

# **Sistema Didáctico para el Diseño de Compensadores Utilizando LabVIEW**

***Juan José Martínez Nolasco***

Departamento de Ingeniería Mecatrónica  
Instituto Tecnológico de Celaya  
*juan.martinez@itcelaya.edu.mx*

***Carlos Fernando Hernández Figueroa***

Departamento de Ingeniería Mecatrónica  
Instituto Tecnológico de Celaya

***Elías José Juan Rodríguez Segura***

Departamento de Ingeniería Electrónica  
Instituto Tecnológico de Celaya  
*elias.rodriguez@itcelaya.edu.mx*

***Francisco Gutiérrez Vera***

Departamento de Ingeniería en Sistemas Computacionales  
Instituto Tecnológico de Celaya  
*francisco.gutierrez@itcelaya.edu.mx*

***Agustín Vidal Lesso***

Departamento de Ingeniería Mecatrónica  
Instituto Tecnológico de Celaya  
*agustin.vidal@itcelaya.edu.mx*

## **Resumen**

En el presente trabajo se describe un sistema para el diseño de compensadores implementado en un instrumento virtual (IV). Los compensadores que se utilizan son compensadores en cascada, para su diseño se emplea una técnica de control clásico llamada "Lugar Geométrico de las Raíces" (LGDR).

El IV se realizó en LabVIEW utilizando un lenguaje de programación gráfico, este software ofrece la ventaja de poder realizar cálculos de manera concurrente. El IV

cuenta con un sistema resistivo – capacitivo (RC) de segundo orden donde es posible elegir los valores de las resistencias y capacitancias, obteniendo la función de transferencia en lazo abierto que se utilizará como proceso. En el IV se puede analizar gráficamente el comportamiento del sistema en lazo abierto ante diferentes entradas de posición.

El proceso se puede compensar utilizando sistemas de control: Proporcional, Proporcional - Integral (PI), Proporcional – Derivativo (PD), Proporcional – Integral – Derivativo (PID), compensador en atraso, compensador en adelanto y compensador en atraso – adelanto.

Todos los resultados obtenidos en cada una de las compensaciones se pueden analizar gráficamente en simulación y en línea, además de observar los nuevos LGDR (Lugar geométrico de la raíz) de los sistemas compensados.

**Palabras Clave:** MATLAB, LabVIEW, Compensadores y Control Clásico.

## **1. Introducción**

En el diseño de sistemas de control se tienen que contemplar tres características importantes: la estabilidad del sistema, la respuesta en estado estable y la respuesta transitoria. La estabilidad y la respuesta transitoria del sistema las determina la ubicación de los polos en lazo cerrado del sistema, modificando la ubicación de los polos en lazo cerrado se pueden modificar características importantes de la respuesta del sistema como: sobrepaso máximo, el tiempo de asentamiento y el tiempo pico. Una poderosa herramienta de diseño de sistemas de control que contempla la ubicación de los polos en lazo cerrado de un sistema es el LGDR. Utilizando esta herramienta se

pueden realizar diseños de sistemas de control clásico realizando una metodología de diseño sencilla.

Dentro del software MATLAB existe una herramienta llamada SISOTOOL, la cual nos permite obtener de una función de transferencia previamente programada, el LGDR, el diagrama de bode en magnitud y frecuencia, el valor de la ganancia del sistema compensado y sin compensar el cual nos permite obtener el diseño de un compensador colocando características de la respuesta natural de oscilación), el sobrepaso. Con esta herramienta también se puede conocer el comportamiento del sistema modificando los valores de polos y ceros del compensador. En la figura 1 se ilustra la plataforma de trabajo de esta herramienta.

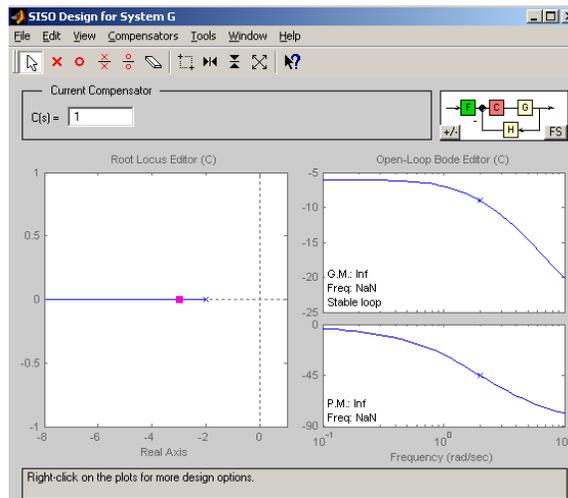


Figura 1. Entorno SISOTOOL - MATLAB.

En la actualidad MATLAB no tiene una herramienta que además de realizar el diseño del compensador sea capaz de probarlo en línea implementando su modelo discreto.

El software para realizar IV LabVIEW, en la actualidad está siendo utilizado para la instrumentación y control de diversos dispositivos por su gran flexibilidad para capturar, analizar y adquirir datos. En las referencias [1 - 6] se muestran algunas de las múltiples aplicaciones que se están desarrollando con el uso de este software.

El método del lugar geométrico de las raíces en la actualidad se utiliza para obtener el comportamiento y el control de diversos sistemas, en las referencias [7 - 13] se muestran algunos dispositivos que utilizan esta herramienta para elaborar el diseño de compensadores.

Lo que se propone en este artículo es integrar el software de LabView con una herramienta para el diseño de sistemas de control clásico como es el LGDR para el diseño de compensadores de sistemas didácticos y probar estos diseños en línea con una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments.

El LGDR muestra gráficamente información tanto de la respuesta transitoria como de la estabilidad de un sistema de control en lazo cerrado (ver figura 2) y nos permite determinar la ganancia de lazo adecuada para satisfacer una especificación de respuesta transitoria, sin embargo, está limitado a las respuestas que existen a lo largo del lugar geométrico.

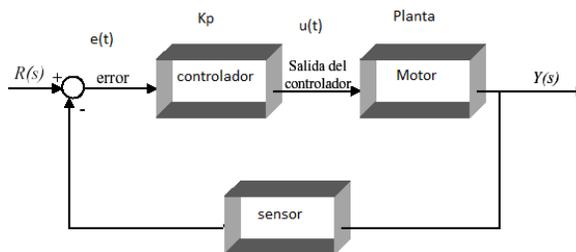


Figura 2. Sistema de control proporcional.

Una opción para obtener respuestas de un sistema diferente a las que existen en el LGDR es modificar el sistema, desafortunadamente esta operación es costosa y contraproducente, dado que el sistema oscila o se vuelve inestable. Otra alternativa es aumentar el sistema o compensarlo como se muestra en la figura 3, de modo que el sistema compensado con polos y ceros adicionales tenga un LGDR que pase por el lugar deseado de los polos dominantes en lazo cerrado para algún valor de la ganancia.

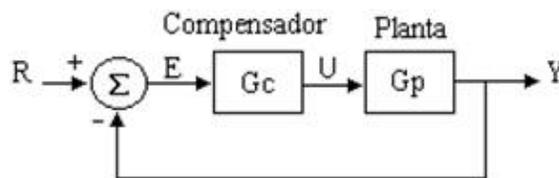


Figura 3. Sistema compensado.

No sólo se usan técnicas de compensación para mejorar la respuesta transitoria de un sistema, también se emplean independientemente para mejorar las características en estado estable. Los compensadores más utilizados son: PI, atraso, PD, adelanto, PID y atraso – adelanto. Para revisar la metodología de diseño ver referencia [14].

## 2. Desarrollo

En la figura 4 se muestra un diagrama de flujo que ilustra el comportamiento del IV para el diseño, simulación y aplicaciones de los compensadores.

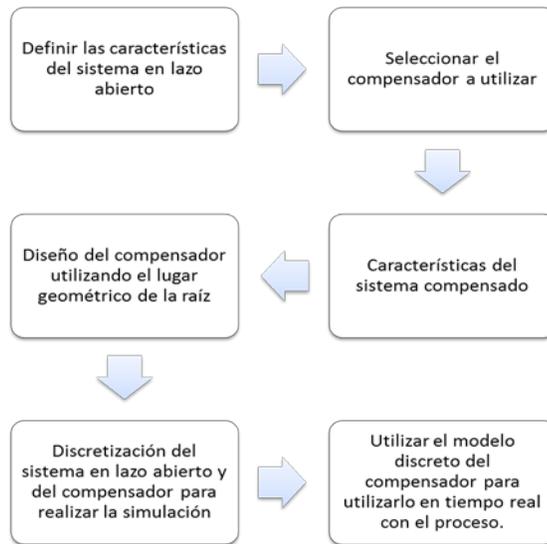


Figura 4. Funcionamiento del IV.

### 3. Resultados

#### Primer caso de estudio

El IV para diseño, simulación e implementación en tiempo real necesita como primer dato la función de transferencia del proceso a controlar. Como este IV tiene un enfoque educativo se decidió utilizar como proceso a controlar un sistema eléctrico RC de segundo orden que se ilustra en la figura 5, aunque esto no restringe su potencial, puesto que funciona para cualquier sistema que cumpla con las características del control clásico.

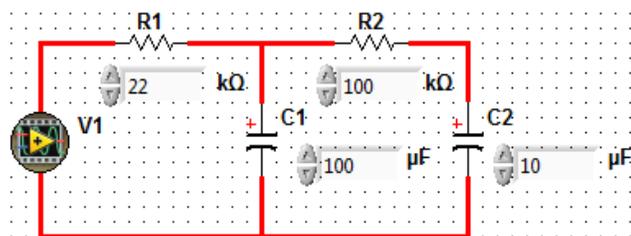


Figura 5. Sistema eléctrico RC de segundo orden.

Al colocar los parámetros del sistema, el IV obtiene su función de transferencia como se ilustra en la ecuación 1. Se considera como entrada una señal escalon de voltaje y como salida el voltaje en C2.

$$G(s) = \frac{1}{2.2s^2 + 3.42s + 1} \quad (1)$$

En la figura 6 se muestra el comportamiento que tiene el modelo del IV contra el comportamiento del modelo real, se aprecia que no existe gran diferencia entre la simulación (línea blanca) y la señal real (línea verde). Para capturar las señales en tiempo real se utiliza la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments NI 6009.

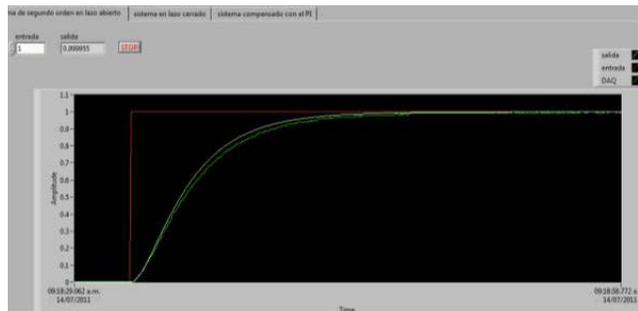
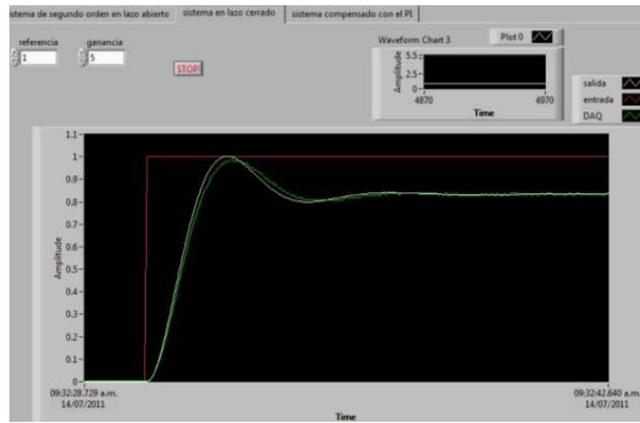


Figura 6. Sistema en lazo abierto.

En la figura 7 se muestra el comportamiento del sistema al aplicarle un controlador automático con una acción de control de proporcional con una ganancia de 5.



**Figura 7. Sistema de control proporcional.**

Para el diseño del compensador PI el IV lo único que requiere es la ubicación del cero del compensador, para este caso de estudio el cero se coloca en 0.01. En la figura 8 y 9 se muestra el comportamiento del sistema compensado. La línea roja es la señal de referencia, la línea verde es el sistema sin compensar (sistema con acción de control proporcional con ganancia de 5) y la línea azul es el sistema en tiempo real compensado. En la figura 8 se aprecia como la respuesta transitoria del sistema no sufrió grandes modificaciones pero con el paso del tiempo el error en estado estable comienza a disminuir hasta ser nulo como se muestra en la figura 9.



**Figura 8. Respuesta transitoria compensador PI.**



Figura 9. Respuesta estable compensador PI.

En el diseño del compensador en atraso el IV requiere del factor de reducción del error en estado estable y seleccionar la ubicación del polo del compensador. El factor de reducción para este diseño es de 20 y la ubicación del polo 0.01. En la figura 10 y 11 se muestra el comportamiento del sistema compensado y se compara con el sistema sin compensar. La línea roja representa la señal de referencia, la línea verde es el sistema sin compensar y la línea azul es el sistema compensado en tiempo real.

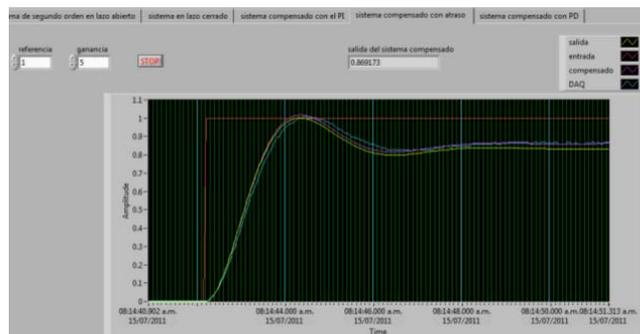
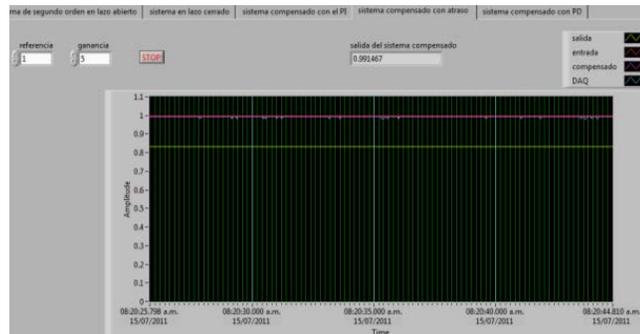


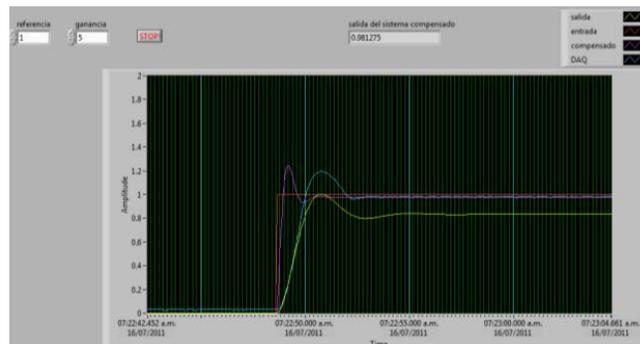
Figura 10. Respuesta transitoria compensador atraso.



**Figura 11. Respuesta estable compensador atraso.**

En el compensador PD se realiza un diseño para obtener un sobrepaso máximo del 15% y una reducción en el tiempo de asentamiento en  $1/3$ . En la figura 12 se muestra el comportamiento del diseño del compensador, la línea roja es la señal de referencia, la línea verde es la respuesta del sistema sin compensar, la línea rosa el sistema compensado en simulación y la línea azul el sistema compensado en tiempo real.

Si se analiza la respuesta del sistema compensado en simulación se observa que el diseño del compensador es correcto pero al utilizarlo en tiempo real se tienen variaciones, ya que la señal de salida de la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) maneja voltajes entre 0 y 5 Volts y la señal de control necesita moverse en un rango de +10 y -5 Volts, esto limita la velocidad de respuesta del sistema.



**Figura 12. Respuesta compensador PD.**

Para el diseño del compensador en adelanto se desea obtener un sobrepaso máximo del 15% y una reducción en el tiempo de asentamiento en 1/3. En la figura 13 se muestra el comportamiento del sistema compensado simulado y en tiempo real contrastándolos con el sistema sin compensar, en este caso sucede lo mismo que en el compensador PD.

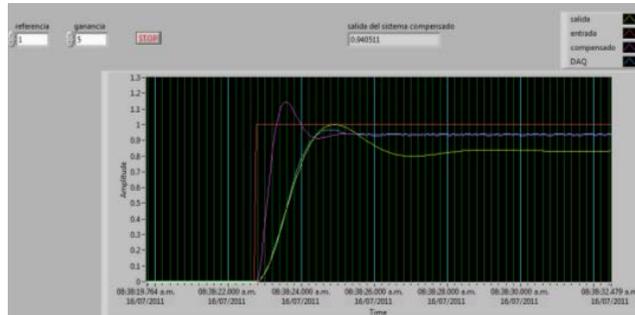


Figura 13. Respuesta compensador adelanto.

Los compensadores descritos anteriormente se pueden combinar para mejorar la respuesta transitoria y la respuesta en estado estable.

#### Segundo caso de estudio

Para demostrar el correcto funcionamiento del IV se utilizó el sistema que se muestra en la figura 14.

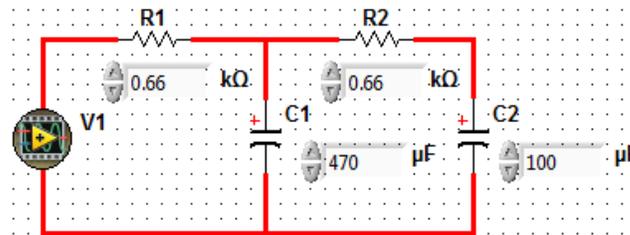


Figura 14. Sistema eléctrico RC de segundo orden.

Se prueban los sistemas en lazo abierto para analizar el sistema en simulación y el sistema en tiempo real. El funcionamiento se muestra en la figura 15.

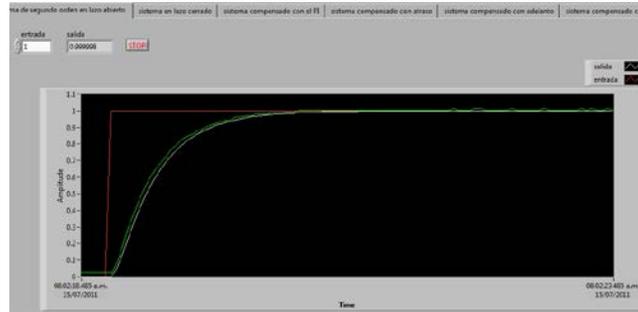


Figura 15. Sistema en lazo abierto.

Al aplicar un control proporcional con una ganancia de 4 se obtiene el comportamiento que se muestra en la figura 16.

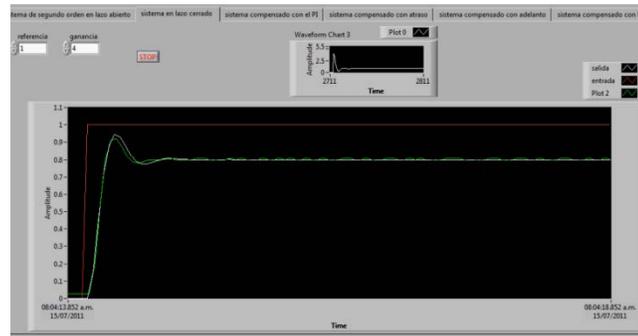


Figura 16. Control proporcional.

El compensador en atraso se diseñó para una reducción del error en estado estable de 10 y la ubicación del polo en 0.01. En la figura 17 y 18 se puede observar el comportamiento del sistema compensado y sin compensar. La respuesta en el estado transitorio es casi igual, pero el error en estado estable disminuye de manera considerable.

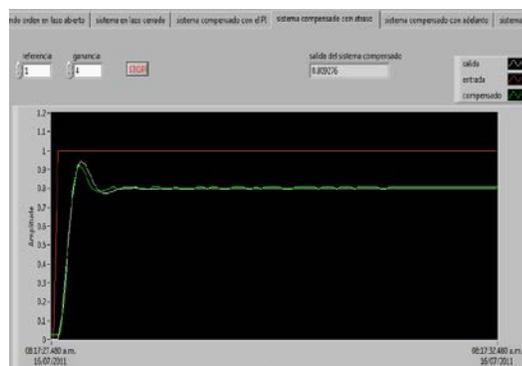


Figura 17. Respuesta transitoria compensador atraso.

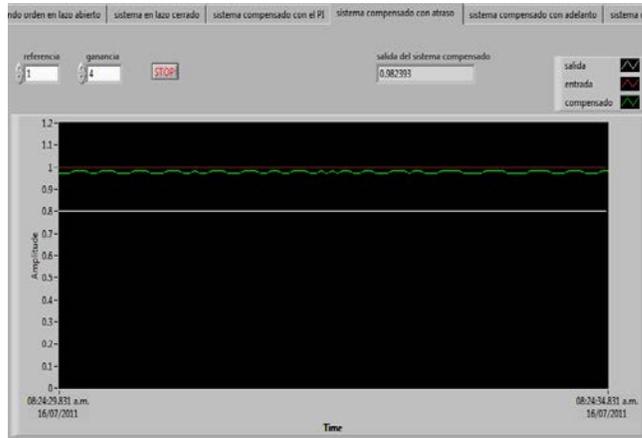


Figura 18. Respuesta estable compensador atraso.

El compensador en adelanto se diseñó para reducir el tiempo de asentamiento a la mitad. Se puede apreciar en la gráfica la señal compensada en color verde, esta gráfica se estabiliza mucho mas rápido pero aumenta el error de manera significativa. La respuesta se ilustra en la figura 19.

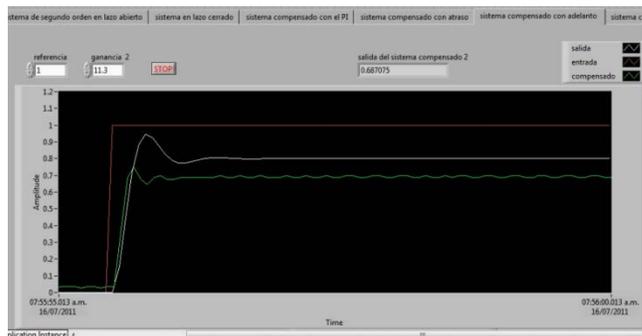


Figura 19. Respuesta compensador adelanto.

#### 4. Conclusiones

El uso de compensadores abre un campo de posibles soluciones en diferentes aplicaciones, ya que con el control se puede aprovechar mejor cualquier sistema, haciéndolo más eficiente. Mediante la DAQ se pueden implementar acciones de control

de una manera fácil y directa para manipular sistemas. LabVIEW y MATLAB son herramientas matemáticas y gráficas que nos permite realizar simulaciones y diseños de cada una de las etapas para obtener el modelo de un sistema y su correspondiente control.

Si se realiza un contraste entre las respuestas que arroja el sistema en simulacion y el sistema implementado en tiempo real, se puede considerar que el sistema en tiempo real tiene retardos debidos a las características de salida de voltaje de la DAQ.

La propuesta es una herramienta que puede funcionar adecuadamente para sistemas con una velocidad menor a 1 milisegundo y las restricciones de voltaje de la salida de la DAQ se pueden corregir con una etapa de acondicionamiento de señal.

## **5. Referencias**

- [1] Y. Xiong, B. Quin, M. Wu. "LabVIEW AND MATLAB-BASED VIRTUAL CONTROL SYSTEM FOR VIRTUAL PROTOTYPING OF CYCLOTRON" Proceedings of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA, 2007. Pag. 281 – 283.
  
- [2] C. Zhang, Z. Wang. "Design of the Control System for Hidraulic Experimental Bench based on LabVIEW". 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology. Pag. 2128 – 2130.
  
- [3] H. Ali, M. Hussein, B. Ismael. "LabVIEW FPGA Implementation Of a PID Controller For D.C. Motor Speed Control". 2010 1st International Conference on Energy, Power and Control (EPC-IQ), College of Engineering, University of Basrah, Basrah, Iraq, November 30 - December 2, 2010. Pag. 139 – 144.

- [4] C. Chen, F. Hu. "Design of Measurement and Control System for Sling Stretch Test Machine Based on LabVIEW". 2010 2nd International Conference on Industrial Mechatronics and Automation. Pag. 389 – 392.
- [5] A. Upadhyay, A. Agarwal. "Controller Design and Analysis for Automation of Chemical Water Treatment System". 2008 10th Intl. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision Hanoi, Vietnam, 17–20 December 2008. Pag. 1625- 1629.
- [6] X. Xing, S. Jiang. "The Realization of Automatic Control Theory Virtual Experiment System Based On LabVIEW and MATLAB". 2010 International Conference On Computer Design And Appliations (ICCD A 2010). Pag. 47 – 50 V3.
- [7] L. Guo, M. Nelms. "Digital Controller Design for Buck and Boost Converter:s Using Root Locus Techniques". Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE. 2-6 Nov. 2003. Pag. 1864 – 1869.
- [8] Y. Wei. "WLEDING HEAD CONTROL ANALYSIS BASED ON THE ROOT LOCUS METHOD" Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2011 Second International Conference on 15-17 July 2011. Pag. 936 – 939.
- [9] J. Chen, K. LIU. "Modeling and Low Power Control of Active Magnetic Bearings System". Proceedings of 2011 International Conference on Modelling, Identification and Control, Shanghai, China, June 26-29, 2011. Pag. 319 – 324.

- [10] S. Ching. "Root Locus for Random Reference Tracking in Systems With Saturating Actuators". IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, VOL. 54, NO. 1, JANUARY 2009. Pag. 79 – 91.
- [11] Q. Zhang, C. Messner. "Root Locus Design with Complex Proportional-Integral-Lead Compensation". 2011 American Control Conference on O'Farrell Street, San Francisco, CA, USA June 29 - July 01, 2011. Pag. 693 – 698.
- [12] M. Akhtaruzzaman, A. Shafie. "Modeling and Control of a Rotary Inverted Pendulum Using Various Methods, Comparative Assessment and Result Analysis". Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation August 4-7, 2010, Xi'an, China. Pag. 1342 – 1347.
- [13] T. Emami, M. Watkins. "A Unified Procedure for Continuous-Time and Discrete-time Root-Locus and Bode Design". Proceedings of the 2007 American Control Conference Marriott Marquis Hotel at Times Square New York City, USA, July 11-13, 2007. Pag. 2509 – 2514.
- [14] Norman S. Nise; Sistema de Control para Ingeniería; Editorial Patria, Tercera Edición, 2009, pp. 422 – 585.