

Diseño de Herramientas Didácticas Enfocadas al Aprendizaje de Sistemas de Control Utilizando Instrumentación Virtual

J. Martínez ^a, A. Padilla ^{b*}, E. Rodríguez ^b, A. Jiménez ^a, H. Orozco ^c

^a Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya, Guanajuato, México.

^b Departamento de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya, Guanajuato, México.

^c Departamento de Ingeniería Mecánica, Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya, Guanajuato, México.

Resumen

En este artículo se describe el diseño de tres herramientas didácticas enfocadas al aprendizaje de sistemas de control implementadas en el software de instrumentación virtual LabVIEW. Estas herramientas están dirigidas al análisis de estabilidad en sistemas de control, el diseño de compensadores utilizando la técnica del lugar geométrico de las raíces y el diseño de compensadores utilizando la técnica de respuesta en frecuencia con trazas de Bode. Cada una de estas herramientas didácticas cuenta con una interfaz gráfica amigable con el usuario. La ventaja de estas herramientas didácticas es que incluyen opciones para realizar simulación en las áreas de control que software especializado no tiene.

Palabras Clave:

Estabilidad, Simulación de Sistemas, Educación en Control, Laboratorio Virtual.

1. Introducción

El diseño de sistemas de control en carreras como Ingeniería Electrónica y Mecatrónica es importante por la cantidad de procesos que requieren el control en aplicaciones como procesos químicos, convertidores electrónicos de potencia, máquinas eléctricas, vehículos y máquinas de control numérico, entre otras.

La asignatura de Control en los programas de estudio de las carreras antes mencionadas se incluye con el objetivo de que los alumnos desarrollen las competencias para implementar el control lineal de sistemas dinámicos considerando conceptos teóricos como: estabilidad, margen de error, rapidez, robustez, y optimización, los cuales son considerados con especial atención contemplando el enfoque clásico en el tratamiento de las señales del proceso de control.

Las competencias principales de esta asignatura son: 1) analiza la estabilidad de Sistemas Dinámicos, Lineales e Invariantes en el Tiempo (SDLIT) utilizando el criterio de Routh-Hurwitz (R-H); 2) diseña compensadores clásicos de SDLIT utilizando la herramienta de diseño del Lugar Geométrico de las Raíces (LGR); y 3) diseña compensadores clásicos de SDLIT utilizando el dominio de la frecuencia con las trazas de Bode. El desarrollo de estas competencias se facilita con el uso de una herramienta computacional para realizar tareas de análisis, diseño e implementación de los sistemas de control.

* Autor en correspondencia.

Correo electrónico: alfredo.padilla@itcelaya.edu.mx (A. Padilla),
juan.martinez@itcelaya.edu.mx (J. Martínez)

Una alternativa frecuentemente utilizada para el desarrollo de dichas tareas es el software de instrumentación virtual LabVIEW, el cual también puede ser útil en el monitoreo y control de sistemas compensados.

En este trabajo se presenta el diseño de un Instrumento Virtual (IV) implementado en LabVIEW que contempla tres herramientas didácticas enfocadas a mejorar el proceso enseñanza-aprendizaje en la asignatura de Control que se imparte en las Ingenierías Mecatrónica y Electrónica.

La primera herramienta didáctica es útil para llevar a cabo el análisis de estabilidad en sistemas de control utilizando el criterio de R-H. La ventaja de esta herramienta es que, además de definir la estabilidad del sistema, representa gráficamente los polos y ceros de la función de transferencia así como la respuesta del sistema ante una entrada escalón; además, es posible obtener parámetros de la respuesta como tiempo pico, tiempo de asentamiento, sobrepaso y valor pico.

La segunda herramienta didáctica es útil para el diseño de compensadores utilizando el LGR. los compensadores que se diseñan con esta herramienta son: Proporcional (P), Proporcional-Integral (PI), Proporcional-Derivativo (PD), Proporcional-Integral-Derivativo (PID), Compensador en Atraso, Compensador en Adelanto y Compensador en Atraso-Adelanto. Además de realizar los diseños y las simulaciones en base a los requerimientos, con esta herramienta es posible discretizar el compensador diseñado y operar en línea con el proceso propuesto utilizando como adquisidor de datos la tarjeta de National Instruments USB-6008.

La tercera herramienta didáctica es útil para el diseño de compensadores utilizando aproximaciones asintóticas de trazas de

Bode. Los compensadores que se pueden diseñar son: Ajuste de Ganancia, Compensador en Atraso, Compensador en Adelanto y Compensador en Atraso–Adelanto. Con esta herramienta se conoce la ubicación de los polos en lazo cerrado del sistema, los valores de ganancia que permiten estabilizar el sistema de control y los parámetros de respuesta ante una entrada escalón unitario.

2. Estado del Arte

Aplicaciones didácticas de monitoreo de sistemas fotovoltaicos utilizando LabVIEW han sido reportadas en la literatura (Dorin y Dumitru, 2008). En el área de sistemas de control, Armstrong et al. (2008), proponen monitorear parámetros de carga y descarga de una batería mediante un algoritmo de control diseñado en LabVIEW para mantener la carga óptima de la batería. Aissou et al. (2015) presentan una aplicación de modelado y control para un sistema híbrido empleando un convertidor de potencia CD-CA que consta de fuentes de energía eólica y fotovoltaica, un banco de baterías para almacenar energía y diferentes tipos de cargas.

Regresando al ámbito educativo, existen retos debido a la globalización y a los rápidos avances científicos y tecnológicos (Ferreira y Velosa, 2007). Consecuentemente, las instituciones de los diversos niveles educativos buscan mejorar los procesos de enseñanza-aprendizaje en distintas áreas del conocimiento. Vasco et al. (2011), presentan herramientas computacionales como una posibilidad de mejorar los conceptos aprendidos en la educación primaria. En este mismo nivel educativo Karp et al. (2010), utilizan el kit de desarrollo de LEGO NXT con el fin de motivar a los niños a estudiar una ingeniería; en (Kwon et al., 2012) se propuso una herramienta de software para facilitar que los niños desarrollen la lógica de programación robótica.

En (Bareno, 2011) se presentó una metodología de enseñanza del diseño de sistemas embebidos utilizando herramientas de software libre y hardware con la finalidad de mejorar las habilidades de concebir, diseñar, implementar y operar sistemas digitales en estudiantes de Ingeniería. Gomez et al. (2013), presentan el diseño, implementación y evaluación de un curso de sistemas digitales embebidos en FPGA impartido por primera vez en la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán, Argentina. Donde se obtuvieron resultados alentadores, lo que invita a extenderlo a otras unidades académicas.

En (Ordinez y Alimenti, 2013) se propone un enfoque constructivista para la enseñanza de sistemas embebidos en Ingeniería Electrónica y de Cómputo, haciendo especial énfasis en el aprendizaje basado en problemas. Estos enfoques centran el proceso educativo en el alumno, quien será el principal responsable de su aprendizaje. En (Santos y Figueroa, 2015) se presenta un simulador electromagnético computacional con la intención de mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje en Ingeniería de Telecomunicaciones.

En (Gomez et al., 2011) se proponen trabajos de laboratorio y concursos dirigidos a estudiantes de segundo grado de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de Málaga, así como de Automatización y Electrónica Industrial para la Universidad Técnica de Dresden, Alemania; las propuestas se basan en el uso del kit LEGO Mindstorms NXT y el software LabVIEW, logrando que los estudiantes mostraran un nivel de motivación alto y gran interés por el aprendizaje. Con la misma tecnología, Gomez et al. (2015), proponen el desarrollo de un proyecto de laboratorio de robótica móvil para introducir a los estudiantes de

Ingeniería Mecatrónica al diagnóstico de fallas en sistemas mecatrónicos.

Después de una exhaustiva revisión de estado del arte referente a aplicaciones educativas para la simulación, monitoreo y control de sistemas y procesos es posible concluir que el software de instrumentación virtual LabVIEW es uno de los más utilizados en la actualidad. En (Jiménez et al., 2005) se presentó un nuevo enfoque para la enseñanza experimental de convertidores electrónicos de potencia a nivel licenciatura, el cual se basa en una plataforma de software y hardware reconfigurable diseñada en LabVIEW. En (Rodríguez et al., 2011) se utilizó LabVIEW para analizar y controlar la velocidad de un motor trifásico en un curso de Ingeniería, permitiendo a los estudiantes emplear hardware de bajo costo. En (Zhan et al., 2014) se utilizó la plataforma de LabVIEW para mejorar el aprendizaje de los estudiantes en el área de comunicación digital, convirtiéndose en un elemento central de la integración curricular para el programa de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad A&M de Texas. En (Rasheduzzaman et al., 2014) se presenta el diseño de un laboratorio para el control de una microred en LabVIEW con el objetivo de coordinar los sistemas generadores de energía. Esta herramienta se utiliza en cursos de Ingeniería de Potencia en la Universidad de Ciencia y Tecnología de Missouri.

Otra tendencia en la actualidad es el uso de los laboratorios remotos, en (Kyomugisha et al., 2015) se presenta el diseño e implementación de un laboratorio remoto de un sistema fotovoltaico basado en iLabs Shared Architecture (ISA). Este considera un simulador solar que proporciona la irradiación solar a un panel solar; se utiliza un NI ELVIS II+ para adquirir el voltaje y corriente del panel solar y el software LabVIEW para el diseño de la interfaz de usuario. Con este sistema se generaron laboratorios en línea para la universidad Makerere, contando con esta herramienta para los cursos de tecnologías de energías renovables que no existía en su laboratorio. Con el objetivo de mejorar el estudio de sensores en el área de robótica móvil a nivel Ingeniería, en (Balamuralithara y Woods, 2009) se describe el diseño e implementación de un laboratorio virtual y remoto basado en las plataformas de JAVA y LabVIEW. Este laboratorio permite al usuario trabajar desde su hogar, teleoperando un robot real que toma mediciones de los sensores o utilizando una plataforma virtual para desarrollar algoritmos de control y después aplicarlos. En (Chaos et al., 2013) se presentó una discusión sobre la tendencia de los laboratorios virtuales aplicados a nivel ingeniería. Dentro de la investigación realizada se presenta una lista de instituciones de nivel superior que cuentan con laboratorios virtuales como son: Universidad de Oeste de Australia, Universidad del Estado de Carolina del Norte e Instituto Tecnológico de Massachusetts, entre otras.

3. Funcionamiento de las Herramientas Didácticas

Las herramientas didácticas propuestas se orientan a alumnos de octavo semestre de las carreras de Ingeniería Mecatrónica y Electrónica que cursan las asignaturas de Control y Control II, respectivamente.

En Ingeniería Mecatrónica se imparten dos asignaturas del área de control, la primera es la asignatura de Dinámica de Sistemas, donde los alumnos desarrollan el modelo matemático de sistemas físicos para predecir y describir su comportamiento. Además, determinan funciones de transferencia de sistemas para obtener la respuesta del sistema de manera analítica y por medio

de simulación. Con esta asignatura se desarrollan las competencias previas necesarias para la asignatura de Control. La competencia general de la asignatura de Control es “Aplica los métodos del LGR y de respuesta en frecuencia para el diseño de compensadores que mejoren la respuesta en lazo cerrado de un sistema de control”. En la carrera de Ingeniería Electrónica se imparten dos asignaturas con los mismos objetivos, pero con nombres diferentes. Las asignaturas Dinámica de Sistemas y Control de Ingeniería Mecatrónica corresponden a las asignaturas Control I y Control II de Ingeniería Electrónica, respectivamente.

Las prácticas de laboratorio en las asignaturas de Control y Control II están orientadas a “diseñar, simular e implementar controladores y compensadores aplicados en sistemas de control realimentado utilizando software que incluya temas de estabilidad, LGR y bode”. Para el desarrollo de competencias y la elaboración de prácticas a nivel simulación de manera tradicional se realizan tareas por separado utilizando el software Matlab. Al utilizar las herramientas propuestas, la información que se obtiene con Matlab de forma aislada está disponible en una misma interfaz gráfica desarrollada en el software de instrumentación virtual LabVIEW. Previo al uso de las herramientas propuestas el docente corrobora que los alumnos: 1) comprendan los conceptos básicos de estabilidad, el método del LGR y las trazas de bode, 2) interpreten adecuadamente la información que se obtiene al aplicar los métodos de diseño de compensadores, y 3) dominen la metodología de diseño para mejorar la respuesta en lazo cerrado de un sistema de control utilizando compensadores en serie. Posteriormente, se motiva a los alumnos a comprobar sus resultados utilizando la herramienta propuesta en un proceso real para que desarrollen sus habilidades de experimentación con la finalidad de facilitar la conceptualización de lo observado.

La metodología docente utilizada y que ha dado resultados positivos en el aprendizaje y motivación en estudiantes que cursan la asignatura de Control se describe a continuación: 1) el profesor pide a los alumnos que realicen la lectura de tres artículos relacionados con la estabilidad y control de sistemas, esto con la finalidad de familiarizarse con la terminología empleada, 2) posteriormente, en el aula se discute sobre las lecturas con la finalidad de que el profesor aclare los conceptos relevantes. Cuando los alumnos comprenden los conceptos básicos de estabilidad y diseño de sistemas de control se realizan ejercicios muestra en clases y se dejan ejercicios extra-clase, 3) una vez que los alumnos intentan resolver estos ejercicios se tiene una sesión de dudas donde, además de resolver estos ejercicios, se hace hincapié en utilizar los conceptos básicos de la teoría de control, 4) la siguiente etapa es la simulación, utilizando las herramientas didácticas propuestas en este trabajo, de los sistemas de control diseñados previamente, 5) finalmente, la herramienta didáctica propuesta se utiliza para aplicar los sistemas de control diseñados en un proceso real utilizando una tarjeta de adquisición de datos. A continuación, se describe el uso de cada una de las herramientas propuestas, incluyendo ejemplos de aplicaciones.

3.1. Estabilidad por el Método de Routh-Hurwitz

La estabilidad es la característica más importante en un sistema de control y puede ser determinada por los Polos en Lazo Cerrado (PLC) de una Función de Transferencia (FT). Mientras los PLC se encuentren en el semiplano izquierdo del plano complejo s el sistema se comportará de manera estable; sin embargo, si existe uno o más polos en el semiplano derecho del plano complejo s , el sistema será inestable. En sistemas de control

con FT muy extensas, la labor de buscar los PLC se vuelve complicada o imposible de realizar, para esto se utiliza el método de Routh-Hurwitz (R-H), con el cual se obtiene la ubicación en el plano complejo de los PLC. El método de R-H requiere de dos pasos fundamentales, el primero es generar una tabla de datos llamada arreglo de Routh y el segundo paso es la interpretación de dicha tabla (Nise, 2009a). Cuando se trabaja con la comprensión e interpretación del concepto de estabilidad de sistemas de control utilizando el criterio de R-H se realizan ejercicios matemáticos utilizando la metodología de dicho criterio. Para la simulación se sugiere el uso de herramientas de Matlab que permiten corroborar los resultados obtenidos en el proceso matemático. Por ejemplo, el comando `roots.m` permite calcular la ubicación de los polos de una ecuación característica; posteriormente, en simulink se realiza la simulación para comprobar la respuesta del sistema ante una entrada escalón.

El IV diseñado para la simulación y análisis de estabilidad de sistemas de control se basa en el criterio de R-H. La ventaja de esta herramienta de simulación es que, además de completar la tabla de Routh, es posible definir la ubicación de los polos y ceros para determinar la estabilidad del sistema. Además, es posible obtener: 1) una representación gráfica de los polos y ceros de la FT en lazo cerrado del sistema, 2) la respuesta del sistema ante una entrada escalón, y 3) para sistemas estables, parámetros de la respuesta transitoria como sobrepaso, valor pico, tiempo pico y tiempo de asentamiento. De esta manera, los alumnos obtienen un panorama amplio del comportamiento de un sistema estable e integran diversos conceptos con una sola herramienta de simulación. El IV cuenta con cuatro pestañas, la primera pestaña muestra las instrucciones de uso del IV, la segunda pestaña se utiliza para introducir la FT de la forma $G(s)H(s)$, la tercer pestaña de la forma $G(s)$ y la última pestaña sólo la función tipo $D(s)$ (Ogata, 2010). En la Fig. 1 se muestra la pantalla de inicio del IV.

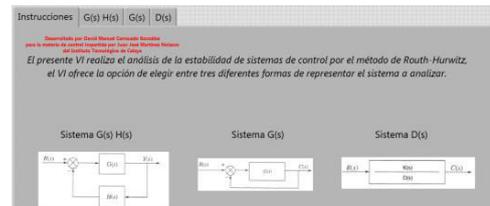


Figura 1: Panel frontal del IV para el análisis de estabilidad.

A continuación, se describen cuatro casos de estudio para realizar el análisis de estabilidad de sistemas de control utilizando el IV propuesto.

Primer Caso de Estudio

En el primer caso se trabaja con la FT $G(s)H(s)$. En la Fig. 2A se presentan las funciones empleadas (el IV acepta funciones de n grado) y la reducción que realiza el IV para obtener la FT en lazo cerrado $T(s)$. Con $T(s)$ el IV obtiene la ecuación característica $D(s)$ para determinar el arreglo de Routh y con este, obtener la estabilidad del sistema. En la Fig. 2B se presenta el arreglo de Routh, la ubicación de los polos en lazo cerrado y la estabilidad del sistema. En este ejemplo se aprecia que el sistema es inestable con dos polos del lado derecho del eje $j\omega$, esto debido a los dos cambios de signo que se tienen en la primera columna del arreglo de Routh. La ubicación de los polos y ceros en lazo cerrado del sistema se ilustran en la Fig. 2C. La Fig. 2D muestra la respuesta

del sistema ante una entrada escalón, debido a que el sistema es inestable no es posible determinar los parámetros de la respuesta transitoria.

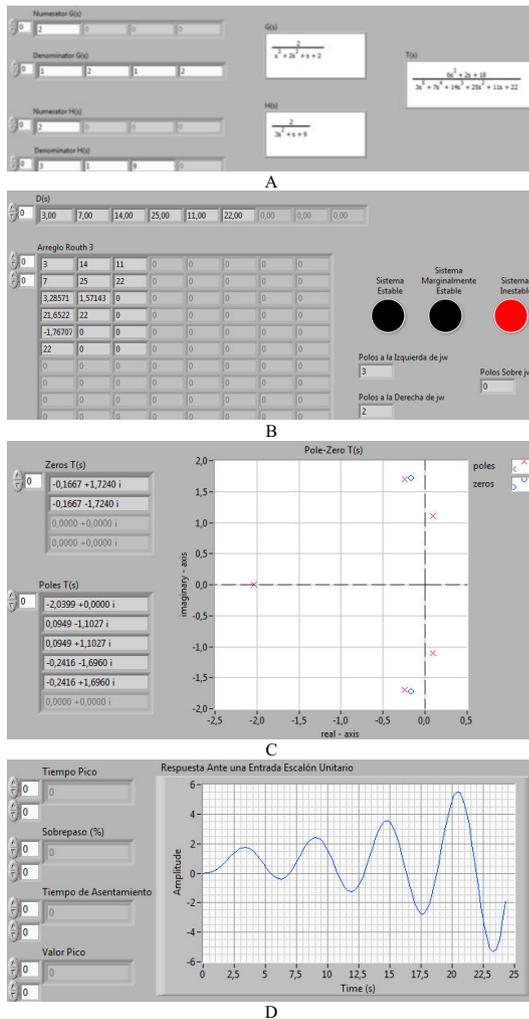


Figura 2: A) Introducción y reducción de funciones. B) Función $D(s)$, arreglo de Routh y estabilidad. C) Ubicación de los polos y ceros de la función $T(s)$. D) Respuesta ante una entrada escalón unitario.

Segundo Caso de Estudio

En este caso se trabaja con la FT $G(s)$ y retroalimentación unitaria negativa. Con la FT $G(s)$ se obtiene la FT $T(s)$ que se presenta en la Fig. 3A. Una vez que se tiene $T(s)$, el IV determina $D(s)$, el arreglo de Routh, la ubicación de los polos y la estabilidad del sistema. Para este ejemplo el sistema es estable con tres polos en lazo cerrado del lado izquierdo de $j\omega$ (Fig. 3B). La ubicación de los polos en lazo cerrado se muestra en la Fig. 3C. Finalmente, en la Fig. 3D se ilustra el comportamiento del sistema estable ante una entrada escalón unitario y los parámetros de la respuesta transitoria del sistema.

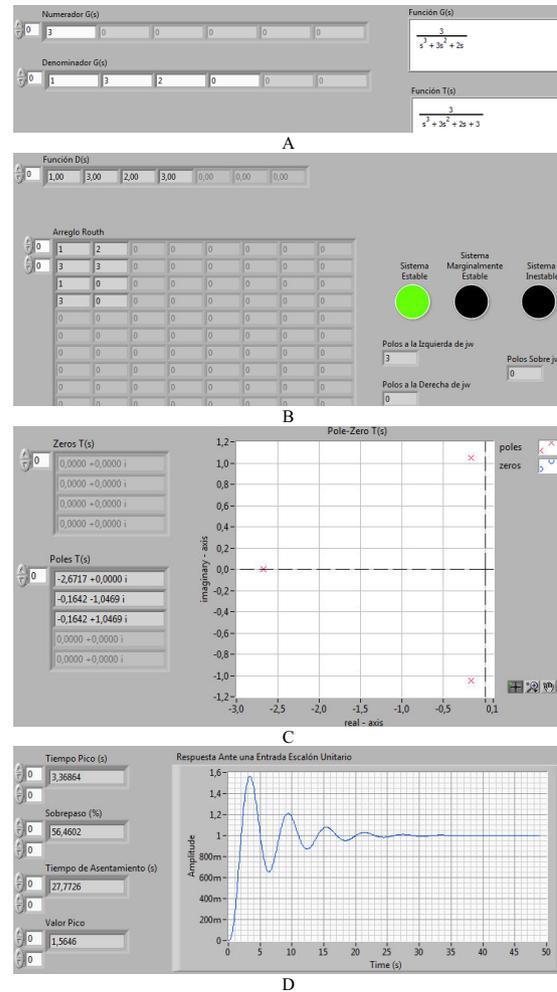


Figura 3: A) Función $G(s)$ y $T(s)$. B) Arreglo de Routh y estabilidad del sistema. C) Polos y ceros de la función en lazo cerrado. D) Respuesta escalón unitario del sistema.

Tercer Caso de Estudio

En el análisis de estabilidad utilizando el criterio Routh existen dos casos especiales considerados en el diseño del IV (Nise, 2009a). En este caso de estudio se trabaja con la tercera opción del IV, introduciendo los coeficientes de la ecuación característica $D(s)$. Además, se considera el caso especial donde existe un cero en la primera columna de una fila. La Fig. 4A muestra los coeficientes de la ecuación $D(s)$ empleados para este ejemplo. Como es un caso especial, el IV habilita una nueva opción donde el valor de cero que se encuentra en la tercera fila se sustituye por un valor de ϵ pequeño que puede ser negativo o positivo. La Fig. 4B presenta los arreglos de Routh, la cantidad de polos del lado derecho de $j\omega$ y la estabilidad del sistema. Como la intención es que los alumnos refuercen sus conocimientos con esta herramienta se realizan los análisis para valores de ϵ negativos y positivos, obteniendo los mismos resultados.

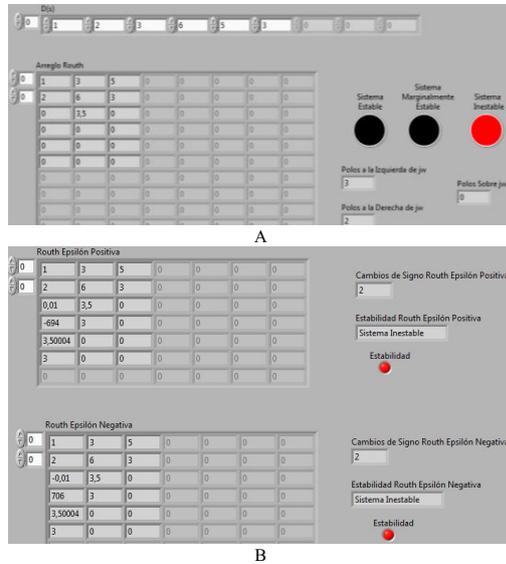


Figura 4: A) Función $D(s)$ con caso especial 1. B) Arreglos de Routh con epsilon positiva y negativa.

Cuarto Caso de Estudio

Para este caso se trabaja con el caso especial 2, donde en el arreglo de Routh todos los elementos de un renglón son cero y se introducen los coeficientes de la ecuación característica $D(s)$, obteniendo el análisis que se ilustra en la Fig. 5A. En este análisis se determina que el sistema es marginalmente estable con un polo a la izquierda de jw y cuatro polos sobre el eje jw . Para realizar el arreglo de Routh se obtiene un polinomio par que surge al encontrar un renglón de ceros, este polinomio se presenta en la Fig. 5B.

3.2. Diseño de Compensadores Utilizando el LGR

En el diseño de sistemas de control se consideran tres características importantes: 1) la estabilidad del sistema, 2) la respuesta en estado estable, y 3) la respuesta transitoria. La estabilidad y la respuesta transitoria del sistema las determina la ubicación de los PLC, la ubicación de los PLC determina características importantes de la respuesta del sistema como: sobrepaso máximo, tiempo de asentamiento y tiempo pico. Una alternativa de diseño de sistemas de control que contempla la ubicación de los PLC de un sistema es el LGR. El LGR muestra gráficamente información de la estabilidad y la respuesta transitoria de un sistema en lazo cerrado. Además, 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 LGR. Una opción para obtener respuestas de un sistema diferente a las que existen en el LGR es aumentar el sistema o compensarlo, de modo que el sistema compensado con polos y ceros adicionales tengan un LGR que pase por el lugar deseado de los polos dominantes en lazo cerrado para algún valor de la ganancia. 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 (Nise, 2009b). El IV propuesto para el diseño de compensadores

que mejoren la respuesta en lazo cerrado de un sistema de control con el LGR integra tres posibilidades: 1) diseñar, mediante un sistema RC de segundo orden que facilite la implementación física, un compensador en base a las características de la respuesta solicitada, 2) mostrar resultados en simulación comparando la respuesta del sistema sin compensar y el sistema compensado, y 3) comprobar experimentalmente el comportamiento del compensador diseñado y comparar los resultados experimentales con los obtenidos en simulación.

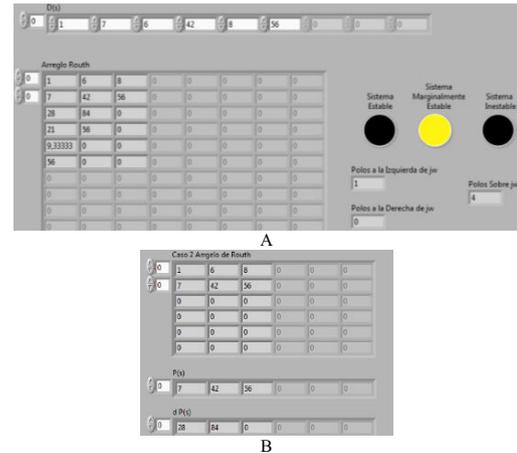


Figura 5: A) Función con caso especial 2. B) Arreglo de Routh con renglón de ceros, $P(s)$ y $dP(s)$.

En la Fig. 6 se presenta la interfaz del IV para definir los valores de las resistencias y capacitancias del circuito RC de segundo orden empleado durante el diseño de los compensadores que a continuación se describen.

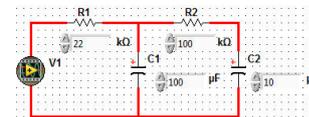


Figura 6: Sistema eléctrico RC de segundo orden.

Para realizar la selección de los valores de resistencias y capacitancias es necesario que los alumnos de forma manual calculen la FT del sistema y determinen las características de la respuesta transitoria del mismo. Esto con la finalidad de que la tarjeta de adquisición de datos empleada para el monitoreo sea capaz de percibir los cambios en el sistema. Se sugiere utilizar sistemas con tiempos de asentamiento en el orden de segundos.

Al ingresar los valores de las resistencias y capacitancias, el IV obtiene la FT del proceso considerando el voltaje $V1$ como entrada y el voltaje en $C2$ como salida (Ver Fig. 6). Posteriormente, el IV discretiza la FT con la finalidad de simular el comportamiento del proceso y compararlo con el comportamiento del prototipo experimental en tiempo real.

Una vez que se define el proceso es necesario implementar el circuito empleando componentes de los mismos valores a los agregados en el IV. En la Fig. 7 se muestra el circuito y la tarjeta de adquisición de datos utilizados para la elaboración de los ejemplos que se presentan en esta sección. La tarjeta de adquisición de datos NI-6008 es la encargada de monitorear el comportamiento del voltaje en $C2$ y entregar el voltaje necesario en $V1$. La interacción del IV con el proceso es en línea, esto significa que los cambios que suceden en el proceso son

visualizados en los indicadores gráficos, y al mismo tiempo comparado con el comportamiento del sistema discretizado.

La primera tarea que es posible realizar con esta herramienta es conocer el comportamiento del sistema en lazo abierto, en el cual el voltaje V_1 es la entrada del sistema y el voltaje en C_2 es la salida (Ver Fig. 6).

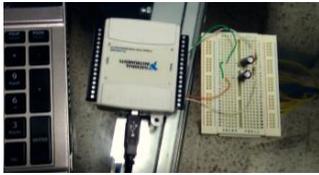


Figura 7: Sistema físico del circuito RC.

En la Fig. 8 se compara el comportamiento del modelo simulado con el comportamiento del sistema real ante un cambio escalón en la entrada, se aprecia que no existe gran diferencia entre la simulación y la señal del proceso. La diferencia en el comportamiento del sistema simulado y el sistema en tiempo real es debido a que los valores de los resistores y capacitores tienen tolerancia del 5 % y 20 %, respectivamente, y por otro lado a la discretización que se realiza de la FT del modelo del proceso.

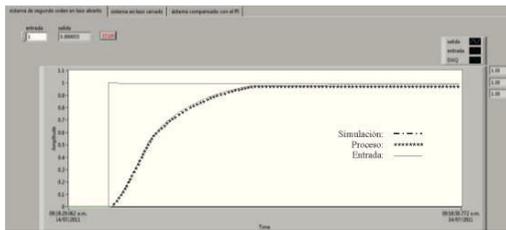


Figura 8: Sistema en lazo abierto.

Antes de iniciar con el diseño de compensadores se utiliza el sistema RC de segundo orden como proceso (sistema real) en un sistema de control en lazo cerrado con acción de control P. Para el caso presentado se emplea una ganancia proporcional de 5. En este caso el IV funge como acción de control y la tarjeta de adquisición realiza la comunicación entre el circuito RC y el IV. En la Fig. 9 se presenta el comportamiento del sistema real y se compara con la simulación. Con esta respuesta se pueden obtener parámetros de la respuesta transitoria como tiempo pico de 2.2 segundos, tiempo de asentamiento de 5 segundos y un sobrepaso máximo de 18.8 %. Además, se tiene un error en estado estable de 0.1675 V. Este sistema se utiliza para el diseño de compensadores y se le denomina sistema no compensado. La finalidad de los compensadores que se presentan a continuación, es generar una mejora de la respuesta transitoria de sistemas de control realimentados, así como del error en estado estable.

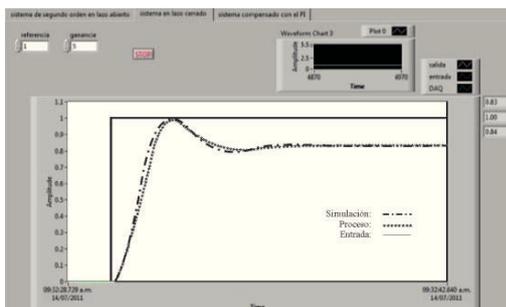
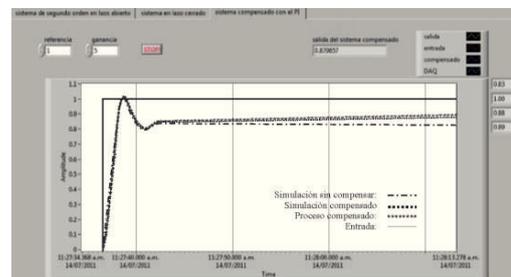


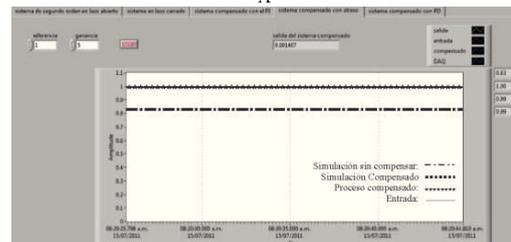
Figura 9: Sistema de control proporcional.

Compensador PI

Una opción para mejorar la respuesta en estado estable es utilizar un compensador PI, el objetivo de este compensador es eliminar el error y no modificar la respuesta transitoria del sistema original. Para el diseño de este compensador es necesario agregar la ubicación del cero del compensador, debido a que el polo se encuentra ubicado en el origen del plano s . Con esta herramienta se pretende que los alumnos comprendan los efectos de la ubicación del cero del compensador, sabiendo que mientras más cerca este del origen, menos se modifica la respuesta transitoria del sistema no compensado, pero el tiempo para eliminar el error en estado estable crece. De lo contrario, mientras más alejado del origen se coloque el cero del compensador, la eliminación del error es rápida pero la respuesta transitoria del sistema sufre modificaciones. En la Fig. 10A se muestra el comportamiento del sistema experimental compensado seleccionando la ubicación del cero en -0.01 . En esta grafica se presentan las señales que describen el comportamiento de los siguientes sistemas: 1) sistema sin compensar en simulación, 2) sistema compensado en simulación, y 3) sistema compensado funcionando en línea con el prototipo experimental. Para el prototipo experimental el compensador es diseñado y discretizado por el IV, y funciona en línea con el sistema RC por medio de la tarjeta de adquisición de datos. La Fig. 10B muestra el comportamiento del sistema en estado estable, se aprecia que el error en estado estable se elimina.



A



B

Figura 10: A) Respuesta transitoria con el compensador PI. B) Respuesta en estado estable del compensador PI.

Compensador en Atraso

El compensador en atraso es otra opción para mejorar la respuesta en estado estable de un sistema de control. A comparación del compensador PI, el compensador en atraso no elimina totalmente el error en estado estable pero si lo disminuye sin afectar la respuesta transitoria del sistema. Para el diseño, el usuario debe definir el factor de reducción del error y la ubicación del polo del compensador. Con esta información el IV calcula la ubicación del cero del compensador y realiza la discretización del compensador para operar en línea con el proceso al igual que en

el compensador PI. El sistema sin compensar presenta un error en estado estable de 0.1675 V y se desea que el error sea de 0.0083 V , para esto se necesita un factor de reducción de 20 que es la relación del error actual sobre el error deseado ($0.1675\text{ V}/0.0083\text{ V}=20$); la ubicación del polo elegida es en -0.01 . Las Figs. 11A y 11B muestran el comportamiento del sistema compensado y se compara con el sistema sin compensar. En estas gráficas se muestra que no se afecta la respuesta transitoria y se disminuye el error en estado estable hasta el valor deseado.

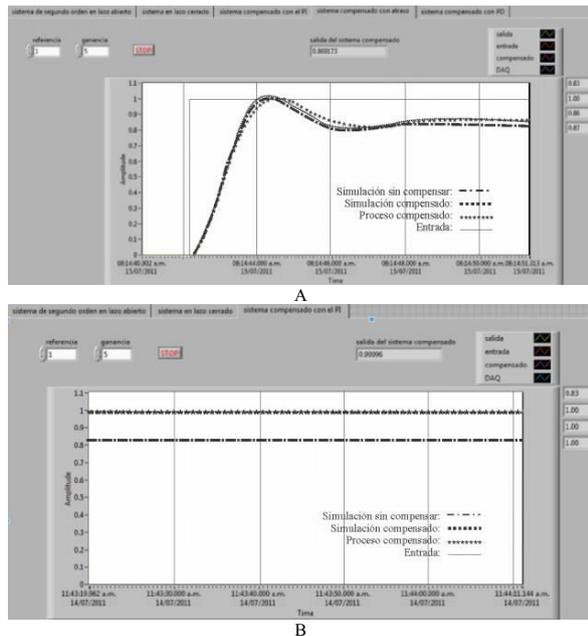


Figura 11: A) Respuesta transitoria con el compensador en atraso. B) Respuesta en estado estable del compensador en atraso.

Compensador PD

El compensador PD se emplea para mejorar la respuesta transitoria de un sistema de control. Los parámetros de la respuesta transitoria que se pueden modificar con este compensador son: el sobrepaso máximo, el tiempo pico y el tiempo de asentamiento. Para el ejemplo que se presenta se definen como parámetros de diseño un sobrepaso máximo del 15% y una reducción en el tiempo de asentamiento de $1/3$ (el tiempo del sistema sin compensar es de 5 segundos y se espera un tiempo del sistema compensado de 1.67 segundos). Con esta información el IV realiza el diseño del compensador, al igual que la discretización que se utiliza en simulación y en las pruebas experimentales. En la Fig. 12 se presentan los resultados del sistema donde se aprecia la disminución del tiempo de asentamiento del sistema compensado. Además, este compensador beneficia la respuesta en estado estable al disminuir el error.

Compensador en Adelanto

Para el diseño del compensador en adelanto se tienen las mismas especificaciones que con el compensador PD. En la Fig. 13 se ilustra el comportamiento del sistema compensado y se compara con el sistema sin compensar. Los compensadores descritos anteriormente se pueden combinar en forma serial para

mejorar las respuestas transitoria y en estado estable. Utilizando el compensador PI y PD en serie para generar el compensador PID; y el compensador de atraso y adelanto para generar el compensador en atraso – adelanto. Para la elaboración de prácticas utilizando la herramienta descrita anteriormente, los alumnos definen el sistema RC, al igual que los parámetros de mejora en las respuestas transitorias y en estado estable. Obteniendo una comparación del sistema compensado en simulación y experimental, contra el sistema sin compensar, para de esta forma visualizar las mejoras que genera el diseño de cada uno de estos compensadores. Además, esta herramienta presenta el LGR del sistema sin compensar y del sistema compensado, permitiendo con esto comparar los resultados del IV con los diseños matemáticos de cada alumno.

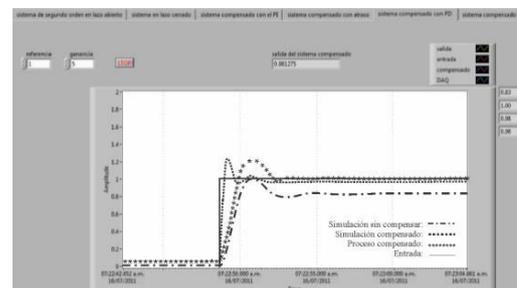


Figura 12: Respuesta del compensador PD.

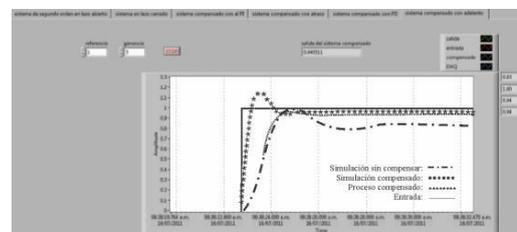


Figura 13: Respuesta del compensador en adelanto.

3.3. Diseño de Compensadores con Trazas de Bode

Los métodos de respuesta en frecuencia son una alternativa para analizar y diseñar sistemas de control retroalimentados. En un sistema físico es posible variar la entrada de forma senoidal con frecuencia, amplitud y ángulo de fase conocidos. Consecuentemente, la salida del sistema será senoidal en estado estable, por lo tanto, también se medirá su amplitud y ángulo de fase. Con esta información es posible obtener la respuesta en frecuencia del sistema mediante el cociente entre la amplitud de salida y la amplitud de entrada. De manera similar, se obtiene la respuesta de fase mediante la diferencia entre los ángulo de fase de entrada y salida a diferentes frecuencias. La respuesta en frecuencia de un sistema se puede representar mediante una traza polar o como diagramas separados de magnitud y fase.

Los diagramas separados de magnitud y fase, conocidos como las trazas de Bode, presentan la información con frecuencia explícitamente enumerada a lo largo de la abscisa. La curva de magnitud es una gráfica de la magnitud contra el logaritmo de la frecuencia. La otra gráfica, es una gráfica de ángulo de fase contra el logaritmo de la frecuencia. Una ventaja de las trazas de Bode, es que se pueden trazar con facilidad si se usan aproximaciones asintóticas a la curva real.

Los métodos de respuesta en frecuencia proporcionan información de estabilidad, respuesta transitoria y en estado

estable. Al definir estas cantidades de respuesta en frecuencia como margen de ganancia y margen de fase, la respuesta transitoria se puede analizar o diseñar. El margen de ganancia es la cantidad que la ganancia de un sistema puede aumentar antes que ocurra inestabilidad si el ángulo de fase es constante a 180° . El margen de fase es la cantidad que el ángulo de fase puede cambiar antes de presentarse inestabilidad, si la ganancia se mantiene unitaria. Para revisar la metodología de diseño de los compensadores ver la referencia (Nise, 2009b).

El IV para el diseño de compensadores por el método de respuesta en frecuencia emplea las aproximaciones asintóticas de las trazas de Bode como herramienta de diseño. Los compensadores que se pueden diseñar con este IV son: Ajuste de Ganancia, Compensador en Atraso, Compensador en Adelanto y Compensador en Atraso–Adelanto. Además, el uso de este instrumento permite conocer la ubicación de los polos en lazo cerrado del sistema, los valores de ganancia para determinar la estabilidad del sistema de control y los parámetros de respuesta del sistema ante una entrada escalón unitario.

Ajuste de Ganancia

En el primer diseño se manipula la respuesta transitoria de un sistema en base al ajuste de ganancia. El parámetro que se busca en este compensador es el sobrepaso máximo. El IV relaciona el sobrepaso máximo con el factor de amortiguamiento relativo, y este, a su vez, con el margen de fase del sistema. Con esta información se determina el valor de ganancia necesaria en la acción de control P para que el sistema cumpla con la condición de sobrepaso propuesta. En el caso de estudio presentado se propone un sobrepaso máximo del 9.5 %. La Fig. 14 muestra los polos y ceros del sistema en lazo abierto definidos, además de una ganancia inicial para la acción de control proporcional. Con esta información el IV obtiene las gráficas de respuesta en frecuencia del sistema sin compensar. Las gráficas obtenidas se ilustran en la Fig. 15. Por último, el IV calcula la ganancia requerida para que el sistema tenga un sobrepaso del 9.5 %, la FT final y los parámetros clave para generar las trazas de Bode (Ver Fig. 16).

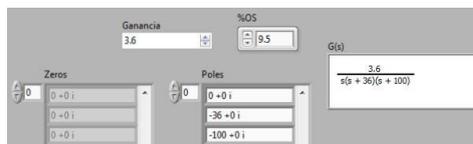


Figura 14: Función de transferencia para ajuste de ganancia.

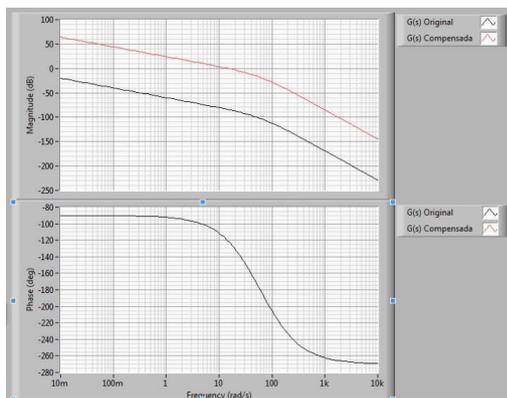


Figura 15: Trazas de Bode en fase y magnitud.

Compensador en Atraso

La función del compensador de atraso de fase, es mejorar la constante de error estático al aumentar la ganancia de baja frecuencia, sin que resulte ninguna inestabilidad, e incrementar el margen de fase del sistema para obtener la respuesta transitoria deseada. Para el diseño de este compensador es necesario especificar la mejora deseada en el error en estado estable y el valor deseado en el sobrepaso.



Figura 16: Resultados del ejercicio de ajuste de ganancia.

En el caso de estudio que se presenta se utiliza la FT $G(s)$ mostrada en la Fig. 14. La mejora propuesta es una disminución en el error en estado estable en un factor de 10 manteniendo el sobrepaso en 9.5 %. En el diseño de este compensador el IV determina la ganancia del sistema con un sobrepaso del 9.5 % (Ver Fig. 17). Con esta ganancia se obtienen las trazas de Bode para seguir el procedimiento de diseño del compensador de atraso. La Fig. 18 muestra las trazas de Bode del sistema sin compensar y compensado. Además, en la Fig. 19 se presentan los parámetros obtenidos en el diseño del compensador.

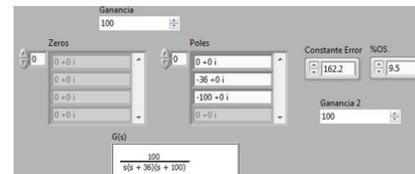


Figura 17: Ejercicio de compensación en atraso.

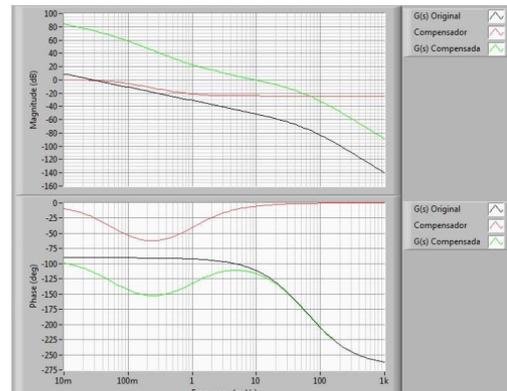


Figura 18: Trazas de Bode para el compensador en atraso.

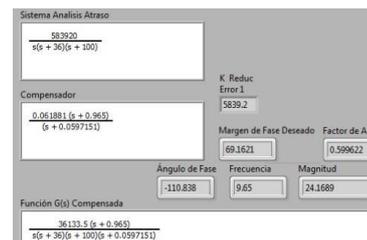


Figura 19: Parámetros del compensador en atraso.

Compensador en Adelanto

Así como para el compensador en atraso se utiliza la relación entre el margen de fase y el sobrepaso máximo, en el compensador en adelanto se emplea la relación entre el ancho de banda en lazo cerrado y el tiempo de asentamiento, tiempo pico y tiempo de levantamiento. En el diseño de este compensador se aumenta el margen de fase y se reduce el sobrepaso, aumentando el cruce de ganancia para generar una respuesta transitoria más rápida. En el ejemplo propuesto se considera un sistema compensado con un 20 % de sobrepaso, una mejora del error en un factor de 40 y un tiempo pico de 0.1 segundos. La Fig. 20 muestra la ventana del IV para la introducción de los requerimientos del sistema compensado y la FT del sistema en lazo abierto. Después de que el IV realiza el diseño del compensador se pueden visualizar los diagramas de bode del sistema sin compensar y compensado (Ver Fig. 21). Además, en la Fig. 22 se muestran los parámetros necesarios para el diseño del compensador.

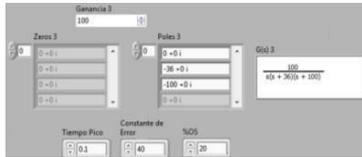


Figura 20: Datos para compensador en adelanto.

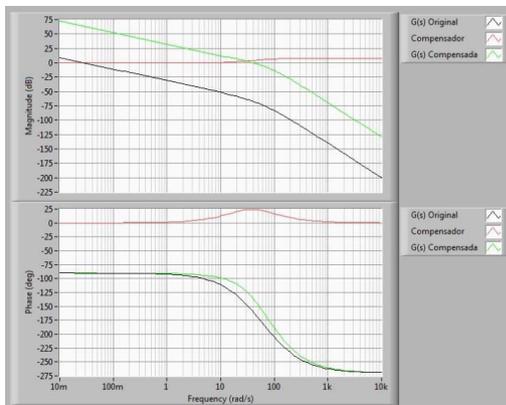


Figura 21: Trazas de Bode para compensación en adelanto.



Figura 22: Parámetros de diseño del compensador en adelanto.

Compensador en Atraso-Adelanto

En el diseño del compensador en atraso-adelanto de fase, se considera la compensación en atraso de fase para reducir la ganancia de alta frecuencia, estabilizar el sistema y mejorar el error en estado estable. Posteriormente, se diseña el compensador en adelanto de fase considerando los requerimientos de margen de fase. En este caso, se presenta un sistema compensado con un sobrepaso del 13.25 %, tiempo pico de 2 segundos y constante de error de 12, para la FT $G(s)$ que se ilustra en la Fig. 23. Con esta información el IV realiza el diseño del compensador, presentando

las trazas de Bode para el sistema compensado y sin compensar (Ver Fig. 24). Además, en la Fig. 25 se muestran los parámetros de diseño del compensador en atraso-adelanto.

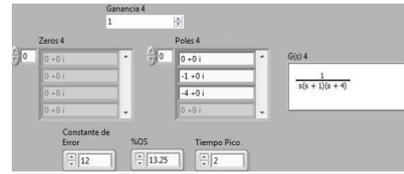


Figura 23: Introducción de datos para compensador en atraso-adelanto.

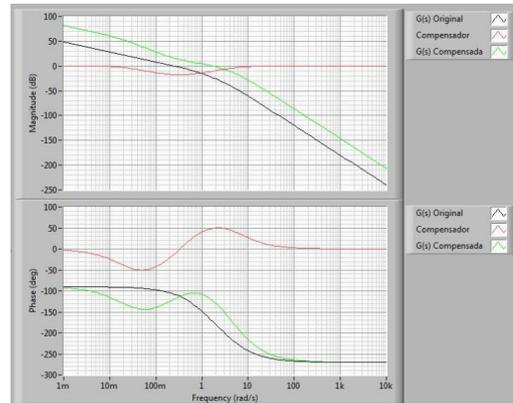


Figura 24: Trazas de Bode para compensador en atraso-adelanto.



Figura 25: Parámetros de diseño de compensador en atraso-adelanto.

Como ha sido posible constatar, la herramienta propuesta proporciona información para que los alumnos corroboren sus diseños de compensadores utilizando la respuesta en frecuencia. En la descripción que se presenta no se incluyen imágenes de la respuesta ante una entrada escalón del sistema debido a que son similares a las presentadas en la herramienta de estabilidad. Además, las FT de los compensadores se pueden utilizar en el VI del LGR para realizar pruebas experimentales y comprobar el funcionamiento de los diseños realizados.

4. Conclusión

Con el instrumento virtual propuesto en este artículo se proveen tres herramientas didácticas que se pueden utilizar en la asignatura de Control para Ingenierías como: Mecatrónica, Electrónica, y Mecánica.

Al emplear estas herramientas didácticas en los cursos de Control, se tiene una herramienta visual como apoyo didáctico para que los alumnos comprendan conceptos fundamentales para un Ingeniero como son: la estabilidad de un sistema, la respuesta ante una entrada escalón de sistemas estables e inestables, la ubicación de los polos y ceros de sistemas estables e inestables, la mejora de la respuesta transitoria y en estado estable utilizando compensadores en serie con el lugar geométrico de las raíces y las trazas de Bode. Además, la herramienta didáctica para el diseño de compensadores por el lugar geométrico de las raíces funciona para diseñar compensadores, simularlos y probar su funcionamiento experimentalmente con un sistema RC de

segundo orden, lo que fortalece el aprendizaje del funcionamiento de compensadores y los efectos que tienen las acciones de control clásico. Los comentarios de los alumnos que han cursado esta asignatura y han utilizado estas herramientas didácticas son positivos, esto debido a la integración de diversas opciones en el mismo instrumento. Además, se tienen comentarios positivos de la metodología docente empleada, considerando que antes de utilizar las herramientas didácticas cuentan con los conceptos básicos para emplearla y que conocen el proceso de diseño de compensadores.

English Summary

Design of teaching tools focused on control systems with virtual instruments

Abstract

This paper describes the design of three didactic tools focused on learning of control systems implemented in LabVIEW virtual instruments software. These tools are dedicated to stability analysis in control systems, compensator design using root locus approach and Bode diagrams in the frequency domain. Each of them has a friendly interface with the user. The advantage of these didactic tools is the several options to simulate some characteristics referent to control in contrast with others teaching tools.

Keywords:

Stability, simulation systems, control education, virtual laboratory.

Referencias

- Aissou S., Rekioua D., Mezzai N., Rekioua T., Bacha S., 2015. Modeling and control of hybrid photovoltaic wind power system with battery storage. *Energy Conversion and Management* 89, 615-625. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.10.034
- Armstrong S., Glavin M., Hurley W., 2008. Comparison of battery charging algorithms for standalone photovoltaic systems. *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1469-1475. DOI: 10.1109/PESC.2008.4592143
- Balamuralithara B., Woods P., 2009. Virtual laboratories in engineering education: The simulation lab and remote lab. *Computer Applications in Engineering Education* 17(1), 108-118. DOI: 10.1002/cae.20186
- Bareno C., 2011. Teaching/Learning Methods for Embedded Systems Using Copyleft Hardware. *IEEE Latin America Transactions* 9(4), 503-509. DOI: 10.1109/TLA.2011.5993735
- Chaos D., Chacón J., Lopez J., Dormido S., 2013. Virtual and remote robotic laboratory using EJS, MATLAB and LabVIEW. *Sensors* 13(2), 2595-2612. DOI: 10.3390/s130202595
- Dorin B., Dumitru C., 2008. Photovoltaic laboratory for study of renewable solar energy. *43rd International Universities Power Engineering Conference*, 1-5. DOI: 10.1109/UPEC.2008.4651577
- Ferreira A., Velosa Z., 2007. Experiencias y reflexiones sobre la enseñanza de la Electrónica en tiempos de grandes cambios científicos, tecnológicos y de globalización. *IEEE Latin America Transactions* 5(1), 62-69.
- Gomez A., Goy M., Herrera M., 2013. Design, implementation and evaluation of a FPGA embedded digital systems course at the university level. *IEEE Latin America Transactions* 11(1), 137-142. DOI: 10.1109/TLA.2013.6502792
- Gomez J., Mandow A., Fernandez J., García A., 2011. Using LEGO NXT mobile robots with LabVIEW for undergraduate courses on mechatronics. *IEEE Transactions on Education* 54(1), 41-47. DOI: 10.1109/TE.2010.2043359
- Gomez J., Mandow A., Fernández J., García A., 2015. Mobile Robot Lab Project to Introduce Engineering Students to Fault Diagnosis in Mechatronic Systems. *IEEE Transactions on Education* 58(3), 187-193. DOI: 10.1109/TE.2014.2358551
- Jiménez J., Soto F., De Jódar E., Villarejo J., Roca J., 2005. A new approach for teaching power electronics converter experiments. *IEEE Transactions on Education* 48(3), 513-519. DOI: 10.1109/TE.2005.852598
- Karp T., Gale R., Lowe L., Medina V., Beutlich E., 2010. Generation NXT: Building young engineers with LEGOs. *IEEE Transactions on Education* 53(1), 80-87. DOI: 10.1109/TE.2009.2024410
- Kwon D., Kim H., Shim J., Lee W., 2012. Algorithmic bricks: a tangible robot programming tool for elementary school students. *IEEE Transactions on Education* 55(4), 474-479. DOI: 10.1109/TE.2012.2190071
- Kyomugisha R., Bomugisha D., Mwikirize C., 2015. A remote Solar Photovoltaic laboratory based on the iLabs Shared Architecture (ISA). *12th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation*, 56-62. DOI: 10.1109/REV.2015.7087263
- Nise N., 2009a. Sistema de Control para Ingeniería. Editorial Patria. Tercera Edición, 329-340.
- Nise N., 2009b. Sistema de Control para Ingeniería. Editorial Patria. Tercera Edición, 422 – 585.
- Ogata K., 2010. Ingeniería de Control Moderna. Editorial Pearson. Quinta Edición, 212-218.
- Ordíñez L., Alimenti O., 2013. A Constructivist Approach for Teaching Embedded Systems. *IEEE Latin America Transactions* 11(1), 572-578.
- Rasheduzzaman M., Chowdhury B., Bhaskara S., 2014. Converting an old machines lab into a functioning power network with a microgrid for education. *IEEE Transactions on Power Systems* 29(4), 1952-1962. DOI: 10.1109/TPWRS.2014.2304537
- Rodriguez J., Herrera G., Rivas E., 2011. Adjustable speed drive project for teaching a servo systems course laboratory. *IEEE Transactions on Education* 54(4), 657-666. DOI: 10.1109/TE.2011.2106213
- Santos C., Figueroa H., 2015. Free Visual FDTD 2D Simulator to Support the Telecommunication Teaching-Learning Process. *IEEE Latin America Transactions* 13(3), 818-824. DOI: 10.1109/TLA.2015.7069110
- Vasco A., Amaral M., Martins N., Bartholo V., 2011. Learning Objects to Support the Teaching of Science. *IEEE Latin America Transactions* 9(3), 376-383. DOI: 10.1109/TLA.2011.5893787
- Zhan W., Porter J., Morgan J., 2014. Experiential learning of digital communication using LabVIEW. *IEEE Transactions on Education* 57(1), 34-41. DOI: 10.1109/TE.2013.2264059