco, en una gran cantidad de aplicaciones se hace control de movimiento de máquinas y mecanismos mediante motores eléctricos. El ingeniero electricista o el electrónico dominan el conocimiento de los motores y su control y ven al mecanismo como una caja negra de la que se espera se comporte como una carga constante sobre el motor. El ingeniero mecánico domina los conceptos sobre dinámica de mecanismos pero tiene debilidad en el conocimiento de los motores y como controlarlos. El encuentro de estos dos dominios corresponde al campo de los servomecanismos donde se busca hacer el control de posición y velocidad de mecanismos y máquinas con conocimiento del controlador, el motor, el mecanismo y principalmente las reacciones del mecanismo sobre la acción del motor.

La asignatura denominada Servomecanismos del programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia tiene como objetivo el aprendizaje de control de motores teniendo en cuenta el comportamiento dinámico del mecanismo. Existe un proceso de innovación en el enfoque de la asignatura. Anteriormente los estudiantes centraban su trabajo en el análisis de un mecanismo de 3 grados de libertad y en el funcionamiento de los circuitos. Con el cambio realizado se simplificó el proyecto de curso a un mecanismo serial de 2 grados de libertad, se incentivó el uso de tarjetas comerciales programables con funciones y librerías aplicables a la adquisición de señales análogas y al control de motores. De esta forma se consiguió que el estudiante centre su foco de atención en aspectos relevantes al comportamiento del motor eléctrico frente a cargas mecánicas variables con completo análisis y conocimiento de esas cargas. También a la identificación experimental del comportamiento dinámico del motor y a la creación del algoritmo de control.

Se presentan casos de mecanismos construidos por estudiantes que han sido casos exitosos en los semestres donde se ha aplicado el nuevo enfoque y se ha tenido el reconocimiento de los estudiantes sobre un mejor entendimiento del comportamiento del motor controlado y del mecanismo.

Palabras clave: servomecanismos; control; experiencia docente; mecatrónica

Abstract

The task of Mechatronic Engineering is focused mainly on design and implementation of engineering solutions for machine and process control.

In this framework, a lot of applications are focused on motion control of machines and mechanisms using electric motors. The electronic or electric engineer has knowledge about motors and their control but they see the mechanism like a black box with the behavior of a constant load on the motor. A mechanical engineer becomes expert on dynamics of mechanisms but he has leaks on motors and how to control them. The convergence of the two domains corresponds to the field of servomechanisms where it is desirable to do control of position and speed of mechanisms and machines with the knowledge over the controller, the motor, the mechanism and firstly the reactions of the mechanism against the action of the motor.

Servomechanisms is a subject of the course Mechatronics Engineering at National University of Colombia. Its main objective is to learn motor control related to the dynamic behavior of the mechanism. There is a process of innovation in the focus of the subject. In early semesters students focused their work in an analysis of a mechanism of three degrees of freedom and the operation of the circuits. After the change, there is a simplification of the main task or project of the subject. The mechanism is serial of two degrees of freedom, now. There were encouraged the use of programmable electronic cards with functions and specialized libraries for data acquisition and motor control. In this way, the student is able to focus his attention in relevant aspects of the behavior of the electric motor against variable mechanical loads with a full analysis and knowledge of the loads. Also, the student works in the experimental identification of the motor and in the development of the control algorithm.

It is showed mechanisms built by the students. These mechanisms were cases of success in the semesters where were applied the new focus and there is acknowledge of the students about a good comprehension on the controlled motor and the mechanism.

Keywords: *servomechanisms control; teaching experience; mechatronics*

1. Introducción – La ingeniería Mecatrónica como una ingeniería de integración

La Mecatrónica como concepto surge en la década de los 70's a partir de la necesidad de mejorar la integración de las áreas de electrónica y mecánica como parte del desarrollo de nuevos productos en la empresa japonesa Yaskawa. En su desarrollo posterior la informática pasó a ser parte importante de la Mecatrónica. Mecatrónica es un concepto recientemente desarrollado que enfatiza la necesidad de integración y de interacción intensiva entre diferentes áreas de la ingeniería (Universidad Nacional de Colombia, 2010).

En general, los procesos y productos mecatrónicos pueden asimilarse a un sistema de control. Se tiene una máquina o un proceso con una dinámica, para el cual se obtiene información usando instrumentación. Como salida de los instrumentos se tienen típicamente señales eléctricas a las que se hace un tratamiento

para visualización, registro o para llevarlas a un controlador del sistema. En muchos casos de máquinas la función de control la hace un operador humano o bien un sistema automático y en el caso de plantas de proceso, el humano se soporta en controles automáticos haciendo uso de los sistemas de supervisión (SCADA). El usuario o el control generan comandos y señales y por medio de los actuadores se modifica el estado del proceso o del producto resultante. Una diferencia importante con el control de procesos es que la mecatrónica está más relacionada con aplicaciones de control de movimiento. Estas aplicaciones son las que tienen como actuadores motores, especialmente motores eléctricos. La aplicación más conocida y visible es la robótica.

Desde el origen de la Mecatrónica hasta hoy existen brechas de conocimiento en la frontera entre las áreas implicadas, principalmente entre la mecánica y la electrónica. La primera frontera se presenta cuando se requiere tomar información de variables mecánicas para convertirla en señales eléctricas para visualización, registro o realimentación del control. Su estudio corresponde al área de instrumentación y está desarrollado de tal forma que la frontera no es crítica. En control de movimiento existen unas necesidades específicas: medición continua de torque, medición de posición y velocidad en el espacio operacional de las máquinas, en especial en los robots.

La segunda frontera es cuando se necesita modificar el estado del proceso por medio de actuadores. En control de movimiento se requiere actuar sobre los mecanismos o las máquinas usando motores eléctricos. En esta frontera existe necesidad de contar con ingenieros que diseñen y apliquen soluciones tecnológicas con un buen conocimiento desde ambos lados de la frontera.

Tradicionalmente el ingeniero electricista o el electrónico tienen conocimiento sobre el motor, su actuador (drive) y la comunicación e interface con los controladores del proceso. No obstante, típicamente tienen limitado conocimiento sobre la cinemática y dinámica del mecanismo controlado. No son conocidos a profundidad los procedimientos para identificar el torque de reacción del mecanismo sobre el motor. Generalmente se simplifica el caso a un torque de reacción constante o se selecciona un motor sobredimensionado. Por su parte, el ingeniero mecánico tiene conocimiento para identificar las variables de movimiento, torque y potencia mecánica pero tiene limitaciones sobre los procedimientos de selección de motores eléctricos, los drives, selección y sintonización de los controladores, usualmente de naturaleza electrónica. La deficiencia es mayor cuando se requieren trayectorias de movimiento complejas.

Se espera que el ingeniero Mecatrónico domine los dos campos y pueda generar soluciones para la brecha mencionada en cuanto a lenguaje, conocimiento, diseño y selección. En el programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia se tiene la asignatura Servomecanismos y el objetivo de la asignatura es dar el conocimiento y la experiencia de base en la frontera mencionada del control de movimiento de mecanismos usando motores eléctricos. A partir del semestre 2 de 2011 se inició un proceso de innovación de la asignatura, procurando que los estudiantes se enfoquen en los temas de conocimiento mencionados y aprendan a generar soluciones al problema de aplicación de mecanismos, electrónica de potencia, selección y aplicación de motores en control de movimiento.

2. La Asignatura Servomecanismos

La asignatura Servomecanismos, con una intensidad de 3 créditos académicos, es obligatoria en el programa de Ingeniería Mecatrónica. Pertenece a la agrupación Ingeniería de Diseño del componente disciplinar, tiene prerrequisito Diseño Mecatrónico y aunque no es prerrequisito de otras asignaturas

disciplinares, se sugiere que sea vista antes de las asignaturas Robótica y Automatización de procesos de manufactura.

El contenido de la asignatura está dividido en cuatro tópicos principales, a saber: 1-Análisis cinemático y dinámico de mecanismos, 2-Identificación y selección de motores y motorreductores, 3-Electrónica de potencia asociada a los actuadores (drives) y 4-Diseño y sintonía del bloque de control de movimiento. El contenido teórico se apoya experimentalmente con la construcción de un proyecto de curso en donde el objetivo consiste en que el mecanismo siga una trayectoria de movimiento predefinida, que típicamente se calcula en un computador mediante un software de aplicación. El mecanismo se acopla al motor mediante una caja reductora de velocidad. El siguiente diagrama de bloques esquematiza los principales módulos y partes componentes considerados en el curso para el control de mecanismos (servomecanismos):

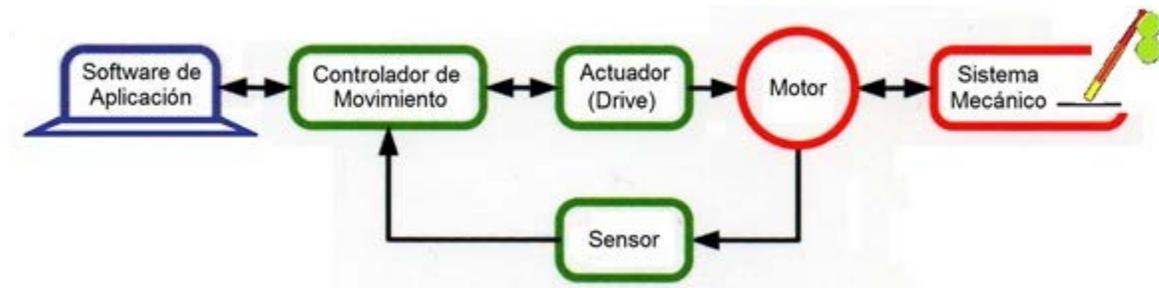


Figura 1 Diagrama de bloques considerado para el control de mecanismos. (Adaptado de (Voss, 2007), se indica mecanismo de tipo RP).

Previo al cambio propuesto y actualmente aplicado, se hizo un análisis con docentes especialistas de las áreas de sistemas de control, robótica, electrónica y mecánica, de los contenidos que eran desarrollados en el curso y del proyecto realizado. Como resultado se encontró un excesivo número de temas tratados en el componente de mecanismos. El estudiante no asimilaba completamente todos los temas por el corto tiempo en que eran tratados. El tema de electrónica de potencia era visto posterior al tema de control de motores lo que generaba algunos vacíos de entendimiento. Por su parte, el proyecto asignado tenía como alcance la construcción de un mecanismo paralelo de tres grados de libertad usando motores DC (Figura 2), el diseño del circuito de control, incluyendo un microcontrolador en el que se tenía que programar un control de tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo), el diseño y manufactura del circuito impreso y montaje de los elementos del circuito.

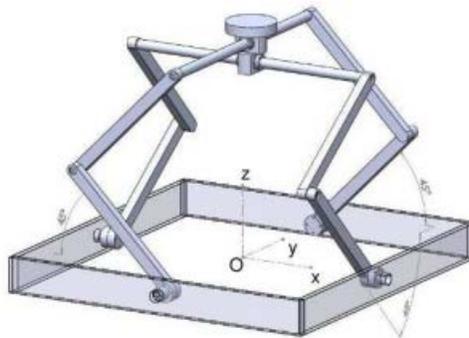


Figura 2 Componentes mecánicos del proyecto final del curso antes del cambio. (Piñeros & Araque, 2010)

El estudiante usaba la mayor parte del tiempo en analizar la cinemática del mecanismo y en el ensamble y puesta a punto del circuito electrónico. Este consumo de tiempo en muchos casos no permitía alcanzar el objetivo final de ensamblar todo el proyecto y ver la acción de control funcionando.

3. El proceso de innovación en la asignatura Servomecanismos

En el semestre 2 de 2011, con la ayuda de docentes especialistas en las áreas de sistemas de control, robótica, electrónica y mecánica, se determinó hacer una modificación de objetivo, ajuste de contenidos y del proyecto del curso de Servomecanismos. El objetivo del curso se fijó como: identificar y calcular las variables dinámicas en un servomecanismo y usar las herramientas necesarias para diseñarlo, ensamblarlo y controlarlo (Grisales & Ramírez, 2011).

A partir del objetivo de curso se hizo una depuración de los contenidos. El orden de los tópicos considerados en el curso inicia en el estudio de los mecanismos, pasando por los motores eléctricos y sensores, la electrónica de potencia para el accionamiento y finalmente los sistemas de control de movimiento para el sistema completo.

En el componente de mecanismos se estudian aquellos en que es más simple y entendible aplicar métodos canónicos de análisis cinemático y dinámico como Newton-Euler, Euler-Lagrange y sistemas de transmisión de potencia mecánica (Norton, 2009).

En el componente de actuadores se enfocó al estudio de motores eléctricos DC y trifásicos de inducción, con énfasis en el modelado de comportamiento dinámico de motores DC que tienen como carga mecánica al mecanismo (Voss, 2007). Se proveen también fundamentos de servomotores sin escobillas (brushless) y motores paso a paso (Hughes, 2009). Se indican igualmente sensores de aplicación en control de posición y velocidad, como potenciómetros y encoders absolutos y diferenciales.

En el componente de electrónica de potencia se abordan los principios de operación y circuitos típicos de aplicación de transistores bipolares, MOSFET e IGBT. Igualmente, convertidores electrónicos, análisis de circuitos de tipo troceador DC (chopper) en configuración de puente H (con el motor como carga eléctrica flotante, con inversión de giro) y principios de modulación por ancho de pulso (PWM) en diversas configuraciones para la dosificación de energía en el actuador (drive) de potencia (Rashid, 2004).

En el componente de control se aplican técnicas para la identificación de los modelos dinámicos (función de transferencia) de los motores con carga mecánica, drive de potencia y sensorica, a partir de medición experimental en lazo abierto y lazo cerrado. Igualmente se analiza, simula e implementa un control de tipo P, PD, PI o PID para el seguimiento de la trayectoria deseada del control de movimiento (Gene F. Franklin, 2010), la cual es calculada desde una aplicación software comercial.

En el proyecto experimental de curso, el alcance está definido de la siguiente forma: Proyectar, ensamblar y poner en funcionamiento un mecanismo controlado que siga una trayectoria de prueba definida. Realizar los modelos, cálculos y simulaciones necesarios para el proceso de construcción y para la verificación teórica de los resultados (Ramírez & Grisales, 2011).

El mecanismo propuesto a controlar es de tipo serial plano con dos grados de libertad y se ha variado varios semestres como se muestra en la Tabla 1. La primera articulación se encuentra en la base y la segunda en la

parte final del mecanismo, cuyo extremo debe seguir una trayectoria de movimiento preestablecida en forma controlada.

Tabla 1 Tipo de mecanismo a controlar por semestre

Semestre 2 de 2011	Mecanismo RR (Rotacional-Rotacional)
Semestre 1 de 2012	Mecanismo RP (Rotacional-Prismático)
Semestre 2 de 2012	Mecanismo PR (Prismático-Rotacional)
Semestre 1 de 2013	Mecanismo RP (Rotacional-Prismático)

Los estudiantes utilizan diversos tipos de materiales como metales, plásticos y maderas y piezas obtenibles en el mercado para la construcción física del mecanismo. En cuanto al método de construcción se tienen estudiantes que usan métodos artesanales de ensamble artesanales hasta los que hacen diseño asistido por computador y construcción de piezas en máquinas herramientas. Esto, ya sea por que disponen de las máquinas o porque contratan en talleres o utilizan laboratorios de la Universidad para la construcción. La Figura 3 ilustra un montaje típico de fin de proyecto para el control de movimiento de un mecanismo de tipo RR (Rotacional-Rotacional). Se aprecian algunos detalles de la colocación de motores, juntas y eslabones del mecanismo.

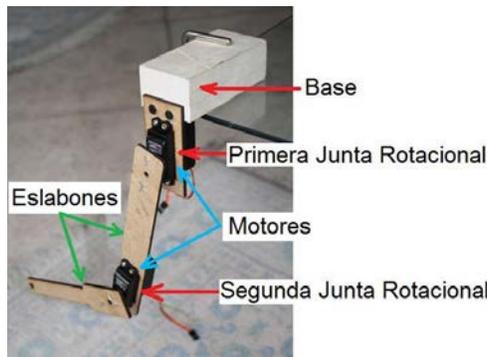
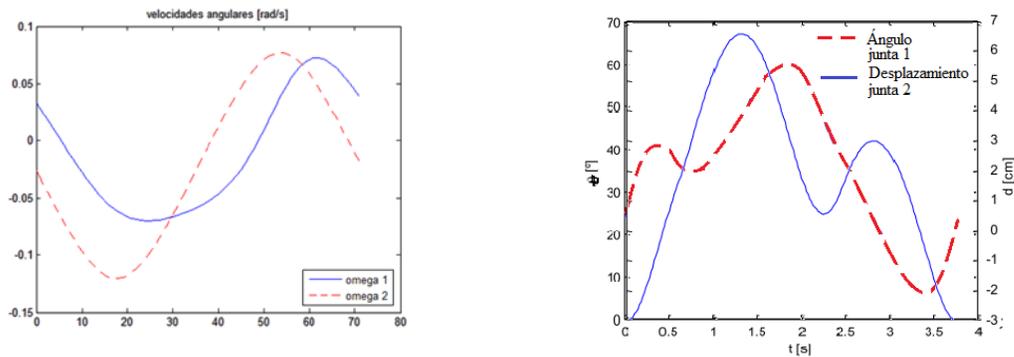


Figura 3 Vista de mecanismo controlado R-R: Rotacional-Rotacional

El uso de herramientas de cinemática inversa permite obtener las gráficas de desplazamiento y velocidad requeridas en las articulaciones del mecanismo partiendo de la trayectoria sobre la que debe moverse el extremo final del segundo eslabón del mecanismo. Estas gráficas se convierten en los perfiles de referencia para el control.



(a) (b)

Figura 4 Gráfica de: (a) velocidades de articulación en un mecanismo RR, (b) desplazamiento angular y lineal en un mecanismo RP

Los avances tecnológicos en tarjetas electrónicas de desarrollo permiten obtener a bajo costo opciones listas para ser usadas. Se ha motivado a los estudiantes a usar estas tarjetas eliminando el tiempo que lleva el diseño y puesta a punto del circuito electrónico. Este tiempo es dedicado por los estudiantes en el diseño y sintonización del control. Las tarjetas que principalmente se han usado son las de la marca Arduino® (Arduino Uno, Arduino Leonardo) y Texas Instruments® (MSP430 LaunchPad). Queda a libre elección de los estudiantes usar la tarjeta de desarrollo para implementar en ella el algoritmo de control o usarla en combinación con un computador programando el control en el computador, así como el cálculo de la generación de la trayectoria de movimiento. Para la identificación de los modelos se usa software de adquisición de datos como LabView® y para la simulación de los modelos y otras tareas de cálculo numérico se emplea típicamente software MATLAB® y Simulink®.

4. Resultados y conclusiones

La interacción con los estudiantes en forma de diálogos, respuesta en las evaluaciones escritas y evaluación oral sobre el proyecto de curso muestran que hay un buen nivel de comprensión sobre las variables involucradas, eléctricas y mecánicas, sobre el comportamiento del motor, sobre el efecto del movimiento en la presencia de un torque de reacción variable y su tratamiento como perturbación en el lazo de control.

El uso de las tarjetas de desarrollo ha permitido que en promedio un mayor número de estudiantes completen la integración de partes componentes y ensamble del proyecto. El componente que más dificultad presentaba antes del cambio era la puesta a punto del circuito electrónico; en el estado actual el punto de mayor dificultad se ha trasladado al componente mecánico, especialmente en cuanto a obtener los ajustes debidos y mínima fricción. Aún con las dificultades mencionadas, la totalidad de los estudiantes cada semestre llegan a tener un prototipo que se mueve según la trayectoria propuesta con mayor o menor error.

En cada semestre entre un 10 % y un 20 % de los estudiantes construyen un proyecto que cumple con todos los requerimientos exigidos. En algunos casos el resultado va más allá de lo esperado, hay estudiantes que por iniciativa propia agregan funciones adicionales. Por ejemplo, graficar en una pantalla de computador la trayectoria deseada y la trayectoria real del mecanismo, permitiendo la comparación visual entre las dos, o bosquejar una trayectoria cualquiera con el ratón, calcular la cinemática inversa y el mecanismo realiza esa trayectoria de movimiento. Los mejores mecanismos de cada semestre se han convertido en ejemplo de los logros de los estudiantes de semestres avanzados del programa de Ingeniería Mecatrónica como proyecto integrador y son también presentados para incentivar a los estudiantes nuevos del programa y a sus padres durante la semana de inducción al inicio del primer semestre de estudios.

En general, se concluye que la decisión de innovar los contenidos y el proyecto del curso de Servomecanismos ha traído resultados positivos para los estudiantes y para el programa de Ingeniería Mecatrónica en la Universidad Nacional de Colombia.

5. Referencias

- Franklin, G.F., Powell, J.D. & Emami-Naeini, A. (2010). *Feedback Control of Dynamic Systems, 6th Ed.* USA: Pearson Education.

- Grisales, V. H., & Ramírez, R. (Julio de 2011). *Programa del curso de Servomecanismos 2011-II*, Universidad Nacional de Colombia.
- Hughes, A. (2009). *Electric Motors and Drives, 3rd Ed.* Burlington, MA, USA: Newnes - Elsevier.
- Norton, R. L. (2009). *Diseño de maquinaria: síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*. México: McGraw-Hill.
- Piñeros, J., & Araque, I. (Febrero de 2010). *Programa del curso de Servomecanismos 2010-I*, Universidad Nacional de Colombia.
- Ramírez, R., & Grisales, V. H. (Septiembre de 2011). *Servomecanismos, Proyecto de Curso*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia.
- Rashid, M. H. (2004). *Electrónica de Potencia - Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones, 3a. Ed.* México: Pearson Prentice Hall.
- Universidad Nacional de Colombia. (2010). *Pregrado en Ingeniería Mecatrónica*. (U. N. Colombia, Productor) Recuperado el 20 de Abril de 2013, de http://www.ing.unal.edu.co/progsfac/mecanica_mecatronica_/index
- Voss, W. (2007). *A Comprehensive Guide to Servo Motor Sizing*. Greenfield, MA, USA: Copperhill Media Corporation.

Sobre los autores

- **Ricardo Emiro Ramírez:** Ingeniero Mecánico, Ingeniero Electrónico, Máster en Ingeniería – Automatización Industrial, Doctor en Ciencias de Ingeniería Mecánica de la Universidad Federal do Rio de Janeiro. Profesor Asistente Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá. reramirez@unal.edu.co.
- **Víctor Hugo Grisales Palacio:** Ingeniero Electrónico, Máster en Ingeniería Eléctrica, Doctor en Sistemas Automáticos de la Universidad Paul Sabatier, Toulouse, Francia. Profesor Asociado Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá. vhgrisales@unal.edu.co.

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería y de la International Federation of Engineering Education Societies

Copyright © 2013 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI), International Federation of Engineering Education Societies (IFEES)