



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA
DE VALPARAISO



Vanessa Andrea Lara Araya

**Diseño y desarrollo de módulos electrónicos
para el estudio del Control Automático**

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Electrónico



Escuela de Ingeniería Eléctrica



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA
DE VALPARAISO

Diseño y desarrollo de módulos electrónicos para el
estudio del Control Automático

Vanessa Andrea Lara Araya

Trabajo de título para el grado de Ingeniero Civil Electrónico,

aprobada por la comisión de la

Escuela de Ingeniería Eléctrica de la

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

conformada por

Sr. Héctor Renato Vargas Oyarzún

Profesor Guía

Sr. Cristian Andres Castro Lagos

Segundo Revisor

Sr. Sebastián Carlos Fingerhuth Massman

Secretario Académico

Valparaíso, 10 de Mayo de 2018

A mis Padres Eugenia y Waldo.

A mi hermana Daniela.

Agradecimientos

Doy gracias, en primer lugar, a mis Padres Eugenia Araya y Waldo Lara, por todos los esfuerzos realizados a lo largo de estos años para educarme y entregarme lo mejor, por todo el amor y dedicación que han puesto en esta tarea y por hacer de mí una persona inmensamente feliz. Los amo y son lo más importante de mi vida.

A mi hermana Daniela y prima Issabella, les agradezco las innumerables tardes de risas, noches de conversación, los sabios consejos y el apoyo incondicional que cada una me ha brindado. Gracias también, por darme la seguridad de que siempre podré contar con ustedes, por ser mis mejores amigas y hacer que las quiera con todo mi corazón.

A mis tías, Patricia y Rosalía, que con su ayuda, entrega y cariño sin duda han hecho de este un camino más fácil y llevadero. Gracias por todo lo que nos han dado y apoyado a lo largo del tiempo, por estar siempre presentes en los momentos importantes de nuestra familia y acompañarme en esta gran etapa de mi vida. Sepan que el inmenso cariño que me han entregado es mutuo y que contarán conmigo siempre.

A mi pareja, Felipe Delgado, quien ha sido un pilar fundamental en el avance de esta carrera. Gracias por volver entretenidas las maratones de estudio, por organizar lindos paseos para distraernos y sobre todo por impulsarme a ser mejor persona y siempre sacar lo mejor de mí. También doy gracias a mis queridos compañeros y amigos que fueron parte importante de este proceso, mencionando de manera especial a Javier Castro por su colaboración en el diseño 3D de los módulos, sin duda fuiste un gran apoyo.

A mis Profesores, Héctor Vargas y Cristian Castro, por siempre tener la mejor disposición para ayudarme cada vez que lo necesité y guiarme en este trabajo de la mejor manera posible.

Gracias a todas las personas que de una u otra forma hicieron posible que llegara hasta aquí.

Valparaíso, 10 de Mayo de 2018

V. L. A

Resumen

Este proyecto nace como una respuesta a la constante necesidad de tener nuevas y eficientes herramientas educativas, que permitan crear en los estudiantes una unión entre la teoría y la práctica del control automático. Siendo el objetivo principal profundizar y reforzar los conocimientos de la asignatura de forma didáctica mediante el uso de una planta en el laboratorio.

Este trabajo consiste en el desarrollo e implementación de una planta educativa, que estará disponible para uso docente en el Laboratorio de Control Automático. Esta se compone de un conjunto de módulos electrónicos basados en amplificadores operacionales, con los cuales se podrá trabajar en la formación de distintas funciones de transferencias, realizar control PID y analizar los resultados mediante una interfaz de LabVIEW.

En este informe se presentan los distintos módulos electrónicos, los cuales son: ganancia, derivador, integrador, primer orden, segundo orden, controlador PID y un comparador para realizar lazo cerrado. Y además se detalla el análisis realizado de las distintas funciones, principales características y correspondiente funcionamiento tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.

Junto a esto se brinda una completa descripción del diseño tanto del hardware, comprendido por los módulos y placas PCB, y del software, que corresponde a la interfaz de usuario realizada en LabVIEW, la cual, a través de una tarjeta de adquisición de datos USB-6002 de National Instruments permite enviar y adquirir datos desde los módulos.

Para visualizar los resultados obtenidos se presentan los registros de datos e imágenes reunidas de las distintas pruebas de funcionamiento que se realizaron a lo largo del trabajo. Las cuales hacen referencia tanto a los módulos como a la interfaz.

Finalmente se presenta la documentación llevada a cabo, la cual comprende el manual de uso y material docente para interactuar de manera adecuada con la planta, complemento muy importante que permitirá cumplir con el principal objetivo del proyecto.

Palabras claves: Control Automático, Planta educativa, Circuitos Análogos, Función de Transferencia, Amplificadores Operacionales, Controlador PID, LabVIEW, Circuitos Impresos, Módulos Electrónicos.

Abstract

This project is born as an answer to the constant necessity of having new and efficient educational tools, which allow to create in the students, a union between theory and practice of Automatic Control. Being the primal objective deepen and reinforce the subject's knowledge by using a plant in the laboratory.

This work consists in the development and implementation of an educational plant which will be available in the Automatic Control Laboratory, of an educational plant. This is made up of a set of electronic modules based on operational amplifiers, with which you can work in the setup of different transfer functions, perform PID control and analyze through a LabVIEW interface.

In this report the different electronic modules are introduced, which are: gain, derivator, integrator, first order, second order, PID controller and a comparator to perform closed loop systems. It is also detailed the analysis performed by the different functions, main characteristics and corresponding operation, both in time domain as in frequency domain.

Along with this, it is provided a full description of the design, both hardware, being the modules and PCB, as software, being the LabVIEW interface, which through the USB-6002 DAQ Device of National Instruments, allows to send and acquire data from the modules.

To visualize the obtained results, the data and images gathered trough the functionality tests along the work are presented.

Finally, the documentation is shown, which includes the user manual and teaching material to interact appropriately with the plant, a very important complement which allows to fulfill the main goal of the project.

Key words: Automatic Control, Educational Plant, Analog Circuits, Transfer Function, Operational Amplifiers, PID Controller, LabVIEW, Printed Circuit Boards, Electronic Modules.

Índice general

Introducción.....	4
1 Fundamentación del proyecto	4
1.1 Contextualización	4
1.1.1 El Control Automático en la educación.....	4
1.1.2 Plantas didácticas para la enseñanza	5
1.1.3 Aplicaciones en la docencia	7
1.2 Problemática	8
1.3 Propuesta.....	8
1.4 Objetivos.....	12
2 Análisis de circuitos y su aplicación en Control	13
2.1 Ganancia.....	13
2.2 Integrador	15
2.3 Derivador	18
2.4 Primer orden	20
2.5 Segundo orden	23
2.6 Controlador PID	26
3 Diseño de la planta	31
3.1 Hardware	31
3.1.1 Módulos Electrónicos	31
3.1.2 Placas PCB.....	35
3.2 Software	38
3.2.1 Etapa de Simulación de la Interfaz	38
3.2.2 Etapa Experimental de la Interfaz.....	41
3.2.3 DAQ (Data Acquisition)	44
4 Funcionamiento	46
4.1 Conexiones	46
4.2 Pruebas generales	48
4.2.1 Pruebas en Lazo Abierto a distintas entradas	48
4.2.2 Controlador PID	53

4.2.3 Obtención del diagrama de bode.....	57
5 Material docente	59
5.1 Datasheet.....	59
5.2 Manual de uso	60
5.3 Guías de uso docente.....	60
Discusión y conclusiones.....	63
Bibliografía	65
A Guía Práctica 1	68
A.1 Introducción	68
A.2 Objetivos.....	68
A.3 Actividad.....	68
A.3.1 Análisis de un sistema de Primer Orden	68
A.3.2 Análisis de un sistema de Segundo Orden	69
B Guía Práctica 2	71
B.1 Introducción	71
B.2 Objetivos.....	71
B.3 Actividad.....	71
B.3.1 Análisis de la respuesta en frecuencia.....	71
C Guía Práctica 3	73
C.1 Introducción	73
C.2 Objetivos	73
C.3 Actividad	73
C.3.1 Controlador para una función de Primer Orden	73
C.3.2 Diseño de controlador PID para función de tercer orden.....	74

Introducción

El Control Automático es una disciplina transversal que es utilizada en diversos campos y que busca diseñar sistemas con comportamientos deseados, eliminando errores y aumentando la seguridad de los procesos. En la educación universitaria se imparte la clase teórica de Control Automático, donde se enseñan los conceptos básicos que le dan sustento a la teoría.

Hoy en día las instituciones educativas buscan complementar este aprendizaje con herramientas prácticas, como lo son el uso de plantas de laboratorios y software de simulación. Existen varias iniciativas que buscan diseñar, construir y poner en marcha equipos que integren estos conceptos fundamentales, siendo un aporte a la educación en el intento de unir teoría y práctica, al mismo tiempo, haciendo al estudiante participe activamente en su propio aprendizaje y conocimiento.

Una forma de llevar a cabo esto es con una planta didáctica a escala, la cual es un dispositivo físico, pieza de algún equipamiento o conjunto de máquinas que opera con algún objetivo particular que se desea controlar. En el laboratorio de Control Automático de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, se cuenta con algunas plantas como son el Heatflow (control de temperatura), el Motor DC (control de posición y velocidad), el Maglev (levitación magnética) y Tanques acoplados (control de nivel de flujo), que facilita la realización de prácticas reales con los estudiantes.

Este proyecto consiste en desarrollar y construir una planta educativa formada por un conjunto de módulos electrónicos, con la cual se podrá trabajar en la formación de distintas funciones de transferencia y realizar control PID de una forma novedosa. Cada módulo corresponde a una función de transferencia y se unen de forma muy similar a los diagramas de control típicos.

Estos módulos electrónicos, tienen como elemento principal el amplificador operacional. Estos son uno de los dispositivos electrónicos más versátiles y de mayor uso en aplicaciones lineales. Ofrecen una forma conveniente de construir o realizar funciones de transferencia en el dominio «s» o en tiempo continuo que a menudo se emplean para implementar controladores o compensadores que se obtienen del proceso de diseño de sistemas de control.

El término operacional originalmente se refería a operaciones matemáticas, ya que principalmente se usaban en circuitos para sumar, restar, multiplicar e incluso resolver ecuaciones diferenciales. Estas aplicaciones permiten una gran cantidad de configuraciones por

lo que se pueden formar distintas funciones de transferencias, aplicando ganancia, polo en el origen (integrador), cero en el origen (diferenciador), entre otras que permitirán el desarrollo de este trabajo.

La forma clásica de modelar sistemas lineales es utilizar funciones de transferencia para representar la relación entrada-salida entre variables. Básicamente las propiedades dinámicas de las plantas pueden ser aproximadas por las características temporales de sistemas más simples, es decir con ecuaciones lineales de primer y segundo orden. La función de transferencia de un sistema lineal invariante con el tiempo se define como la transformada de Laplace de la respuesta al impulso, con todas las condiciones iniciales igual a cero [1].

Para analizar las funciones de primer o segundo orden en el tiempo, se incluyen señales de pruebas típicas, con las cuales se contarán en este proyecto. El uso de señales de prueba se justifica, porque existe una correlación entre las características de respuesta de un sistema para una señal de entrada de prueba común y la capacidad del sistema de manejar las señales de entradas reales. Las señales de prueba más utilizadas son funciones impulso, escalón, rampa, parábola y senoidales. Con estas señales de pruebas, es posible realizar con facilidad análisis matemáticos y experimentales de sistemas de control, dado que las señales son funciones del tiempo muy simples. En este informe principalmente se utilizará la entrada tipo escalón, presentándose un análisis tanto para sistemas de primer orden como de segundo orden.

La respuesta en frecuencia corresponde a la respuesta de un sistema en estado estacionario a una entrada sinusoidal. Se introducen al sistema señales senoidales de distintas frecuencias y realizando una comparación entre la salida y la entrada, se determinan las ganancias y desfases producidos para finalmente unir cada punto y construir el diagrama de Bode. La técnica del barrido de frecuencias se basa en este hecho, y permite, mediante la inyección de distintas señales de entradas senoidales de igual magnitud, pero distinta frecuencia, construir experimentalmente el diagrama de Bode, dependiendo de los valores obtenidos a la salida, tanto de ganancia como de fase [2]. En resumen, los diagramas de Bode se utilizan para representar esta respuesta en frecuencia de un sistema con las características antes mencionadas, haciendo uso del diagrama de Bode de magnitud, el cual, representa el logaritmo del módulo versus la frecuencia y el de fase, el que representa el ángulo de fase versus la frecuencia.

En cuanto al diseño de los módulos, hoy existen grandes avances tecnológicos que facilitan el desarrollo de estos, como son la impresión 3D y la realización del grabado de los circuitos mediante una máquina CNC. La impresión 3D consiste en la creación de un objeto tridimensional mediante la superposición de capas sucesivas de material, esta tecnología permite la realización de las cajas a medidas, estandarizadas, de acuerdo a los requerimientos que se deseen en cada caso particular, además de ahorrar tiempo y dinero su realización.

Una fresadora es una máquina que permite realizar trabajos mecanizados en distintos materiales, mediante el movimiento de una herramienta rotativa. De esta forma se puede utilizar para realizar placas PCB, donde mediante un software se diseñan las trayectorias que debe realizar, los cuales se transforma en códigos que le indicarán como moverse en los ejes X, Y y Z para que el cabezal con la fresa girando a alta velocidad, vaya eliminando el cobre sobrante y de esta forma

se vayan generando las pistas del circuito. De igual manera que en la impresión 3D, esta tecnología es de gran ayuda para disminuir tiempos de espera, realizar los cambios requeridos al instante, y obtener resultados estéticos de acorde a un trabajo más profesional.

Otra herramienta fundamental en este trabajo es la tarjeta de adquisición de datos. Estos dispositivos no solamente permiten medir con un PC un fenómeno físico mediante algún sensor adecuado, sino que también permite el envío de señales desde el PC hasta el actuador, con esto se puede realizar el control de la planta mediante una interfaz ejecutada en el PC.

LabVIEW (acrónimo de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico, conocido como lenguaje G. Cuenta con un panel frontal el cual es la interfaz con la que interactúa el usuario y con una sección de diagramas de bloques, que corresponde al código que controla el programa. A medida que se presente el avance de la interfaz desarrollada, se irán mostrando ambas partes.

Este software fue creado en 1987 teniendo como objetivo entregar al operador la posibilidad de realizar diversos análisis en variadas áreas, siendo una de las más fuertes la automatización. Sus principales características son la facilidad de manejo debido a que incorporaba un nuevo sistema de programación llamado G, en alusión a su interfaz gráfica. Su trascendencia ha sido tal, que incluso en algunas universidades, el aprendizaje de LabVIEW se ha vuelto obligatorio dentro de las mallas curriculares de las carreras de ingeniería.

Es así que este proyecto no solo cubre la importante necesidad de adquirir una planta educativa en el laboratorio, sino que a la vez, es una planta muy interesante debido a sus capacidades de expansión y contenido que, al abarcar distintos elementos de la electrónica puede servir para explicar incluso otras asignaturas.

1 Fundamentación del proyecto

Para comprender de manera clara la finalidad del proyecto a desarrollar, en este primer capítulo se expondrán los fundamentos que lo sostienen, se dará a conocer cómo se trabaja en el aprendizaje práctico de control automático hoy en día, cómo trabajan otras plantas educativas, y la presentación de una propuesta que busque diferenciarse de las herramientas actualmente utilizadas y contribuir al proceso de aprendizaje de los alumnos en el área de control.

1.1 Contextualización

A continuación se presenta el contexto educativo en el cual se encuentra presente este trabajo, donde se explica la forma de enseñar control automático tanto en nuestro país como en algunas universidades extranjeras, y de qué manera es posible sacar provecho de esta planta educativa.

1.1.1 El Control Automático en la educación

Nos encontramos en un mundo cada vez más dinámico y globalizado en que todo va cambiando constantemente. Así también es el cambio en la enseñanza que se ha generado este último tiempo llevándose hacia un camino de educación basada en competencias. Es por esto que se requiere el uso de procesos didácticos y evaluaciones que estén orientadas a retroalimentar y establecer niveles de avance que permitan definir con claridad las capacidades que se espera desarrolle el alumno a lo largo de su proceso de aprendizaje [3].

La UNESCO define como competencias al conjunto de comportamientos socioafectivos y habilidades cognoscitivas, psicológicas, sensoriales y motoras que permiten llevar a cabo adecuadamente un desempeño, una función, una actividad o una tarea [4].

Además, el uso de herramientas didácticas en la educación contribuye no solo a repasar conceptos teóricos de la materia sino que otorga cierto grado de motivación a los alumnos, ya que se les hace parte de su propio aprendizaje, impartándose distintos desafíos y objetivos a cumplir, dejando de lado así la adquisición pasiva de conocimiento y convirtiéndose en el sujeto de la acción educativa [5].

Hoy en día, muchas universidades alrededor del mundo apoyan el curso teórico de Control Automático con distintos software de simulación que permitan conocer y visualizar el comportamiento de diferentes sistemas de estudio. En este contexto, las simulaciones pueden ser

utilizadas para experiencias previas a una práctica de laboratorio, entregándoles a los estudiantes una idea de qué van a encontrar posteriormente en el experimento [6]. Esto permite que los estudiantes se familiaricen con el experimento, mejorando así los tiempos de trabajo y la seguridad en el manejo de las máquinas, entre otras cosas.

Es por esto que las simulaciones se han vuelto una poderosa herramienta para el estudio del comportamiento de los sistemas ante distintos fenómenos de entrada, pero también es muy necesaria la posibilidad de poder interactuar con elementos físicos que demuestren que la teoría funciona al ponerla en práctica [7].

Existe un amplio número de estudios que demuestran que las personas aprenden de manera más fácil y permanente mientras hacen cosas y reflexionando sobre estas, que al escuchar a un tercero explicándoles cómo se hace [8] [9].

De esta manera, las prácticas de laboratorio adquieren una gran importancia, ya que logra que el estudiante “aprenda haciendo”, “aprenda descubriendo”, “aprenda experimentando” (mientras diseña, hace pruebas, practica o comenta sus resultados) y junto con esto sea capaz de establecer relaciones con otros conocimientos previos que ya posee. Además de fomentar el trabajo en equipo, promover la participación y desarrollar distintas competencias [10] [11].

Una importante habilidad adquirida mediante las actividades experimentales, es la capacidad de ofrecer variadas y originales soluciones a un mismo problema, lo que es fundamental en un estudiante de ingeniería y le será de gran ayuda en su desarrollo profesional [12].

1.1.2 Plantas didácticas para la enseñanza

Para continuar analizando el contexto en el que se encuentra inmerso este proyecto, es que se investiga sobre experiencias y formas de poner en práctica los conocimientos del control automático en otras universidades.

Recientemente se ha elaborado un ranking de universidades españolas según campos y disciplinas específicas, basado en la investigación publicada en las revistas internacionales de mayor impacto y visibilidad. Según dicha clasificación, la Universidad de Sevilla ocupa el 2º puesto en España en el área de Automática y Robótica [13].

Dentro de sus facultades se destaca el laboratorio de control, con diferentes estaciones de trabajo entre las que se encuentran dos módulos electrónicos, basados en un principio similar al de este proyecto. Uno es un simulador de funciones de primer y segundo orden, y el otro un módulo PID electrónico (Figura 1-1), que combinados se utilizan para prácticas de regulación. Estos módulos pertenecen a la empresa Didac International, la cual se dedica al desarrollo de equipos científicos de laboratorio.

Los principales objetivos de estas prácticas son que los estudiantes puedan analizar las características temporales y frecuenciales de algunos sistemas y además estudiar en el diseño de controladores clásicos, P, PI, PD, PID. A continuación se presentan las imágenes de ambos módulos junto con algunas especificaciones de trabajo.

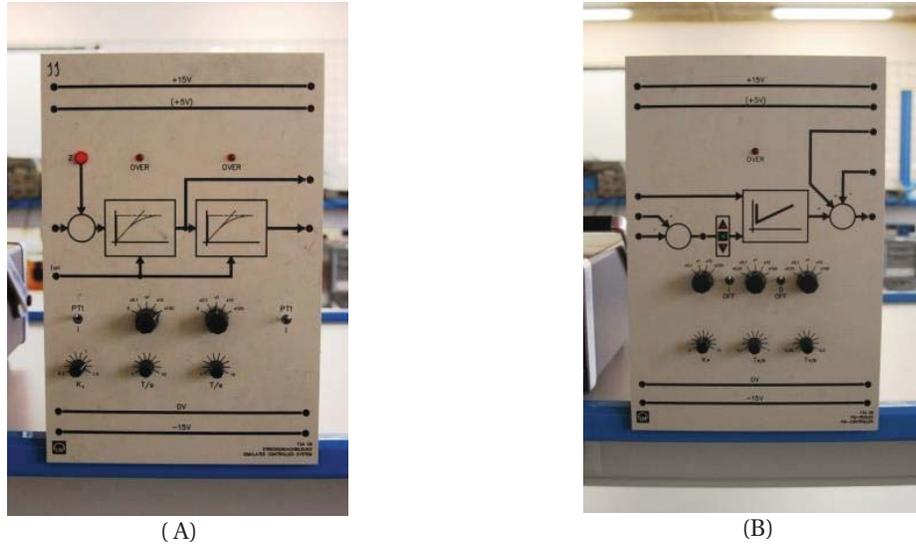


Figura 1-1: Módulos simulador de funciones (A) y módulo PID (B) (fuente: <https://eps.us.es>).

En las siguientes tablas se mencionan datos técnicos entregados por el fabricante [14].

Tabla 1-1: características técnicas módulo simulación de sistemas.

Módulo de simulación de sistemas	
Fuente de alimentación	+15[V] ; 0[V] ; -15[V]
Rango de tensión de la señal	-10[V]- 10[V]
Coefficiente de acción proporcional K_p	0.2-1.5
Constante de tiempo T_i	0.1[s]-1000[s]
Constante de tiempo T_d	0.1[s]-1000[s]

Tabla 1-2: Características técnicas módulo de controladores PID.

Módulo de controladores PID	
Fuente de alimentación	+15[V] ; 0[V] ; -15[V]
Rango de tensión de la señal	-10[V]-10[V]
Coefficiente de acción proporcional K_p	0-1000
Constante de tiempo T_i	1[ms]-100[s]
Constante de tiempo T_d	0.2[ms]-20[s]

La diferencia de estos módulos con los desarrollados en el presente trabajo, radica en que los primeros no cuentan con un sistema de adquisición de datos que permita tomar mediciones, las cuales se pueden guardar y trabajar en otros softwares de simulación, así como manejar y visualizar con gran precisión las señales de entrada, lo que reduce la cantidad de equipos complementarios y cables necesarios para trabajar.

Este es un factor importante, ya que siempre se destaca que estas plantas y las experiencias de laboratorio presentan un gran número de ventajas para los estudiantes, pero también algunos

inconvenientes de tipo físico, ya sea por los espacios que se requieren o la cantidad de instrumentación que se necesita para llevar a cabo las actividades [15]. En este caso solo se requiere de una fuente de alimentación y no de otros dispositivos como generador de funciones, osciloscopios, entre otros.

En general, en nuestro país se encuentran presentes ciertas plantas típicas en el estudio de control que se repiten en distintos establecimientos, como en el caso de las siguientes universidades chilenas:

- La Universidad de Chile cuenta con sistemas motor-generador (máquinas de corriente continua), twin-rotor (dinámica de helicópteros), péndulo invertido, levitación magnética entre otras [16].
- La Universidad de los Andes, cuenta con planta para control de nivel y flujo. Sistema de levitación magnética, servomecanismo de posición y velocidad, sistema de control de péndulo invertido y planta para el control de nivel de cuatro estanques acoplados [17].
- Y por último, la Universidad Federico Santa María, cuenta con control de velocidad de un motor de corriente continua, sistema de levitación magnética, control de nivel de estanques acoplados y control de temperatura de un sistema térmico [18].

1.1.3 Aplicaciones en la docencia

Otro aspecto muy importante es el desarrollo de guías para el uso de la planta en el laboratorio, estas guías deben entregar diversas actividades claramente estipuladas que permitan al estudiante ser un ente relevante en el desarrollo de las mismas, a la vez que entregando al profesor las herramientas para corregir y comprobar que las prácticas hayan sido desarrolladas de forma correcta.

Algunas actividades que podrían desarrollar los alumnos principalmente son:

- Estudio de sistemas en lazo abierto y lazo cerrado.
- Análisis de respuesta en el tiempo y en frecuencia.
- Obtención del diagrama de Bode de forma práctica.
- Trabajar con los datos en otros softwares como Matlab, realizando identificación del sistema con la herramienta IDENT para corroborar resultados.
- Diseño y aplicación de control PID.
- Estudio y análisis de cada acción del controlador PID.

Por otra parte, esta planta también puede ser utilizada en otras asignaturas de la carrera, en las cuales se estudie el funcionamiento de los amplificadores operacionales, como por ejemplo en la asignatura de Circuitos Electrónicos, o donde se estudien los distintos modelos de funciones de transferencia, como puede ser en Señales y Sistemas, entre otros. Esto puede ser realizado mediante el estudio individual de cada uno de los módulos desarrollado en este proyecto, los cuales están realizados en base a configuraciones electrónicas muy utilizadas en los libros para explicar los tópicos antes mencionados.

1.2 Problemática

Muchas veces la enseñanza del control se enfrenta al prejuicio de los estudiantes, creyendo que esta es una materia árida y con un contenido matemático fuerte; y por otro lado, el contar con laboratorios donde los alumnos puedan aprender de manera cercana, motivante y entretenida comparando sus conocimientos teóricos, requiere por lo general de un equipo costoso [19].

Una alternativa para resolver este problema la proporcionan los programas de simulación, los cuales acercan al alumno a la comprensión de los principios de la teoría de control. Entre los que se destacan: Matlab, Simulink, y LabVIEW, entre otros, siendo muy útiles debido a la capacidad demostrativa al presentar simulaciones en forma gráfica.

El principal desafío que se presenta en este proyecto, es el de unir tanto la construcción de una planta que cumpla con los objetivos que se plantearán, aprovechando los recursos que otorga la electrónica para la construcción de los módulos, junto con el desarrollo de experiencias docentes que le den vida a este trabajo y lo conviertan en una herramienta provechosa para el aprendizaje dentro del laboratorio.

Todo aprendizaje supone una “construcción” que se realiza a través de un proceso mental que finaliza con la adquisición de un conocimiento nuevo. Siguiendo este contexto, en el diseño de los equipos didácticos tiene que tomarse en cuenta que los estudiantes aprenden el: 10% de lo que leen, 20% de lo que oyen, 30% de lo que ven, 50% de lo que ven y oyen, 70% de lo que dicen mientras hablan y 90% de lo que dicen mientras hacen [3].

Además de lo anterior, es necesario plantearse constantemente la necesidad de ofrecer valor agregado al proyecto, y añadir ciertos elementos que diferencien a esta planta de otras ya existentes en el mercado, o en las diferentes universidades que imparten control automático. Como por ejemplo, contar con una interfaz de control que permita visualizar el trabajo que se está realizando de una forma clara y amigable con el estudiante, simplificando algunas conexiones como las ya mencionadas anteriormente sobre los módulos usados en la universidad de Sevilla. En la actualidad, es fundamental una plataforma que promueva un aprendizaje activo y centrado en el estudiante, acompañando siempre estas herramientas de estrategias enfocadas en las dinámicas de grupo, asignándole al maestro un rol descentralizado de guía u orientador.

1.3 Propuesta

Para dar solución a esta problemática es que se propone la implementación de esta Planta educativa en el laboratorio de Control Automático, la cual apunta al desarrollo del conocimiento y la práctica en los procesos más básicos de un sistema de control.

En un esfuerzo por proponer una solución creativa que permita trabajar con distintas funciones y visualizar resultados, acercando de esta forma lo teórico con lo práctico y tangible, es que se propone, crear distintos módulos electrónicos a base de amplificadores operacionales. Estos módulos que representan procesos y controladores, hacen posible formar funciones de

transferencia de primer y segundo orden, no solo ajustando los parámetros correspondientes de los circuitos, sino que, también conectándolos entre sí, permitiendo distintas configuraciones.

Los estudiantes podrán ajustar estos módulos electrónicos para obtener las funciones de transferencias deseadas, así como los controladores calculados previamente, para diseñar procesos con ciertas especificaciones de control.

Mediante una interfaz desarrollada en LabVIEW los estudiantes no solamente podrán controlar la planta, sino que también, monitorear su respuesta en un computador (ver diagrama de la Figura 1-2) y obtener estos datos en distintos formatos para su estudio y análisis en otros programas. Junto con esto podrán observar tanto la respuesta en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

De esta forma se pretende que los estudiantes puedan verificar los distintos comportamientos esperados, comparar los resultados obtenidos con sus cálculos teóricos y buscar distintas soluciones para mejorar la respuesta del proceso utilizando control PID.

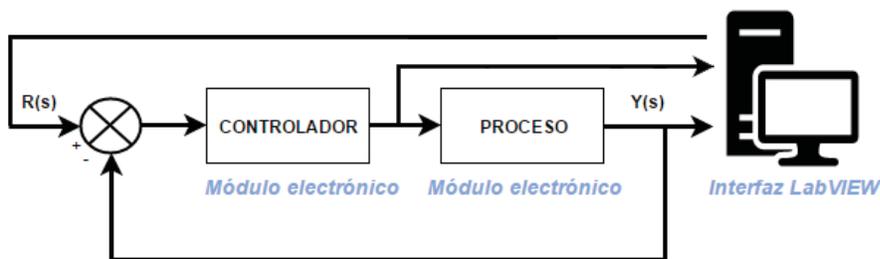


Figura 1-2: Diagrama básico de la conexión de los módulos.

Esta propuesta resulta ser bastante novedosa debido a que como tal, no es una planta típica que se encuentre en muchas universidades o con gran cantidad de documentación.

A diferencia de otras plantas existentes en el laboratorio, como lo son Heatflow (control de temperatura), Tanques acoplados (control de nivel de flujo) o Motor DC (control de posición y velocidad), en esta planta, se podrá trabajar con distintas funciones de transferencia y simulación de distintos procesos, esto debido a que no representa un sistema específico como los anteriores mencionados, los cuales poseen su función de transferencia característica producto de su modelamiento matemático. Es este grado de flexibilidad el que le da un aspecto interesante, abarcando un rango amplio de posibilidades de trabajo con experiencias más complejas en la formación de distintos tipos de funciones.

Cabe destacar que esta propuesta tendrá un bajo costo de construcción comparado con otras plantas del laboratorio o de las disponibles en el mercado, y además permitirá una escalabilidad considerable debido a la posibilidad de añadir más módulos si se desea en el futuro.

Estos módulos contienen un circuito correspondiente a distintas funciones de transferencia, como: ganancia, primer orden, segundo orden, integrador, derivador y controlador PID, además de un módulo comparador para realizar lazo cerrado.

Cada módulo electrónico debe contar con los voltajes de alimentación ± 12 [V] y su conexión a tierra, junto con otros elementos que se requerirán. Estos módulos deben conectarse entre sí, por lo que se buscará la mejor manera de lograrlo uniéndolo a la vez funcionalidad con un diseño atractivo.

Por ejemplo, a modo de hacer más visibles estas conexiones, se propone realizar cables conectores de distintos colores, para que así las cajas se unan de la forma más parecida posible a los típicos diagramas de bloques de control.

En la Figura 1-3 se muestra un módulo similar a lo que se busca desarrollar.



Figura 1-3: Imagen de referencia de módulo electrónico (fuente: <https://tecnoedu.com>).

Es importante que los módulos sean de fácil reparación, por lo que se debe apuntar a desarrollar placas PCB a las cuales sea fácil de acceder. El diseño de los módulos es un factor importante para entregar un valor agregado al proyecto, es ideal que la planta, aparte de su correcto funcionamiento, tenga una buena presentación y sea de fácil manejo por el usuario.

Como se mencionó anteriormente, el elemento principal de estas placas será el amplificador operacional, ya que es un circuito que resuelve de forma sencilla muchos problemas de la Electrónica de Control. Sus aplicaciones son muy diversas, entre las que cabe destacar la implementación de funciones de transferencia [20]. En este caso se utilizará el modelo lm741 fabricado por Texas Instruments debido a su fácil conexión y manejo, a que existe diversa documentación de su utilización en circuitos análogos y a que es un componente de bajo costo.

Dentro de sus principales características cabe mencionar el efecto Slew Rate. Este parámetro hace referencia a que la tensión de salida en un amplificador operacional tiene cierta incapacidad para seguir variaciones rápidas de la señal de entrada, es decir corresponde a la máxima tasa de cambio en el voltaje de salida cuando el voltaje de entrada cambia. En el caso del amplificador operacional LM741:

$$SR = 0.5 \left[\frac{V}{\mu s} \right]$$

Entre otras características cabe mencionar [21]:

- Voltaje de offset de entrada: 1 [mV]
- Ancho de banda: 1 [MHz]
- Alta ganancia
- Salida protegida contra corto circuito continuo
- $V_{CC}= 15$ [V] Y $V_{EE}=-15$ [V]

Algunas limitaciones o consideraciones prácticas [22]:

- La impedancia de salida es alrededor de 75[Ω].
- La ganancia de voltaje empezando en los 100[kHz] se desvía 6[dB] por octava.
- Hay una tensión de entrada offset finita, que debe ponerse a cero por medio de una resistencia entre las patillas 1 y 5. El offset de entrada es normalmente de 2mV a <6mV.
- Existe dependencia de la temperatura.

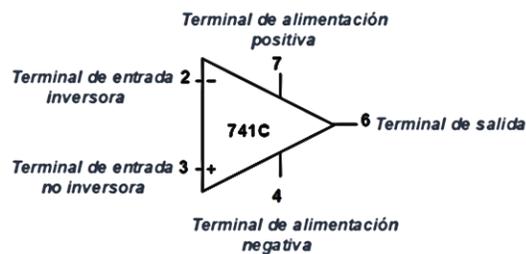


Figura 1-4: Símbolo amplificador operacional de propósito general.

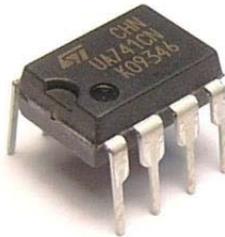


Figura 1-5: Amplificador operacional lm741 de 8 patillas.

Un complemento fundamental para la provechosa utilización de esta planta es la realización de una interfaz de control y monitoreo, la cual será desarrollada utilizando el software LabVIEW, para poder trabajar en las distintas actividades que se impartirán a los alumnos.

Se piensa en este programa, porque consta de distintas herramientas que permiten desarrollar de manera relativamente sencilla, e intuitiva sin necesidad de dominar previamente el lenguaje de programación, una interfaz de control para manejar la planta.

Esta plataforma permitirá simular, tanto la respuesta temporal como la respuesta en frecuencia, del proceso que se esté analizando, y además tomar datos desde los módulos, lo cual permitirá

trabajar de forma experimental con las distintas funciones, ya sea en el mismo software o en otros como Matlab, además de contar con la obtención de gráficas antes mencionadas.

Finalmente, en una última etapa, se desarrollará toda la documentación que sea necesaria para complementar la construcción de esta planta educativa, es decir, se trabajará en la formulación de algunas guías que abarquen distintas temáticas y sirvan como apoyo al profesor para futuras clases a realizar. Además se redactará un manual de usuario que permita a los alumnos y usuarios en general, conocer las principales características tanto de los módulos electrónicos como de la interfaz de control. Así mismo, se presentarán los rangos y límites de trabajo, las indicaciones más importantes y las instrucciones de manejo.

1.4 Objetivos

Por otra parte, es fundamental definir los objetivos a alcanzar durante el desarrollo del proyecto, siendo de vital importancia tener claras las metas a cumplir.

Como objetivo general se plantea desarrollar un conjunto de módulos electrónicos basados en el uso de amplificadores operacionales para el estudio práctico de los fundamentos del Control Automático. Por otro lado, se puede señalar una serie de objetivos específicos:

- Diseño e implementación de módulos electrónicos configurables.
- Implementación de un sistema de adquisición de datos y monitoreo para el manejo de variables.
- Desarrollo de una interfaz gráfica con el software LabVIEW.
- Diseño de guías prácticas para la realización de distintas experiencias en el laboratorio previamente comprobadas.
- Presentación y análisis de resultados finales.

2 Análisis de circuitos y su aplicación en Control

A continuación, se presentan las distintas configuraciones electrónicas que serán parte de estos módulos, con sus correspondientes funciones de transferencia y una descripción del comportamiento que se espera tanto en el dominio del tiempo, como en el dominio de la frecuencia. Estos modelos corresponden a una ganancia, un integrador, un derivador, una función de primer orden, una función de segundo orden y el controlador PID, además de un circuito comparador para realizar lazo cerrado.

2.1 Ganancia

En este caso se utiliza una configuración inversora para representar una ganancia, la cual resulta ser más práctica que la no inversora, ya que es posible generar valores de K menores a uno [23].

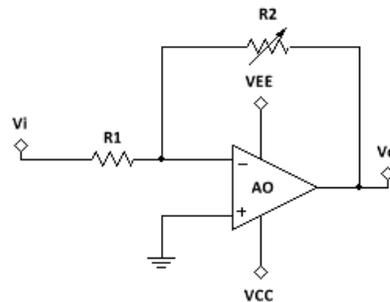


Figura 2-1: Circuito de una ganancia.

La ganancia del circuito está dada por:

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

El circuito de la Figura 2-1 está compuesto por una resistencia fija $R_1=10[\text{k}\Omega]$ y una resistencia variable R_2 , por lo que al modificar el valor de esta última se obtendrán distintos valores de ganancia, los que van desde 0.2 hasta 4.

Cabe destacar que para que los valores de ganancia entregados sean positivos simplemente se antepondrá un amplificador con ganancia igual a -1, es decir se conecta en serie un amplificador con la misma configuración presentada, en donde R_2 y R_1 sean iguales.

A continuación en la Tabla 2-1 se presentan los valores entre los cuales variará R_2 y por tanto a su vez los distintos valores de K que tomará el módulo de Ganancia.

Tabla 2-1: Valores de Ganancia para el módulo de Ganancia.

R_1	R_2	Ganancia K
	2[k Ω]	0.2
	10[k Ω]	1
10[k Ω]	20[k Ω]	2
	30[k Ω]	3
	40[k Ω]	4

Al trabajar en el dominio del tiempo este módulo permite atenuar o incrementar una señal de entrada y por lo general se combina con otras funciones de transferencia para lograr sistemas típicos.

En cuanto al dominio de la frecuencia principalmente se realizarán actividades relacionadas con el diagrama de Bode. La obtención del diagrama de Bode se realiza sustituyendo $s = j\omega$ en la función de transferencia, para así obtener la amplitud logarítmica y la fase.

$$G(s) = K \rightarrow G(j\omega) = K$$

$$|G(j\omega)| = K \rightarrow 20\log|G(j\omega)| = 20\log(K)[dB]$$

$$\angle G(j\omega) = \phi = \tan^{-1}\left(\frac{Im}{Re}\right) = 0^\circ$$

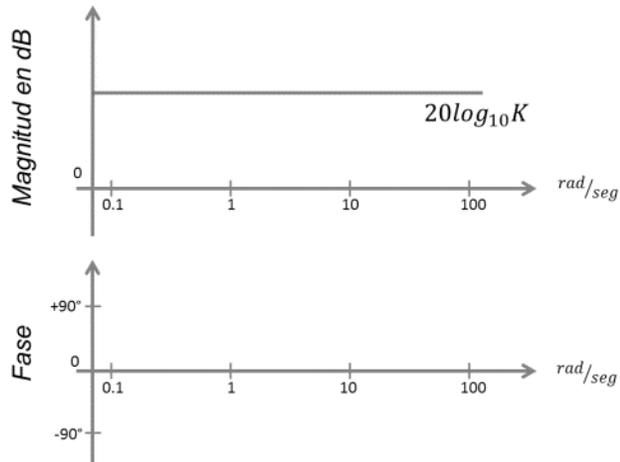


Figura 2-2: Diagrama de Bode de una ganancia.

Lo anterior señala que agregar un factor de ganancia tendrá como resultado una subida o bajada del diagrama de amplitud dependiendo del valor de K , es decir la señal de salida se verá

amplificada o atenuada respecto de la señal de entrada, sin que ello modifique en absoluto la fase. Es decir, la señal de salida estará siempre en fase con la señal de entrada.

2.2 Integrador

Un circuito integrador se logra con la configuración de la Figura 2-3 y a continuación se observa la correspondiente función de transferencia. Cabe destacar que a este módulo se le agrega una ganancia $K=-1$ para obtener una respuesta positiva.

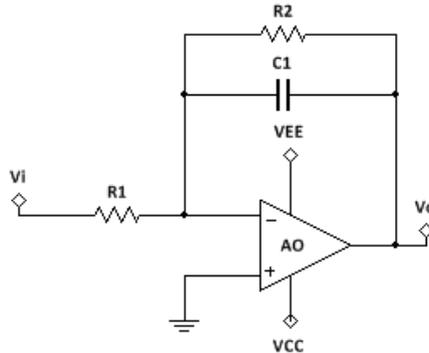


Figura 2-3: Circuito integrador.

La función de transferencia está dada por:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{-R_2}{R_1} \left(\frac{1}{R_2 C s + 1} \right)$$

Donde se tiene $R_2=100[\text{k}\Omega]$, $R_1=10[\text{k}\Omega]$ y $C=100[\mu\text{F}]$, obteniéndose:

$$\frac{V_o}{V_i} = -10 \cdot \left(\frac{1}{10s + 1} \right)$$

En el caso de que si $R_2 C s \gg 1$ se tiene que:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{-R_2}{R_1} \left(\frac{1}{R_2 C s} \right) = \frac{-1}{\tau s} \quad \rightarrow \quad \frac{V_o}{V_i} = \left(\frac{-1}{s} \right)$$

Y por lo tanto se aproxima a un integrador ideal. En este caso se utiliza la resistencia R_2 debido a que es necesaria para proporcionar una ruta de retroalimentación en corriente directa, y así prevenir la saturación del amplificador debido a la corriente de bias.

La función cuenta con un factor de $-1/s$, lo que en el dominio del tiempo corresponde a una integral. En un integrador ideal, ante una entrada escalón, se espera que la respuesta sea una rampa, pero en realidad se obtiene una respuesta exponencial, como se puede ver en la Figura 2-4.

Como se observa, la respuesta real se aproxima a la ideal solo en un breve periodo de tiempo, ya que en la realidad no es posible que el circuito pueda generar una rampa que crezca de manera

indefinida, viéndose limitado principalmente por la naturaleza física de los componentes, a modo de ejemplo, un capacitor no puede cargarse más allá de cierto valor permitido.

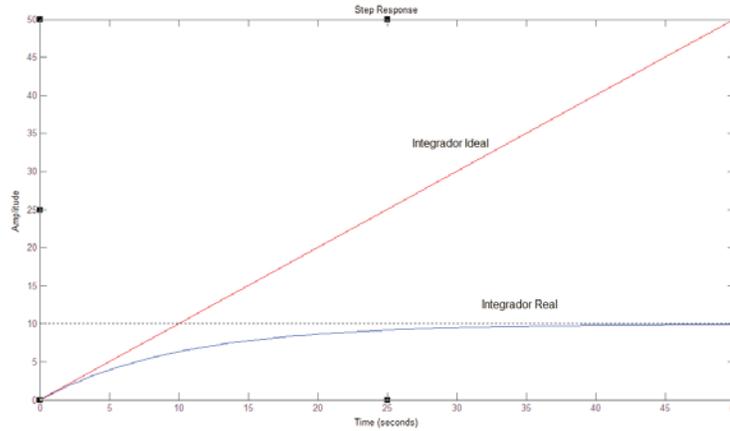


Figura 2-4: Comparación de curva ideal y real del integrador.

En la Figura 2-5 puede observarse la respuesta en el dominio de la frecuencia tanto del integrador ideal (curva roja) como del real (curva azul), y en este caso el circuito solo funcionará como integrador para frecuencias mayores a la de corte:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C} = 0,0159[Hz] \rightarrow 0,1 \left[\frac{rad}{s} \right]$$

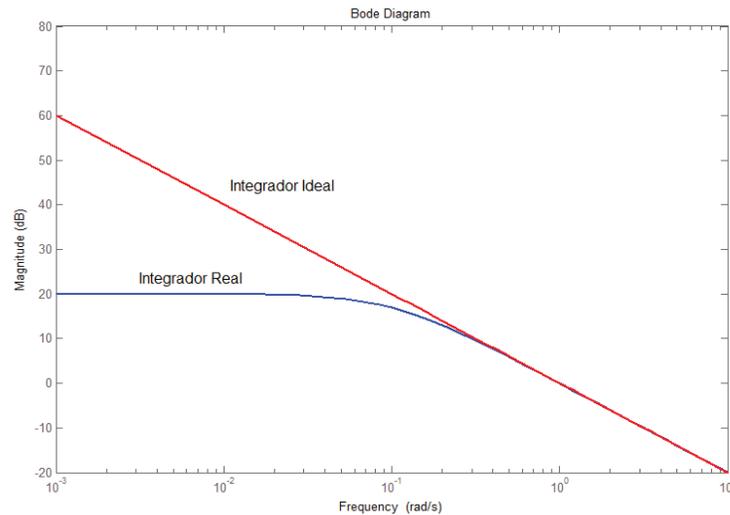


Figura 2-5: Respuesta en frecuencia del integrador ideal y real.

De igual manera es importante que la respuesta en frecuencia del integrador, se mantenga dentro de la respuesta en frecuencia del amplificador operacional. El amplificador operacional en lazo abierto tiene una ganancia del orden de 10.000 y 100.000 veces y un ancho de banda muy reducido

de alrededor de 10[Hz]. En cuanto al GBP (Producto Ganancia-Ancho de banda), parámetro ligado a la frecuencia a ganancia unidad (f_t) para el caso del A.O LM741 este corresponde a 1[MHz] [24].

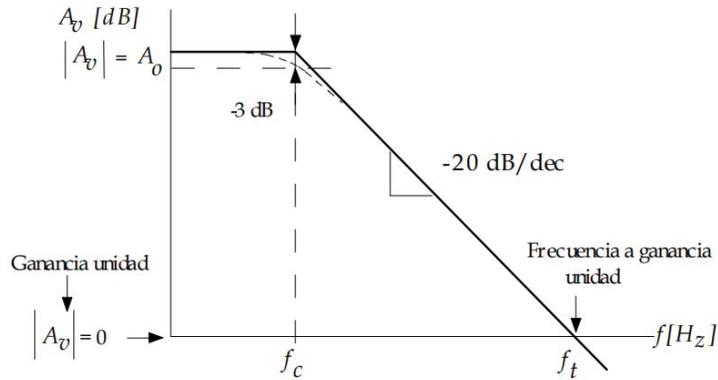


Figura 2-6: Respuesta en frecuencia del AO.

Para determinar el diagrama de Bode en el caso de un integrador ideal, se sustituye $s = j\omega$ en la función de transferencia y se obtiene lo siguiente:

$$G(s) = \frac{1}{s} \rightarrow G(j\omega) = \frac{1}{j\omega}$$

$$|G(j\omega)| = \frac{1}{\omega} \rightarrow -20\log(\omega)$$

$$\angle G(j\omega) = \phi = \tan^{-1}\left(\frac{Im}{Re}\right) \rightarrow \phi = \tan^{-1}\left(\frac{1/\omega}{0}\right) = -90^\circ$$

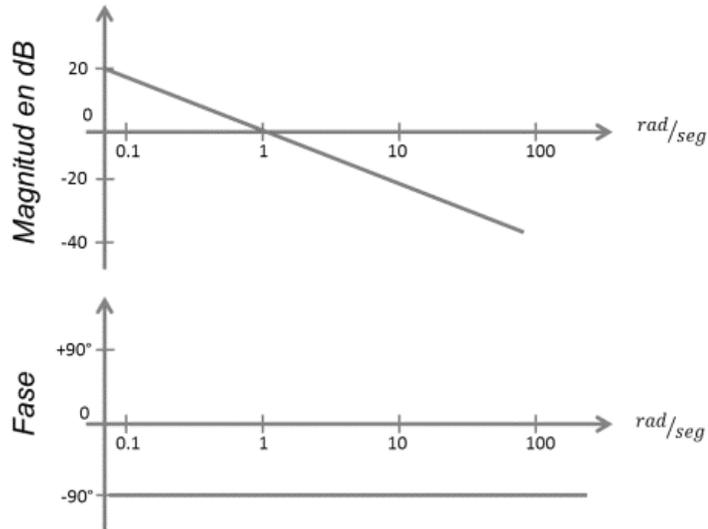


Figura 2-7: Diagrama de Bode del integrador ideal.

Es así como para cada década de incremento en frecuencia la magnitud cae -20[dB], siendo esta una línea recta con dicha pendiente. En cuanto a la fase, el sistema es constante para todas las frecuencias, siendo de -90°, lo que significa que la salida se atrasa respecto a la entrada en 90°.

2.3 Derivador

El circuito de la Figura 2-8 corresponde a una configuración derivadora. Para obtener una función positiva, en la práctica se conecta en serie un circuito con ganancia $K=-1$.

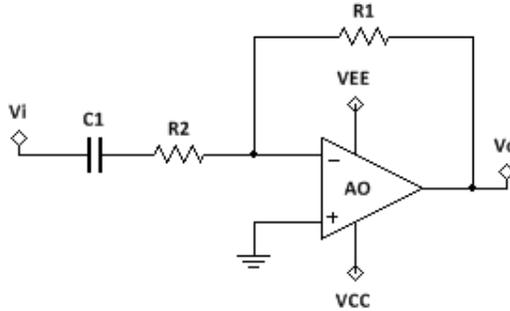


Figura 2-8: Circuito derivador.

La función de transferencia está dada por:

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_1 C s}{R_2 C s + 1}$$

Donde se tiene $R_2=1[\text{k}\Omega]$, $R_1=10[\text{k}\Omega]$ y $C=100[\mu\text{F}]$, obteniéndose:

$$\frac{V_o}{V_i} = -\left(\frac{s}{0.1s + 1}\right)$$

Si $R_2 C s \ll 1$ entonces la respuesta se aproxima a la de un derivador ideal, quedando así la función:

$$\frac{V_o}{V_i} = -R_1 C s = -\tau s \rightarrow \frac{V_o}{V_i} = -s$$

Se observa que la función posee un parámetro s correspondiente a una derivada en el dominio del tiempo, de modo que la salida de este circuito es proporcional a la derivada en el tiempo de la señal de entrada. En la Figura 2-9 se muestra una simulación de la respuesta en el tiempo del derivador ante una entrada escalón, la cual tiene un ancho de aproximadamente 500[ms], lo cual es aceptable considerando que $\tau=1[\text{s}]$.

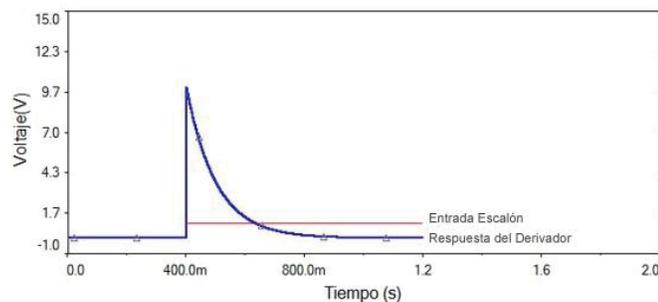


Figura 2-9: Respuesta escalón del derivador.

En cuanto a la respuesta en frecuencia, se observa el comportamiento de este en la Figura 2-10. Aquí se presenta la curva de respuesta tanto para el derivador ideal (curva roja), como para el derivador real (curva azul). Ambas se comportan igual para frecuencias menores que la de corte:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C} = 1.59[\text{Hz}] \rightarrow 10 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

De igual manera es importante tener presente que la respuesta en frecuencia del derivador, se mantenga dentro de la respuesta en frecuencia del amplificador operacional presentado en la Figura 2-6.

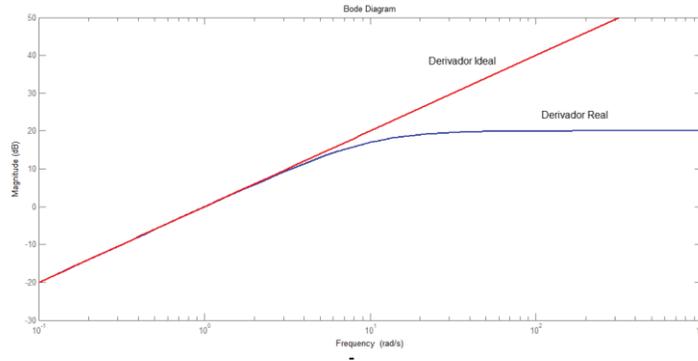


Figura 2-10: Respuesta en frecuencia del derivador ideal y real.

La inclusión de R_2 , permite limitar la ganancia a altas frecuencias y con ello disminuir el ruido. En caso de no utilizar esta resistencia, la curva presentada sería como la de la Figura 2-11 donde se observa un peak indeseable.

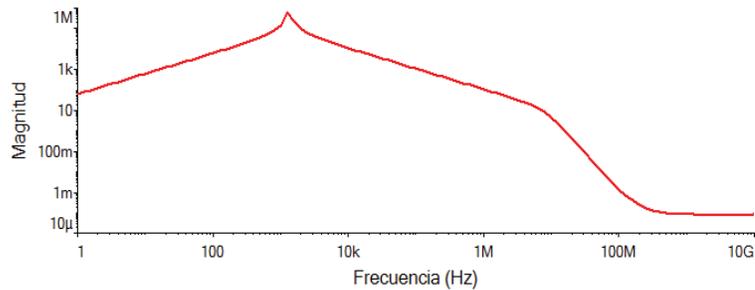


Figura 2-11: Respuesta en frecuencia del derivador, sin R_2 .

Para realizar el diagrama de Bode, en el caso de un derivador ideal si se sustituye $s = j\omega$ en la función de transferencia, se obtiene lo siguiente:

$$G(s) = s \rightarrow G(j\omega) = j\omega$$

$$|G(j\omega)| = \omega \rightarrow 20\log(\omega)$$

$$\angle G(j\omega) = \phi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}}{\text{Re}} \right) \rightarrow \phi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega}{0} \right) = 90^\circ$$

En la Figura 2-12 se puede visualizar el diagrama de Bode para un derivador ideal, con el cual en algunas ocasiones se trabajará de forma comparativa o teórica por parte de los alumnos, ya que como se mencionó anteriormente, en la realidad, la curva que resultará del análisis de este módulo, tomará una forma de exponencial.

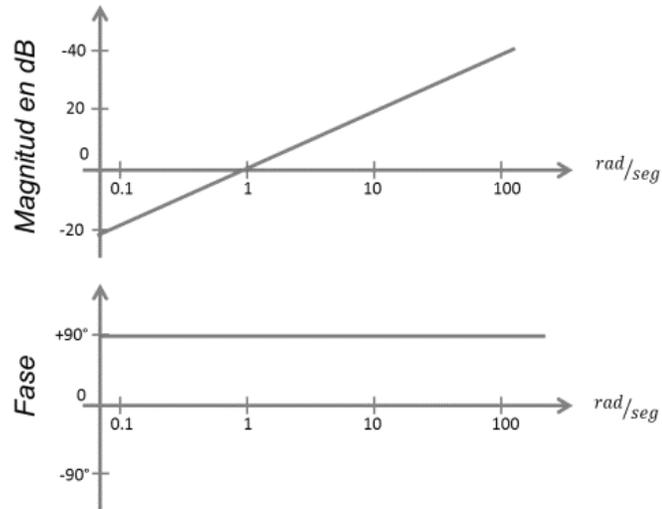


Figura 2-12: Diagrama de Bode de un derivador ideal.

De esta manera, la traza de Bode de magnitud es una línea recta de pendiente +20 [dB] por década. En cuanto a la fase del sistema, esta será constante para todas las frecuencias siendo de +90°. Esto significa que a salida se adelanta respecto a la entrada en 90°.

2.4 Primer orden

La función de primer orden se realiza con el circuito de la Figura 2-13 corresponde a un filtro pasabajas, configuración no inversora.

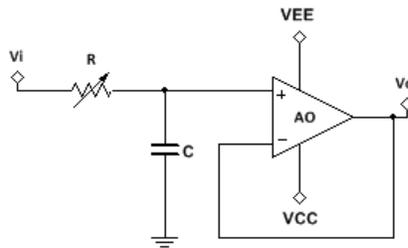


Figura 2-13: Circuito función de primer orden.

La función de transferencia está dada por:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1/RC}{s + 1/RC} = \frac{1}{RCs + 1}$$

Donde $\tau = RC$

Adicionalmente se le conecta en serie un circuito de ganancia para que a la función se le puedan variar los parámetros K y τ , como el presentado en la Figura 2-1. Para esto, se utilizan dos potenciómetros, donde los valores van desde los 2 [k Ω] hasta los 50 [k Ω], permitiendo variar la ganancia entre 0.2 y 5 y la perilla de la constante de tiempo va desde 2 [k Ω] hasta 100[k Ω], permitiendo variar la constante de tiempo desde 0.2 [s] hasta 10[s].

A continuación en la Tabla 2-2 y Tabla 2-3, se detallan los distintos valores a utilizar.

Tabla 2-2: Valores de ganancia para el módulo de Primer Orden

R₁[kΩ]	R₂[kΩ]	Ganancia K
10	2	0.2
	5	0.5
	7	0.7
	10	1
	30	3
	50	5

Tabla 2-3: Valores de τ para el módulo de Primer Orden.

C [μF]	R[kΩ]	Constante de tiempo τ [s]
100	2	0.2
	10	1
	20	2
	30	3
	40	4
	50	5
	60	6
	70	7
	80	8
	90	9
	100	10

Entre las señales típicas de entrada se utiliza el escalón, es por esto que se presentará la respuesta esperada, ya que en las pruebas y simulaciones posteriores se trabaja con este tipo de entrada.

Siendo la salida en el dominio de Laplace:

$$Y(s) = G(s)U(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \frac{M}{s}$$

Y en el dominio del tiempo:

$$y(t) = MK(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})\mu(t)$$

Siendo τ el tiempo que tarda el sistema en alcanzar el 63.2% de su valor final y K el valor final al que llegará como lo indica a continuación, la gráfica de la Figura 2-14 [25].

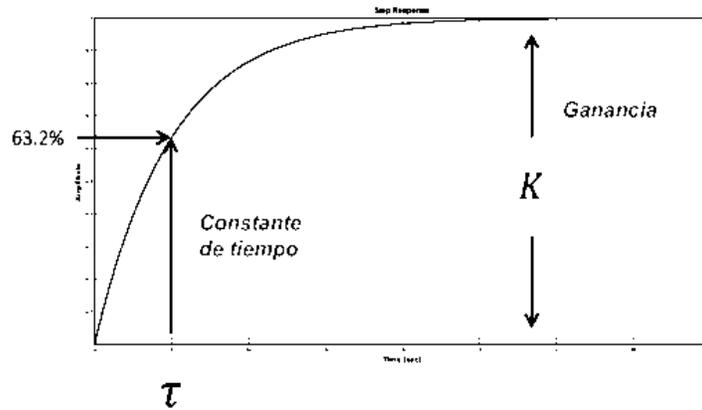


Figura 2-14: Respuesta de primer orden a una entrada escalón

$$y(0) = MK(1 - e^0) = 0$$

$$y(\tau) = MK(1 - e^{-1}) = 0.632MK$$

$$y(\infty) = MK(1 - e^{-\infty}) = MK$$

Por otro lado, para realizar un análisis en el dominio de la frecuencia, se trabajará con la obtención del correspondiente diagrama de Bode [26]:

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \rightarrow G(j\omega) = \frac{1}{\tau j\omega + 1}$$

$$|G(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tau\omega)^2}}$$

$$\angle G(j\omega) = \phi = \tan^{-1}\left(\frac{Im}{Re}\right) \rightarrow \phi = \tan^{-1}(-\tau\omega)$$

Se tiene que:

$$\omega \ll \frac{1}{\tau} \rightarrow 20\log|G(j\omega)| = -20\log(1) = 0[dB] \text{ y } \phi = 0^\circ$$

$$\omega = \frac{1}{\tau} \rightarrow 20\log|G(j\omega)| = -20\log(\sqrt{2}) = -3[dB] \text{ y } \phi = -45^\circ$$

$$\omega \gg \frac{1}{\tau} \rightarrow 20\log|G(j\omega)| = -20\log(\tau\omega) = 0[dB] \text{ y } \phi = -90^\circ$$

La intersección de las líneas rectas se denomina punto de quiebre, frecuencia de corte, o frecuencia esquina en $\omega = 1/\tau$. Estas líneas se conocen como aproximaciones asintóticas de la traza real (Figura 2-15).

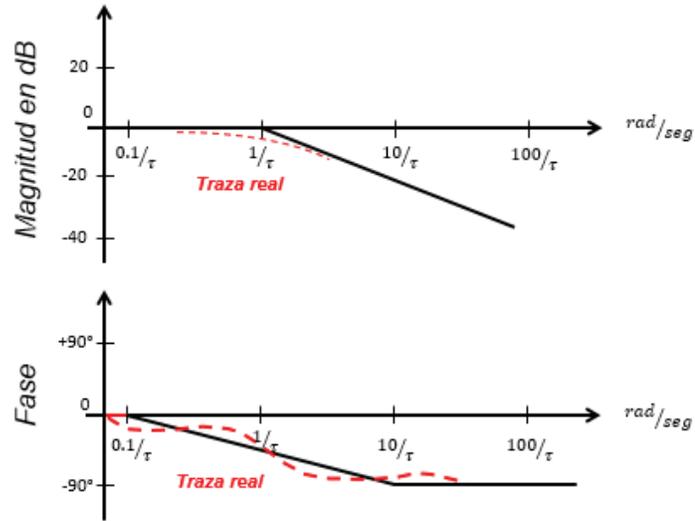


Figura 2-15: Diagrama de Bode de una función de primer orden.

2.5 Segundo orden

La función de segundo orden se realiza con un circuito que tiene un comportamiento subamortiguado, el cual se implementa mediante un filtro pasa-bajas tipo Sallen-Key.

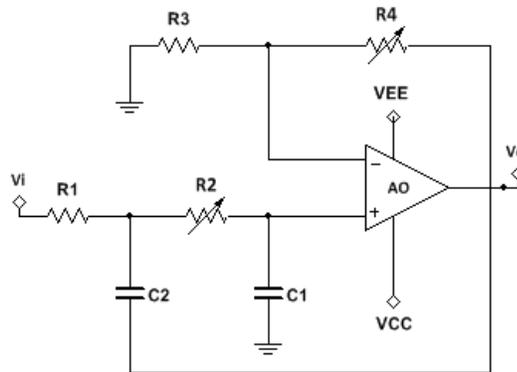


Figura 2-16: Circuito función de segundo orden.

La función de transferencia está dada por:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1-\beta}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1} \right) s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

Donde:

$$K = \frac{(R_3 + R_4)}{R_3}$$

Considerando $R_1 = R_2 = R$ Y $C_1 = C_2 = C$,

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K \frac{1}{R^2 C^2}}{s^2 + \left(\frac{3-\beta}{RC}\right)s + \frac{1}{R^2 C^2}} = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2}$$

Donde la frecuencia natural y el coeficiente de amortiguamiento están dados por las siguientes expresiones:

$$\omega_n = \frac{1}{RC} \quad \xi = 1 - \frac{R_4}{2R_3}$$

Este circuito está compuesto por $C = 100$ [μF] y R ajustable 100 [Ω]- 20 [$k\Omega$] permitiendo obtener ω_n entre 0.5 [rad/s] y 100 [rad/s]. Por otra parte R_4 también es una resistencia ajustable con un valor entre 2 [$k\Omega$] y 16 [$k\Omega$], con esto se conseguirá variar ξ desde 0.2 hasta 0.9 . En la Tabla 2-4 y Tabla 2-5 se señalan en detalle los valores de estos parámetros.

Tabla 2-4: Valores de frecuencia natural.

C [μF]	R [$k\Omega$]	ω_n
100	20	0.5
	10	1
	1	10
	0.1	100

Tabla 2-5: Valores de factor de amortiguamiento y ganancia.

R_3 [$k\Omega$]	R_4 [$k\Omega$]	ξ	K
10	16	0.2	2.6
	14	0.3	2.4
	12	0.4	2.2
	10	0.5	2
	8	0.6	1.8
	6	0.7	1.6
	4	0.8	1.4
	2	0.9	1.2

Además cabe mencionar que debido a que la ganancia depende de los mismos parámetros que ξ , esta no se podrá ajustar manualmente por el usuario, sino que viene dada por el sistema, es por esto, que en la Tabla 2-5 se puede apreciar que para cada valor de factor de amortiguamiento, existe una ganancia determinada.

La importancia de definir parámetros temporales de un sistema subamortiguado ante una entrada escalón se debe a que muchas plantas o procesos tienen dinámicas que se aproximan a esta función de transferencia, motivo por el cual es muy utilizada. En la Figura 2-17 se indican estos cuatro parámetros que posteriormente son definidos.

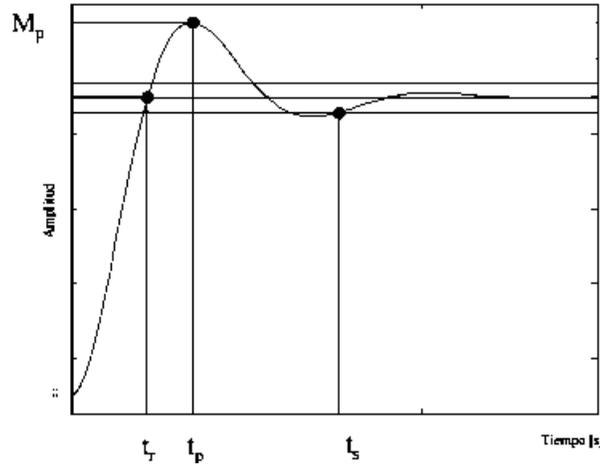


Figura 2-17: Respuesta de segundo orden a una entrada escalón.

- Tiempo de establecimiento t_s : tiempo en que el sistema alcanza un error del 2% o 5%, dependiendo el criterio, del valor final del régimen permanente.
- Tiempo de pico t_p : tiempo que se tarda en alcanzar la máxima amplitud de salida.
- Sobreoscilación M_p : valor de pico máximo de la salida ponderado con el valor final.
- Tiempo de subida t_r : el tiempo transcurrido en alcanzar por primera vez el 100% del valor final de la señal de salida.

De igual manera que en los casos anteriores se presentan las expresiones correspondientes a módulo y la fase para función de segundo orden.

Siendo,

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)}$$

$$|G(j\omega)| = \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right]^2}$$

$$\angle G(j\omega) = \phi = \tan^{-1}\left(\frac{Im}{Re}\right) \rightarrow \phi = \tan^{-1}\left(-\frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}\right)$$

Se tiene que:

$$\omega \ll \omega_n \rightarrow 20\log|G(j\omega)| = -20\log(1) = 0[dB] \text{ y } \phi = 0^\circ$$

$$\omega = \omega_n \rightarrow 20\log|G(j\omega)| = -20\log(2\xi) \text{ y } \phi = -90^\circ$$

$$\omega \gg \omega_n \rightarrow 20\log|G(j\omega)| = -40\log\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right) \text{ y } \phi = -180^\circ$$

A continuación en la Figura 2-18 se presenta el diagrama de Bode para una función de segundo orden. En este diagrama se muestran distintas curvas, correspondientes a cada valor del factor de amortiguamiento señalado.

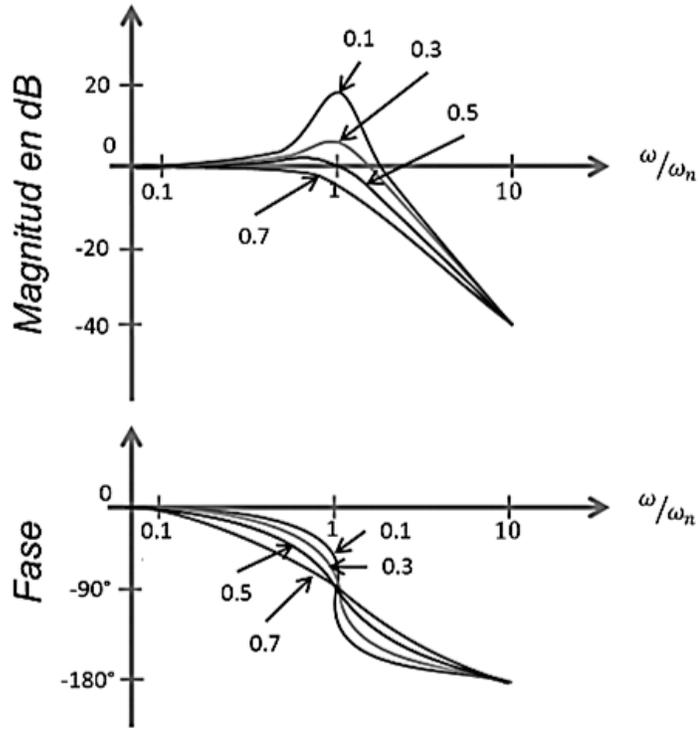


Figura 2-18: Diagrama de Bode de una función de Segundo Orden para distintos ξ .

2.6 Controlador PID

Se conoce con el nombre de algoritmo no interactivo de control PID al algoritmo clásico, dado por la expresión [27]:

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s)$$

Donde:

$U(s)$: Acción de control o salida del controlador

K_p : Ganancia de la acción proporcional

T_i : Constante de tiempo de la acción integral

T_d : Constante de tiempo de la acción derivativa

$E(s)$: Señal de error

Con el calificativo de no interactivo se refiere a que las acciones de control integral y derivativa son independientes (ver diagrama de la Figura 2-19). Este algoritmo es el más citado en la bibliografía y el más utilizado actualmente.

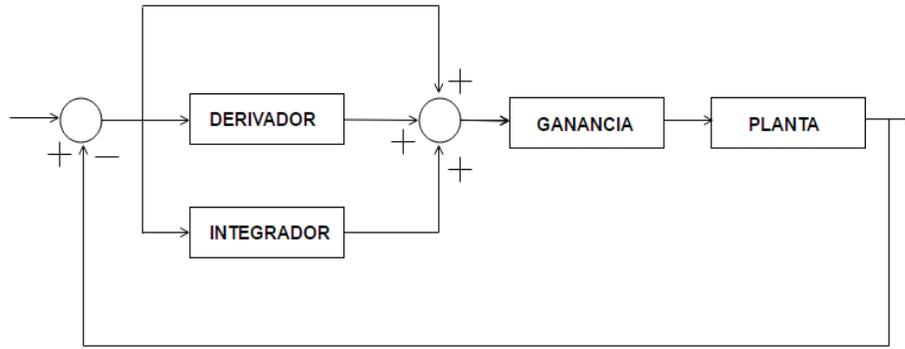


Figura 2-19: Diagrama de bloques de un controlador PID no interactivo.

En la Figura 2-20 se puede apreciar el circuito correspondiente a un controlador PID, donde en una primera instancia se encuentra el restador, que permite calcular el valor del error, luego se encuentra la acción derivativa e integral que van a sumarse y posteriormente multiplicarse por la acción proporcional.

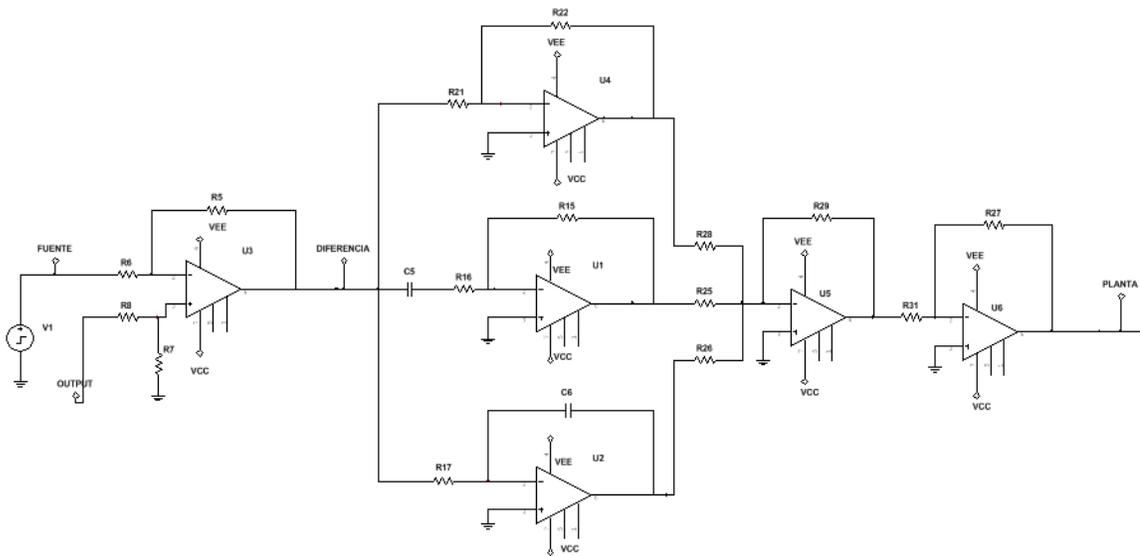


Figura 2-20: Circuito de controlador PID no interactivo.

Quedando la función de la siguiente manera:

$$U(s) = \frac{R_{27}R_{29}}{R_{28}R_{31}} \left(1 + \frac{1}{\frac{R_{17}R_{26}R_{29}C_6}{R_{28}R_{29}}s} + \frac{R_{15}R_{28}R_{29}C_5}{R_{25}R_{29}}s \right) E(s)$$

$$K_p = \frac{R_{27}R_{29}}{R_{28}R_{31}}$$

$$T_i = \frac{R_{17}R_{26}C_6}{R_{28}}$$

$$T_d = \frac{R_{15}R_{28}C_5}{R_{25}}$$

Donde K_p varía desde 4 a 18, con $R_{29}=100[\text{k}\Omega]$, $R_{28}=5[\text{k}\Omega]$, $R_{31}=10[\text{k}\Omega]$ (ver Tabla 2-6).

Tabla 2-6: Variación de K_p .

$R_{27} [\text{k}\Omega]$	K_p
2	4
3	6
5	10
6	12
8	16
9	18

Donde T_i varía desde 0.1 [s] a 3.6 [s], con $R_{17}=10[\text{k}\Omega]$, $C_6=10[\mu\text{F}]$, $R_{28}=5[\text{k}\Omega]$ (ver Tabla 2-7).

Tabla 2-7: Variación de T_i .

$R_{26} [\text{k}\Omega]$	T_i
5	0.1
45	0.9
80	1.6
125	2.5
180	3.6

Donde T_d varía desde 0.26 [s] a 1.9 [s], con $R_{15}=1[\text{k}\Omega]$, $C_5=100[\mu\text{F}]$, $R_{28}=5[\text{k}\Omega]$ (ver Tabla 2-8).

Tabla 2-8: Variación de T_d .

$R_{26} [\text{k}\Omega]$	T_d
1.92	0.26
1.66	0.3
1.25	0.4
0.83	0.6
0.5	1
0.26	1.9

Como se menciona anteriormente para determinar el error en el sistema es necesario calcular la diferencia entre la entrada (referencia) y la salida del sistema. Lo anterior se puede implementar mediante el circuito restador de la Figura 2-21.

Donde la salida del circuito será:

$$V_o = V_{\text{Retroalimentación}} - V_i$$

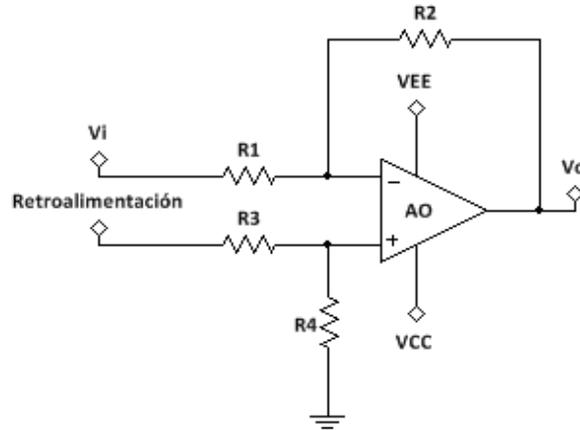


Figura 2-21: Circuito restador.

Cabe mencionar que este circuito posee una configuración inversora al igual que la tendrá el circuito PID, por lo tanto los resultados que se obtengan posteriormente serán positivos.

Posteriormente se encuentra la **etapa derivativa** permite mejorar el amortiguamiento del sistema, lo cual permite aumentar la acción proporcional y con esto aumentar la velocidad de respuesta que se puede haber perdido por causa de la etapa integradora. Para su implementación se utiliza el circuito de la Figura 2-8 estudiado previamente [28].

En la Figura 2-22 se observa que las oscilaciones se amortiguan a medida que aumenta la acción derivativa y la salida adquiere forma de curva exponencial.

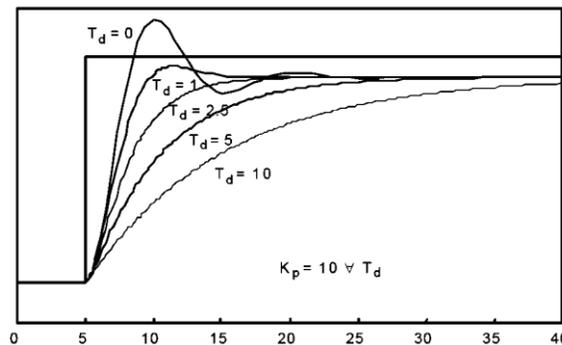


Figura 2-22: Acción de la etapa derivativa.

Junto a esto también se encuentra la **etapa integradora**, la cual permite reducir el error en estado estacionario y es posible implementarla mediante el circuito de la Figura 2-3. El capacitor en el lazo de realimentación es el elemento que actúa como “memoria” de los datos de error del sistema.

En la Figura 2-23 se muestra que el error en estado estacionario se elimina cuando T_i tiene valores finitos y al disminuir su valor, la respuesta se hace cada vez más oscilatoria, pudiendo incluso desestabilizar el sistema.

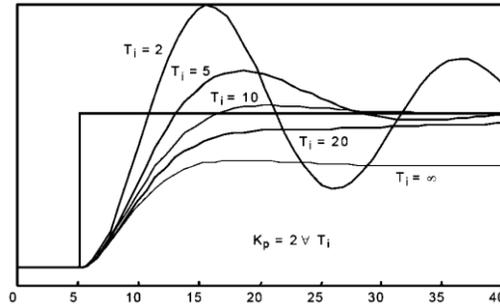


Figura 2-23: Acción de la etapa integral.

Luego, ambas etapas se suman mediante el circuito de la Figura 2-24:

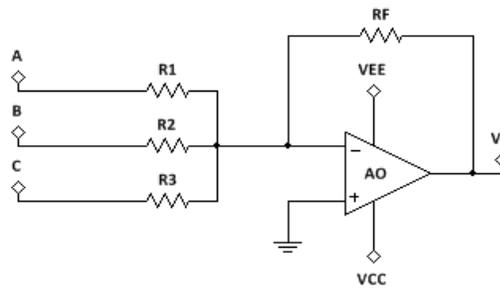


Figura 2-24: Circuito sumador.

La expresión del voltaje de salida será:

$$V_o = -R_F \left(\frac{V_A}{R_1} + \frac{V_B}{R_2} + \frac{V_C}{R_3} \right)$$

Finalmente se agrega la **etapa proporcional**, la cual consta de un amplificador con ganancia ajustable como el circuito que se presentó en la Figura 2-1. Su función es aumentar la velocidad de respuesta y reducir el error en estado estacionario del sistema.

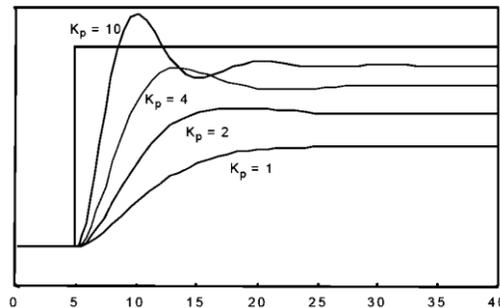


Figura 2-25: Acción de la etapa proporcional.

En la Figura 2-25 se puede apreciar que cuando aumenta la ganancia K_p del controlador, el error en estado estacionario disminuye, el proceso responde más rápido y la sobreelongación y las oscilaciones aumentan.

3 Diseño de la planta

A continuación, se presentan las principales características del diseño del hardware de la planta, que abarca desde el proceso de creación de las cajas, placas electrónicas, cables conectores, etiquetas, entre otros. De la misma forma se expone el diseño del software, el cual se refiere a una interfaz realizada en LabVIEW compuesta por una etapa de simulación y una etapa experimental.

3.1 Hardware

En la siguiente sección se detalla el proceso de creación, construcción y terminación de los módulos así como el desarrollo de las placas electrónicas de cada una de los módulos.

3.1.1 Módulos Electrónicos

Para realizar el diseño de los distintos módulos, se utiliza el Software 123D Design. En la Figura 3-1 se aprecia que esta caja cuenta con los agujeros para ensamblar los conectores banana, soporte tanto interior, para los tornillos que fijan la placa, como exterior, para fijar la tapa, y cuenta además con un espacio para agregar una etiqueta con la función de transferencia correspondiente.

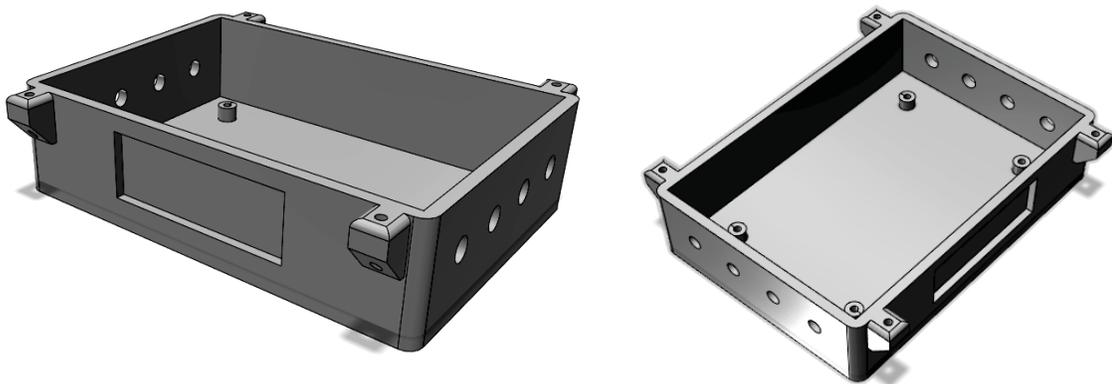
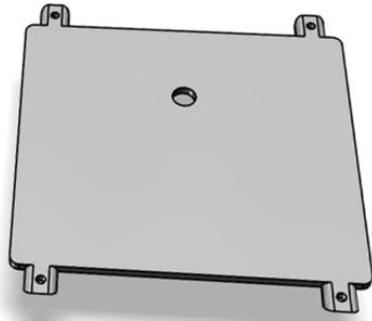


Figura 3-1: Diseño 3D de los módulos.

Junto con esto se presenta el diseño de la tapa correspondiente, la cual, aparte de los espacios para atornillar la misma a la caja, incluye los espacios para las perillas y título del módulo como se puede apreciar en la Figura 3-2.



GANANCIA
DERIVADOR
INTEGRADOR

Figura 3-2: Diseño de tapa y títulos de los módulos.

En las siguientes imágenes se puede visualizar parte del proceso llevado a cabo en el desarrollo de cada módulo. Tanto las cajas como letras y títulos fueron impresos en el Laboratorio de Robótica de la escuela en la impresora 3D de MakerBot Replicator 2 que aparece en la Figura 3-3.



Figura 3-3: Impresora 3D Laboratorio de Robótica.

Para mayor facilidad en el trabajo, se estandarizan todas las medidas, como por ejemplo altura de los conectores (Figura 3-4) y separaciones entre cada elemento, realizando solo pequeñas variaciones dependiendo de la función de transferencia para la cual se vaya a utilizar.



Figura 3-4: Conexiones de alimentación.

Los cuatro espacios en cada extremo de las cajas son para las cuatro entradas (V_{IN} , V_{CC} , V_{EE} , GND), y para las cuatro salidas (V_{OUT} , V_{CC} , V_{EE} , GND). Estas entradas y salidas están pensadas de manera tal que los módulos puedan conectarse entre sí de tal forma que permitan realizar funciones más

grandes y/o complejas. La función a la que representa cada uno de los módulos es especificada en una etiqueta en la parte frontal (Figura 3-5).



Figura 3-5: Vista de etiquetado frontal.

Además, se diseñaron cables conectores banana de distintos colores: Verdes y amarillos para el voltaje de alimentación de los amplificadores (+12V y -12V), rojo para el voltaje de entrada, negro para GND y azul para la realimentación. Estos se pueden apreciar en la Figura 3-6 y la forma en que se conectan a uno de los módulos en la Figura 3-7.



Figura 3-6: Cables conectores.



Figura 3-7: Módulo con conectores de colores.

En la Figura 3-8 es posible visualizar las perillas de los módulos, con sus respectivas graduaciones. Los números e indicadores de las perillas fueron realizadas también en la impresora 3D.



Figura 3-8: Graducción de perillas.

Junto con esto se imprimió el nombre de los componentes y título de la función en una etiqueta colocada sobre la placa para dar una mejor terminación de estas como se aprecia en la Figura 3-9. Esto también permite visualizar de manera más rápida la posición de los distintos componentes, en caso de que se desee cambiar o reparar alguno. Por esta misma razón para favorecer la manipulación, por ejemplo de amplificadores operacionales, es que se agregaron sockets, lo cual permite no tener que intervenir la soldadura en caso de reemplazar este componente.

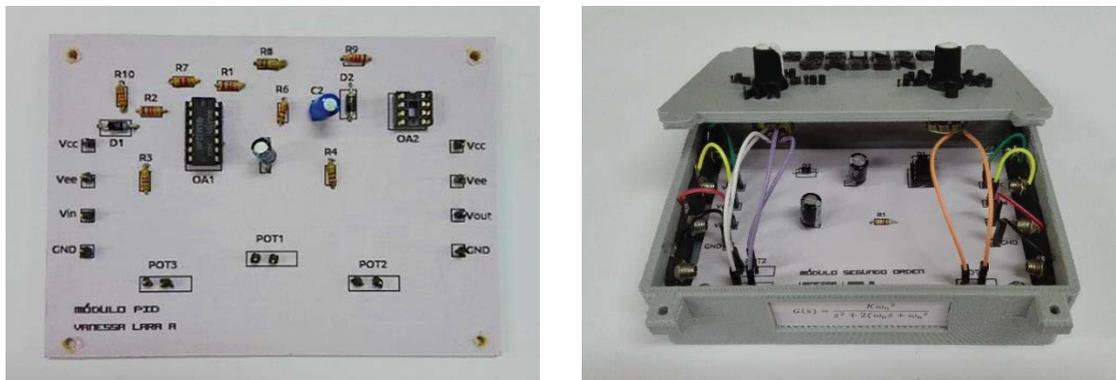


Figura 3-9: Etiquetado de placas.

Y por último en la Figura 3-10 se pueden apreciar los siete módulos de la planta terminados.

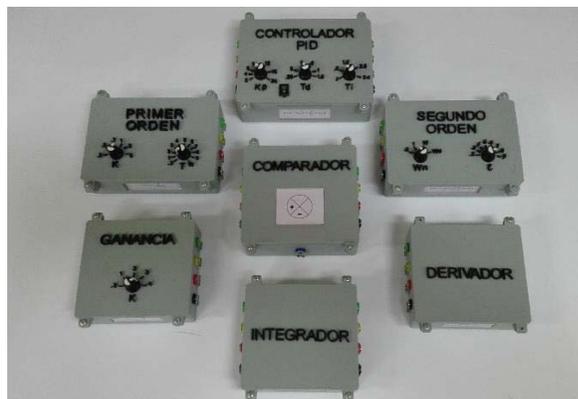


Figura 3-10: Módulos de la planta.

3.1.2 Placas PCB

En electrónica, una placa de circuito impreso o PCB (printed circuit board), es una superficie constituida por pistas de material conductor (generalmente cobre) sobre un sustrato no conductor. Este es utilizado para conectar de manera eléctrica los distintos componentes del circuito. Este tipo de procesos puede ser llevado a cabo de manera automatizada o manual. Entre los métodos más comunes se encuentran: la impresión por planchado, impresión serigráfica, fotograbado y fresado.

En este caso las placas fueron realizadas de forma automatizada en la fresadora CNC RS-3020 ubicada en el laboratorio de robótica de la escuela. Estas máquinas permiten realizar trabajos mecanizados mediante el movimiento de una herramienta rotativa de corte, llamada fresa, permitiendo dibujar las pistas y posteriormente cortar la placa al tamaño adecuado.

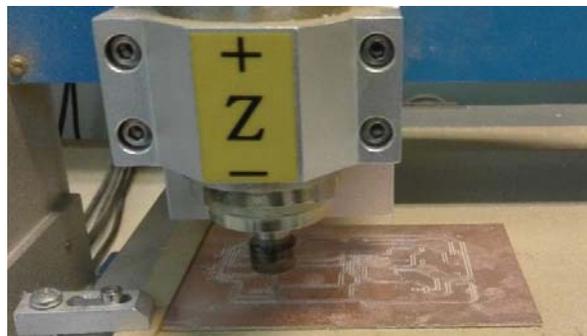


Figura 3-11: Perfilado de PCB en máquina CNC RS-3020.

El software permite imprimir las pistas de la placa diseñada para posteriormente construir la placa. Al igual que los módulos estas fueron estandarizadas, tanto en sus dimensiones totales, como la de los elementos y respectivos conectores.

En cuanto al diseño de las placas se utiliza el software Altium Designer. Se realizan los distintos circuitos correspondientes a la ganancia, derivador, integrador, primer orden, segundo orden, controlador PID y comparador, los cuales se muestran a continuación:

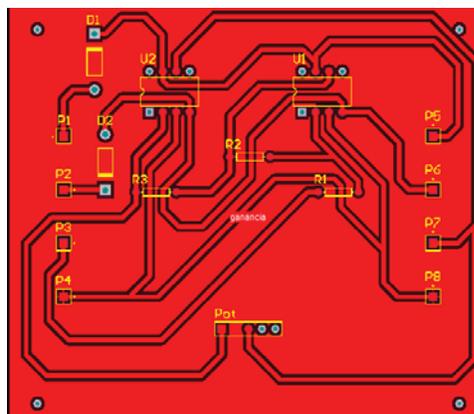


Figura 3-12: Placa circuito ganancia.

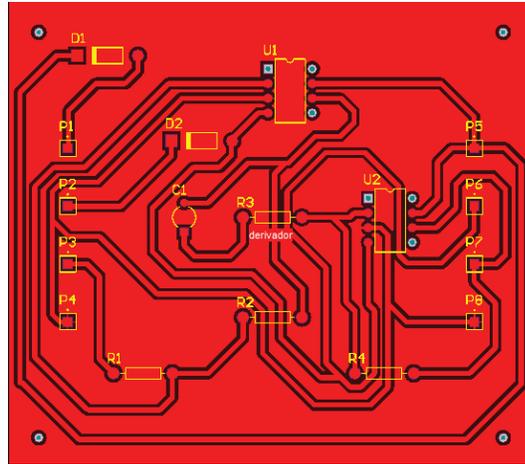


Figura 3-13: Placa circuito derivador.

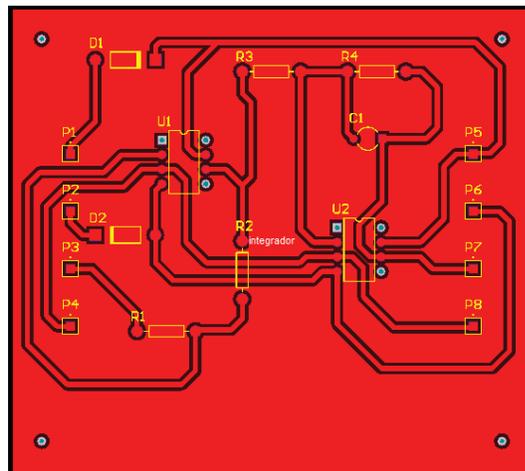


Figura 3-14: Placa circuito integrador.

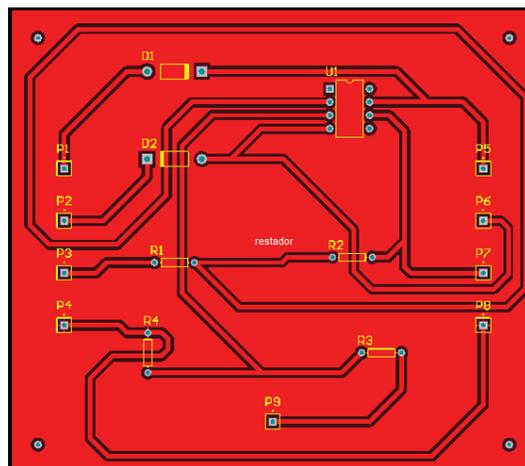


Figura 3-15: Placa circuito comparador.

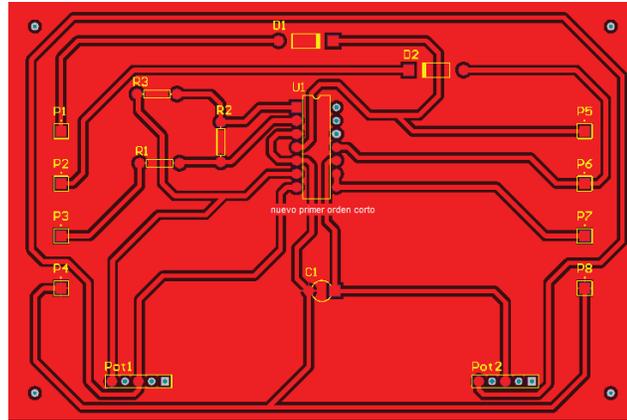


Figura 3-16: Placa circuito primer orden.

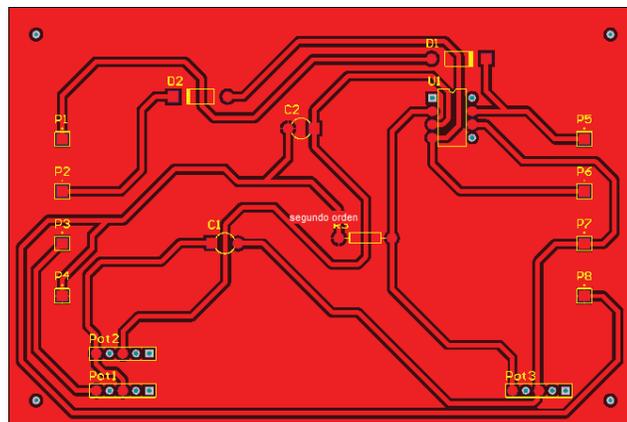


Figura 3-17: Placa circuito segundo orden.

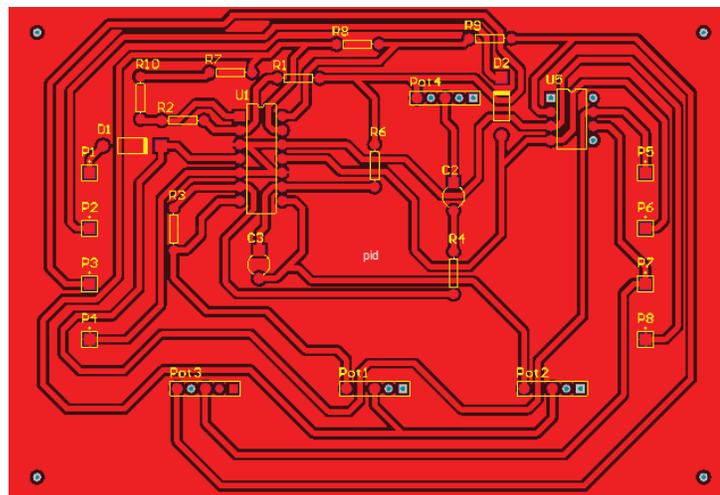


Figura 3-18: Placa circuito controlador PID.

Posteriormente se utiliza el software ArtCAM dónde se desarrolla la programación de las pistas, perforaciones y corte de la placa para llevar a cabo el fresado en la máquina CNC.

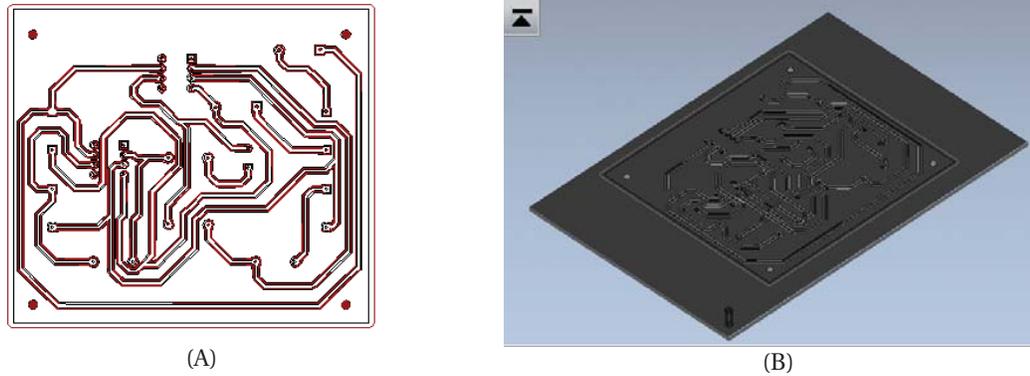


Figura 3-19: Visualización de las placas en 2D (A) y 3D (B) en el software ArtCAM.

3.2 Software

Se presenta el desarrollo de la interfaz realizada en el software LabVIEW. Esta importante herramienta consta de dos partes, una correspondiente a una etapa de simulación y una etapa de resultados experimentales.

3.2.1 Etapa de Simulación de la Interfaz

En primer lugar, la interfaz cuenta con una etapa de simulación, en la cual el estudiante puede obtener tanto las respuestas en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia. Así, al comienzo de cada actividad que se desarrolle con la planta, podrán visualizar los resultados esperados de acuerdo a la teoría antes estudiada. Este paso será fundamental para tener una base comparativa y analizar los resultados experimentales.

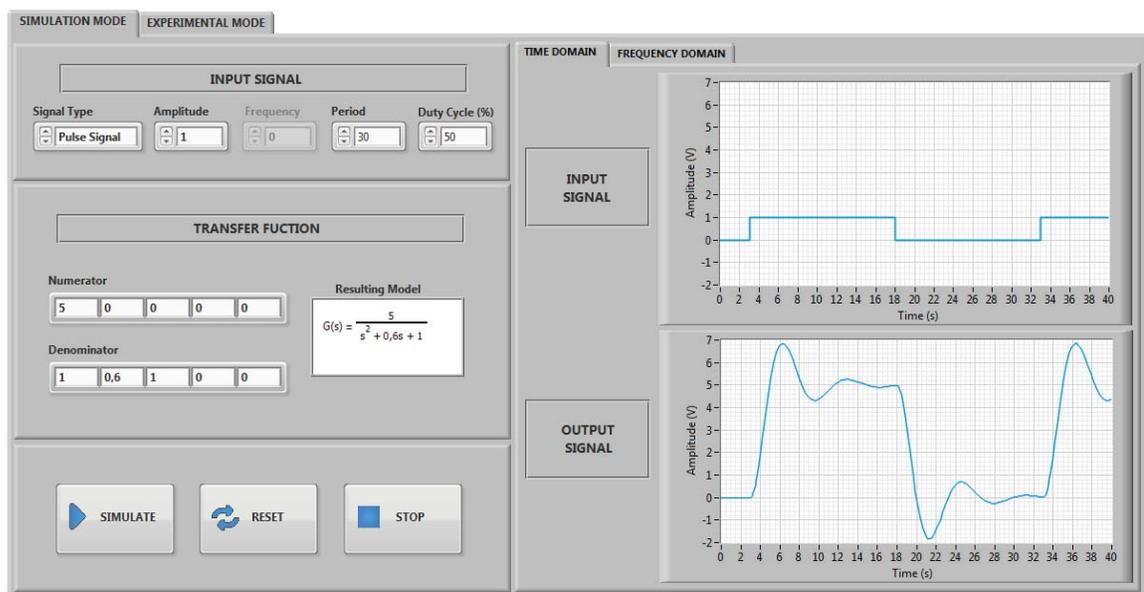


Figura 3-20: Pantalla de Modo Simulación.

En las Figura 3-20 y Figura 3-21 se puede observar que esta permite la elección del tipo de entrada, además de los parámetros correspondientes que se puedan ajustar en cada caso. Más abajo el usuario podrá introducir los valores correspondientes al numerador y denominador de la función de transferencia, para posteriormente obtener las gráficas de respuesta de cada caso, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

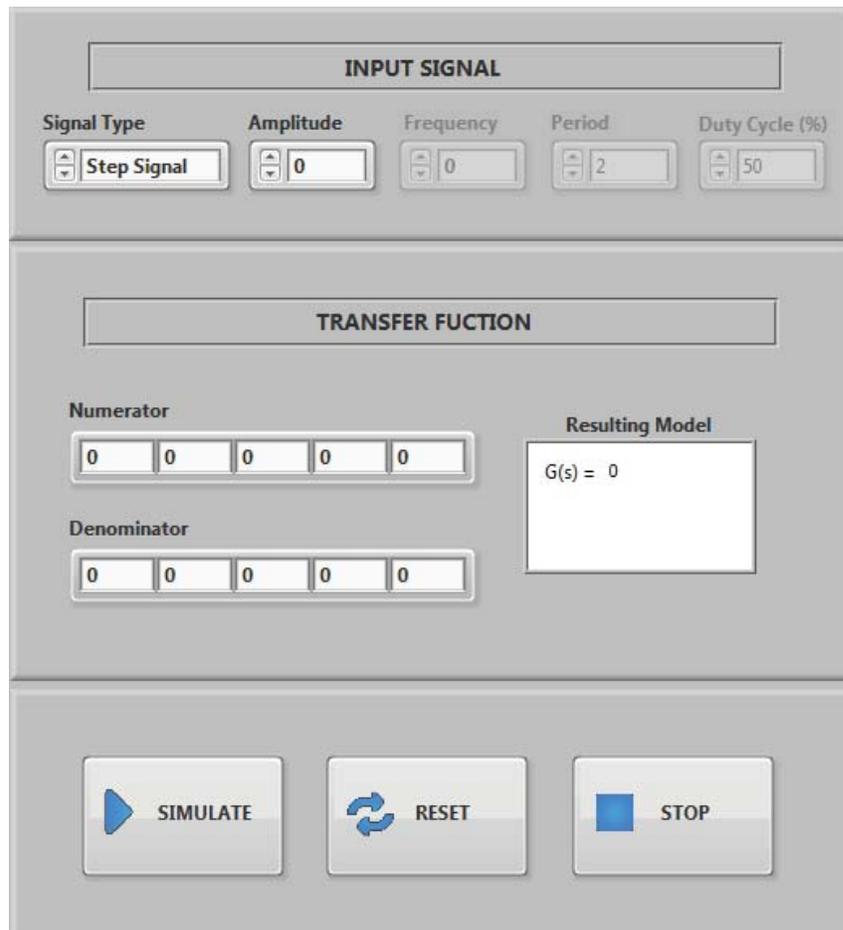


Figura 3-21: Sección de control en el Modo Simulación.

En la parte inferior se encuentran los botones: SIMULATE, RESET y STOP, los cuales permiten simular cada vez que se cambie algún parámetro o la misma función de transferencia, sin necesidad de tener que estar deteniendo continuamente el programa. Además, con el botón RESET se puede refrescar la pantalla para llevar los parámetros y gráficas en blanco. Por otro lado se cuenta con el botón STOP para detener la simulación. Todos de tamaño grande y vistoso para que sean de fácil identificación por parte del estudiante.

En cuanto al desarrollo de la programación, podemos observar el diagrama de bloques correspondiente a esta etapa en la Figura 3-22. Se realiza la creación de una función de transferencia mediante la utilización de los tres primeros subVI, los cuales crean el modelo a partir de dos arreglos, numerador y denominador, le asignan un identificador y finalmente se muestra el resultado en un cuadro (Figura 3-23).

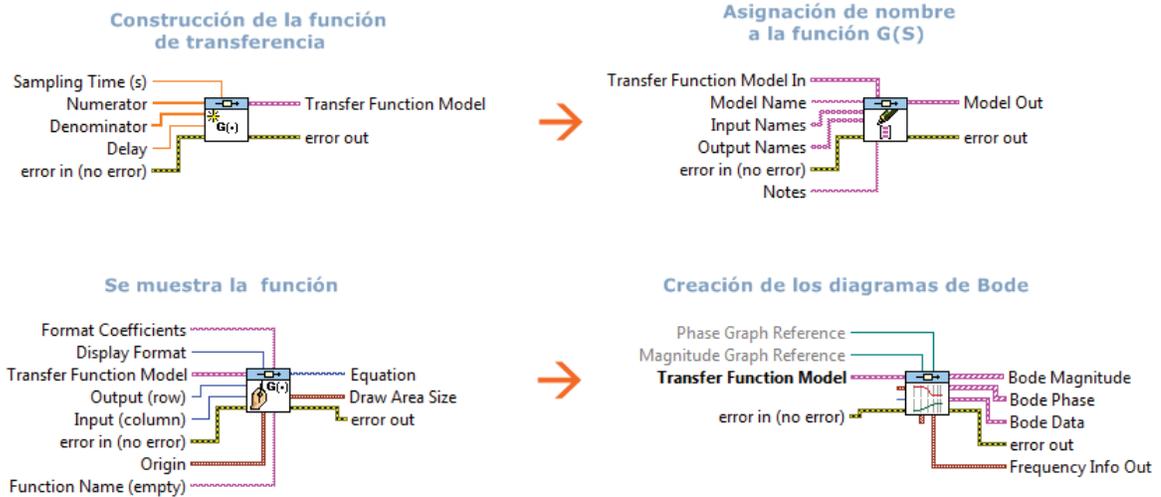


Figura 3-22: Principales bloques utilizados en la creación de una función de transferencia.

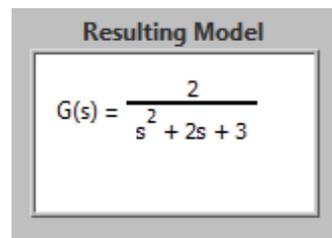


Figura 3-23: Visualización del modelo.

Además, se observa que esta función de transferencia se envía hacia el bloque que permite graficar el diagrama de bode, tanto de magnitud como de fase.

En la Figura 3-24 se muestra el proceso realizado para generar distintas señales de entrada (tipo escalón, pulso, sinusoidal, rampa). Estos bloques permiten mediante un botón de control manipular los valores de amplitud, frecuencia, período y ciclo de trabajo en el caso que corresponda.

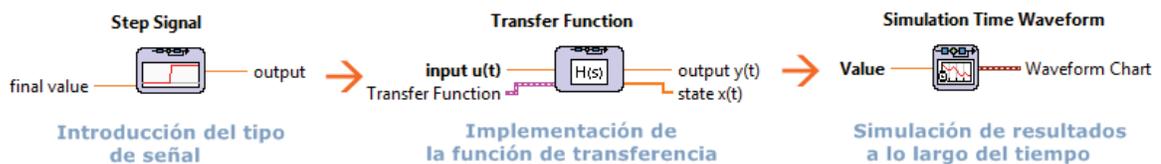


Figura 3-24: Bloques involucrados en la generación de las señales de entrada.

Luego, la salida de esta estructura se grafica para poder visualizar la señal de entrada en la interfaz y, además, se introduce en la función de transferencia para observar el comportamiento a través del tiempo.

Otro elemento importante es el Control & Simulation Loop (Figura 3-25), el cual va a simular durante el tiempo que se programe o hasta que el programa se detenga. Además, permite utilizar herramientas exclusivas de control como los diferentes tipos de señal de entrada que se mencionaron anteriormente.



Figura 3-25: Bloque de Control & Simulation Loop.

3.2.2 Etapa Experimental de la Interfaz

Por otro lado, se presenta el desarrollo de la sección dedicada a la obtención de datos del sistema que se esté analizando, enfocada a la configuración de los parámetros de entrada (tipo de entrada, amplitud, frecuencia, entre otros) así como a la visualización de la respuesta ante diferentes condiciones.

Se utiliza la tarjeta de adquisición de datos USB-6002 de National Instruments como herramienta principal en la comunicación entre los módulos y el computador. En primer lugar, se comienza adquiriendo una señal analógica, es decir, logrando que la tarjeta DAQ recibiera la respuesta de un circuito para visualizar la gráfica en la pantalla. Luego, se continúa con la generación de una señal analógica para lograr que la tarjeta DAQ envíe la entrada que se solicite a los módulos.

En la Figura 3-26 se muestra la interfaz realizada, la cual es análoga a la de simulación, ya que cuenta con el selector del tipo de entrada y sus correspondientes parámetros a configurar.

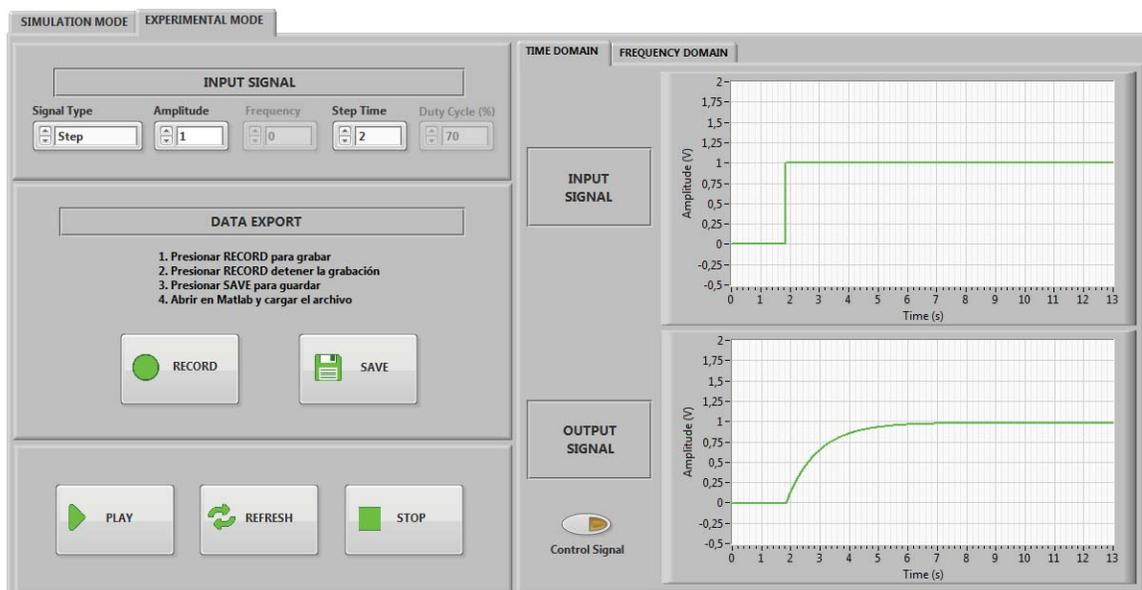
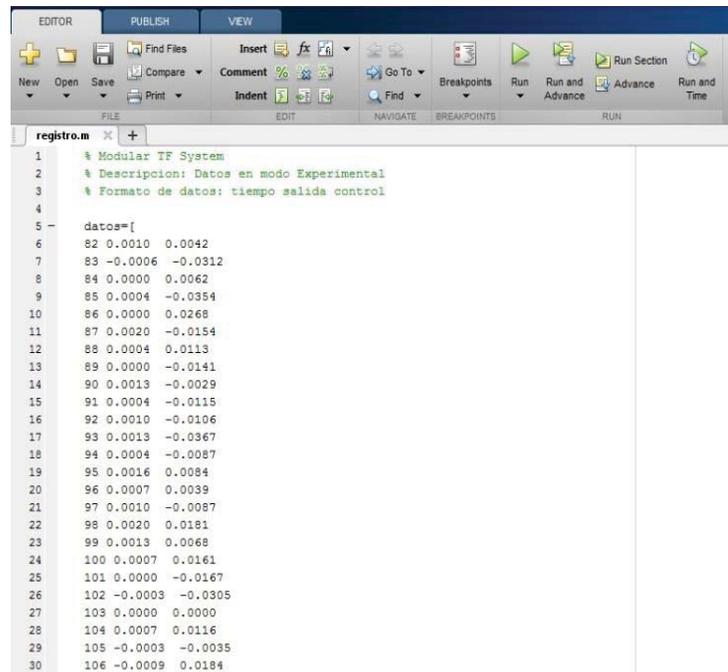


Figura 3-26: Pantalla de Modo Experimental.

Junto con esto, se agrega la posibilidad de exportar los datos al Software Matlab, lo cual es muy importante, debido a que este programa permite el uso de distintas herramientas, como IDENT, con la cual se puede realizar identificación de sistemas, entre otras, que permiten diferentes formas de análisis.

Como prueba se registraron los datos correspondientes a una respuesta de una función de primer orden ante una entrada escalón (Figura 3-27) y posteriormente fueron graficados en este programa. En la Figura 3-28 se observa la respuesta correspondiente.



```

1 % Modular TF System
2 % Descripción: Datos en modo Experimental
3 % Formato de datos: tiempo salida control
4
5 -
6 datos=[
7 82 0.0010 0.0042
8 83 -0.0006 -0.0312
9 84 0.0000 0.0062
10 85 0.0004 -0.0354
11 86 0.0000 0.0268
12 87 0.0020 -0.0154
13 88 0.0004 0.0113
14 89 0.0000 -0.0141
15 90 0.0013 -0.0029
16 91 0.0004 -0.0115
17 92 0.0010 -0.0106
18 93 0.0013 -0.0367
19 94 0.0004 -0.0087
20 95 0.0016 0.0084
21 96 0.0007 0.0039
22 97 0.0010 -0.0087
23 98 0.0020 0.0181
24 99 0.0013 0.0068
25 100 0.0007 0.0161
26 101 0.0000 -0.0167
27 102 -0.0003 -0.0305
28 103 0.0000 0.0000
29 104 0.0007 0.0116
30 105 -0.0003 -0.0035
31 106 -0.0009 0.0184

```

Figura 3-27: Registro de datos en Matlab.

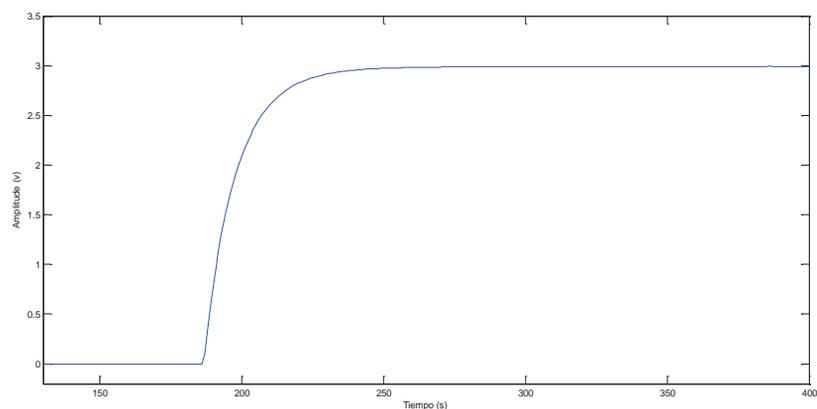


Figura 3-28: Respuesta obtenida en Matlab.

En la Figura 3-29 se pueden ver los principales bloques utilizados de la sección del Modo Experimental, cuyo contenido se explica a continuación.

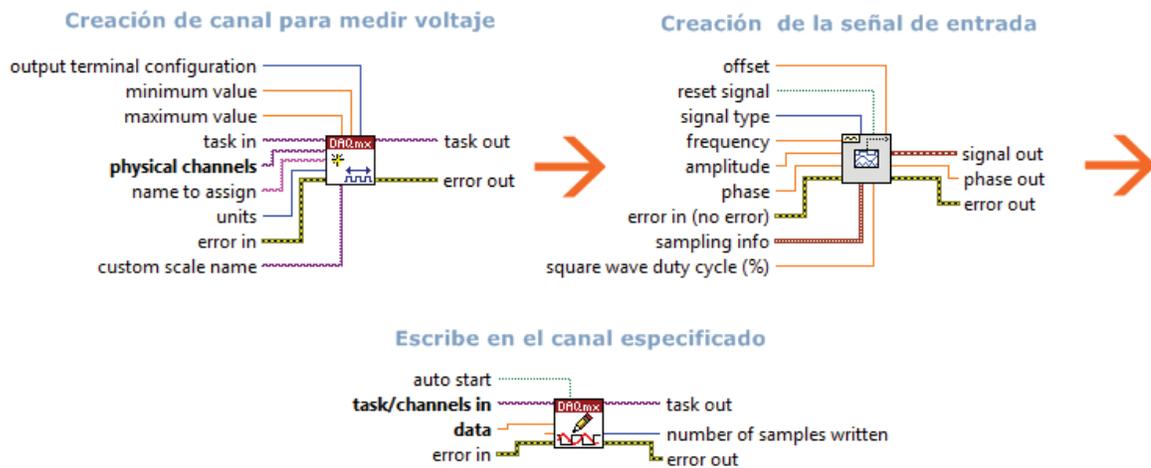


Figura 3-29: Principales bloques utilizados para generar una señal.

En primer lugar, se utiliza el bloque DAQmx Create Channel para crear un canal de voltaje y donde se selecciona en este caso el A00, que es el conector físico por donde se enviará la señal de entrada a los módulos. Luego, con el generador de funciones básicas se puede seleccionar el tipo de señal deseado y distintos parámetros como amplitud, frecuencia, ciclo de trabajo, entre otros. Posteriormente esta información es escrita en el canal seleccionado y además enviada al gráfico de señal de entrada.

Para leer los datos entregados por la planta, se realiza un procedimiento similar, en donde también se selecciona el canal por donde ingresará la información (AI0) y luego utilizando el bloque de la Figura 3-30 se efectúa la lectura por parte del DAQ y se procede a graficar.



Figura 3-30: Bloque de Lectura de DAQmx.

En cuanto a la etapa de exportar datos a Matlab, mientras esté presionado RECORD (Figura 3-31) todos los elementos obtenidos tanto en la entrada, la salida y la señal de control si es que corresponde, son almacenados en una "cola". Al soltar este botón, esta cola se almacena en una variable temporal que se transforma en un archivo .m de Matlab al presionar el botón SAVE. Para la realización de este proceso, los principales bloques utilizados son Enqueue Element y Flush Queue (Figura 3-32).

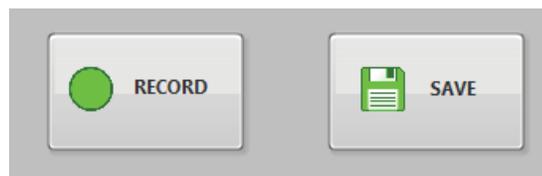


Figura 3-31: Botones para exportar datos.

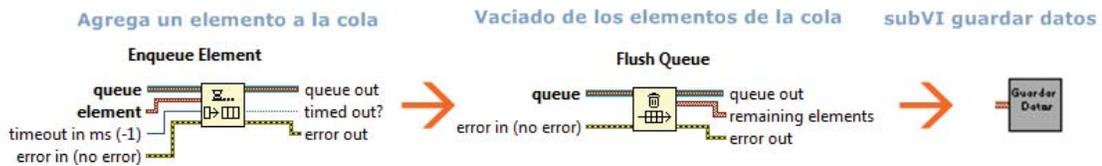


Figura 3-32: Bloques para guardar y exportar datos.

Con respecto al dominio de la frecuencia, se trabajó en la obtención del diagrama de Bode de forma experimental de manera automática, a partir del envío de señales a cuatro frecuencias distintas previamente establecidas (0.1 [rad/s], 0.4 [rad/s], 1 [rad/s], 4 [rad/s], 10 [rad/s], 40 [rad/s]), donde de acuerdo a la señal recibida se calcula la magnitud y fase.

Lo anterior se logra enviando señales sinusoidales con estas cuatro frecuencias por ciertos períodos de tiempo, y luego comparando los valores peak to peak de las señales de entrada y salida, obtenidos mediante el bloque de la Figura 3-33.

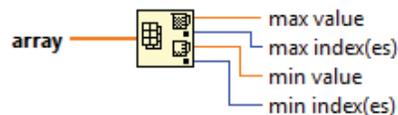


Figura 3-33: Bloque Array Max & Min.

Para el cálculo de la diferencia de fase entre ambas señales, se utiliza el bloque Extract Single Tone Information de la Figura 3-34, el cual a partir de un grupo de señales en un rango específico, calcula la frecuencia, amplitud y fase.

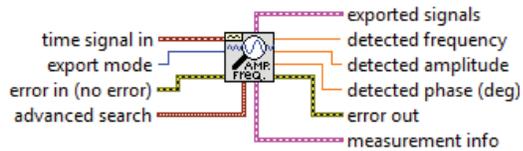


Figura 3-34: Bloque Extract Single Tone Information.

3.2.3 DAQ (Data Acquisition)

La adquisición de datos es el proceso de obtener o generar información de manera automatizada tanto de medidas analógicas como digitales, de diversos dispositivos para luego ser procesados dentro de un software, permitiendo analizar, controlar y almacenar estos datos [29].

Funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que un PC pueda interpretarlas. Los tres componentes clave de un dispositivo DAQ usado para medir una señal, son el circuito de acondicionamiento de señales, convertidor analógico-digital (ADC) y un bus de PC.

Este dispositivo será la unión entre los módulos y el PC, permitiéndose así enviar y recibir señales que sean visualizadas en la interfaz de usuario diseñada en LabVIEW. Su funcionamiento se muestra en la Figura 3-35.



Figura 3-35: Diagrama básico de un sistema DAQ.



Figura 3-36: Tarjeta de Adquisición de datos USB-6002.

Algunas de las características de la tarjeta de adquisición de datos USB-6002 (Figura 3-36) se pueden ver a continuación [30].

- 8 entradas analógicas (resolución de 16 bits, 50 kS/s), 2 salidas analógicas (16 bits, 5 kS/s/canal), 13 E/S digitales.
- Ligero y energizado por bus para fácil portabilidad.
- Sistema Operativo Windows
- Ancho de banda máximo 300[kHz]

4 Funcionamiento

A continuación, se presenta una visión general sobre el funcionamiento de los módulos electrónicos. Para esto se realiza una detallada explicación de cómo conectar las cajas, la fuente de alimentación, la tarjeta de adquisición de datos, algunas combinaciones posibles de realizar y además se dan a conocer resultados de diversas pruebas y mediciones.

4.1 Conexiones

Cada módulo tiene sus conectores de cuatro colores distintos para que sea más fácil e intuitivo para el alumno realizar las conexiones entre las cajas. El color verde se utiliza para el voltaje de alimentación positiva (V_{cc}), amarillo para el voltaje de alimentación negativa (V_{ee}), rojo para la entrada y salida según corresponda (V_{in} , V_{out}) y negro para la tierra (GND) (ver Figura 4-1).

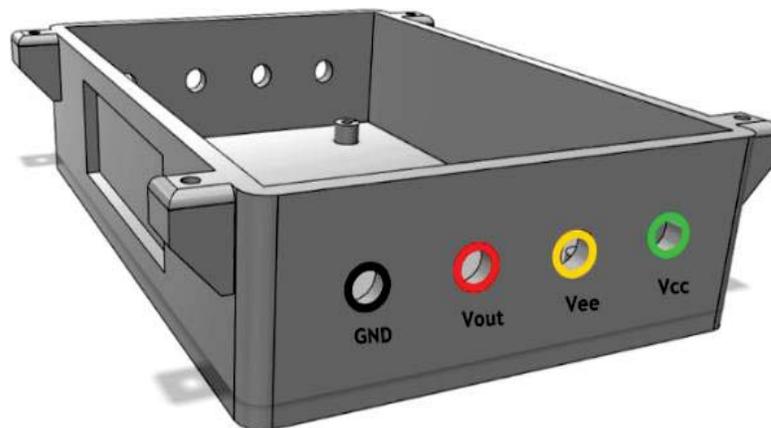


Figura 4-1: Conectores módulos electrónicos.

Además, se cuenta con cables bananas de los mismos colores ya mencionados, permitiéndose así la unión de varios módulos para formar funciones más complejas. En la Figura 4-2 se muestra un diagrama en donde se conectan los módulos de ganancia y primer orden. El voltaje de la alimentación positiva y negativa son entregados por una fuente (± 12 [V]) y tanto la señal de entrada como la señal de salida están conectadas al computador mediante una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) de National Instruments, utilizando los pines señalados en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Conexiones utilizadas en el DAQ.

	Pin	Función
Entradas análogas	AI0	Recibe la señal de salida de los módulos.
	AI4	Recibe la señal de control.
Salida análoga	AO0	Envío de señal de entrada a los módulos.

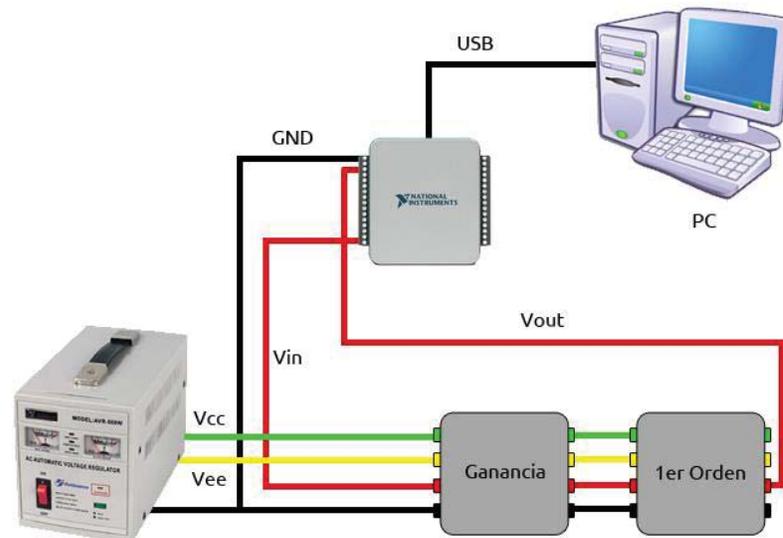


Figura 4-2: Diagrama de conexión en lazo abierto.

Además se puede utilizar el módulo comparador para realizar pruebas con el módulo de control PID, como se observa en el diagrama de la Figura 4-3.

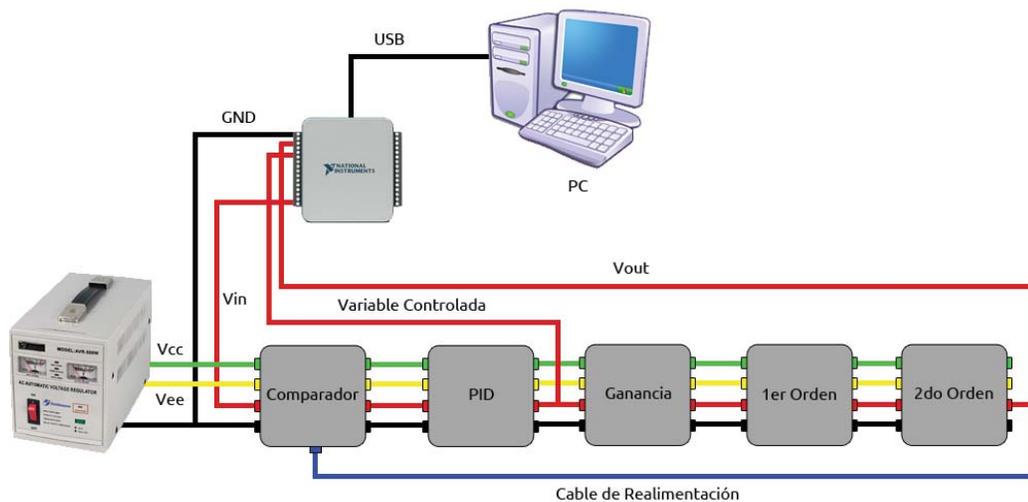


Figura 4-3: Diagrama de conexión en lazo cerrado con un controlador PID.

4.2 Pruebas generales

A continuación, se presentan distintas pruebas realizadas con la planta, con las cuales se busca entregar una visión general del funcionamiento de esta, del tipo de actividades que se pueden llevar a cabo y de los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo. Para ello se seleccionan algunas demostraciones más significativas que permitan comprobar el correcto funcionamiento de los módulos.

4.2.1 Pruebas en Lazo Abierto a distintas entradas

En esta sección se plantean distintas funciones de transferencias trabajadas en lazo abierto. En todos los casos se compara la respuesta simulada con la respuesta experimental.

Derivador

Se conecta el módulo derivador como se observa en la Figura 4-4:

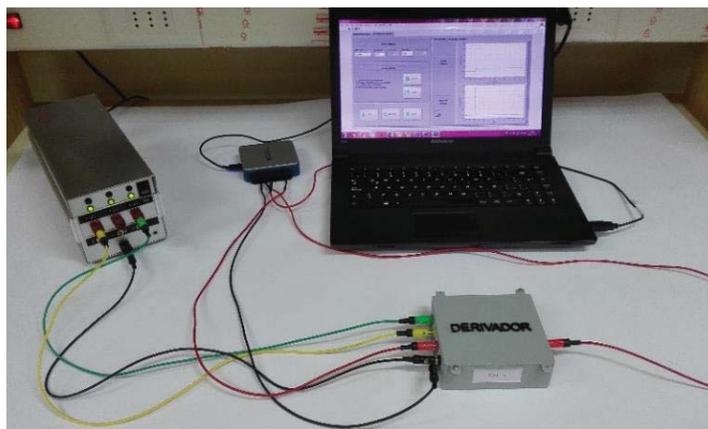


Figura 4-4: Conexión del módulo derivador.

A continuación se puede observar la respuesta simulada (Figura 4-6) del derivador (cero en el origen) ante una entrada escalón:

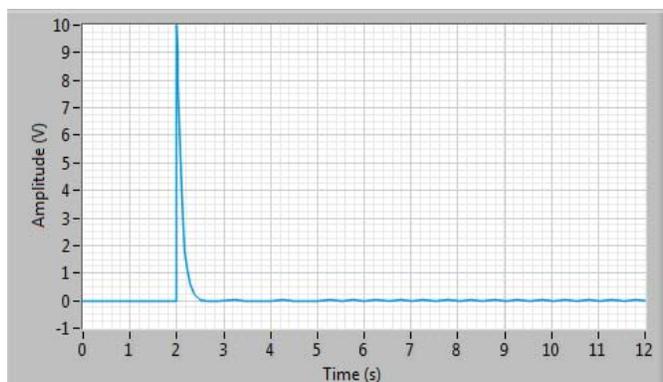


Figura 4-5: Respuesta simulada del derivador ante una entrada escalón.

Y en la Figura 4-6 se presenta la respuesta obtenida de manera experimental, la cual tiene un ancho de aproximadamente 500[ms], lo cual es aceptable considerando que $\tau=1[s]$.

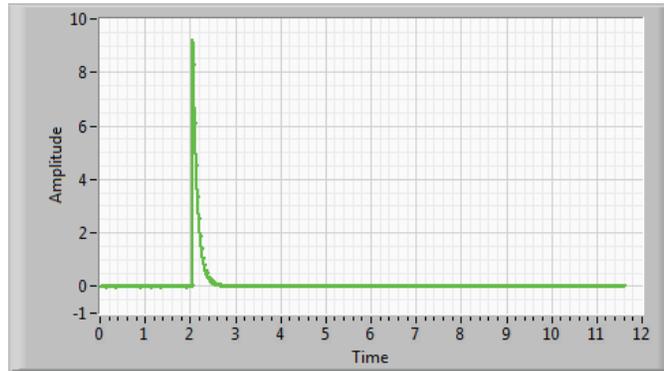


Figura 4-6: Respuesta del módulo derivador ante una entrada escalón.

Primer orden con señal de entrada tipo pulso

Se realiza la siguiente función de transferencia y se aplica una entrada pulso de amplitud 2[V].

$$G(s) = \frac{1}{(s + 1)}$$

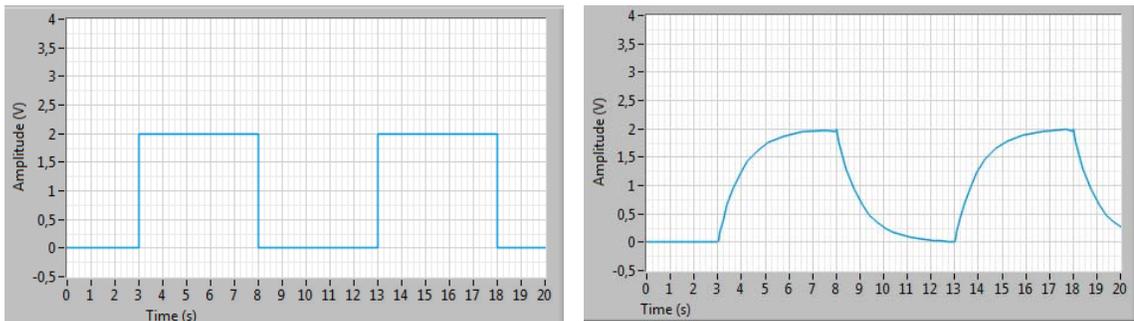


Figura 4-7: Simulación de señal de entrada y salida de la función.

En la Figura 4-7 se muestran las señales de entrada y la respuesta esperada, obtenidas a partir del modo simulación de la interfaz.

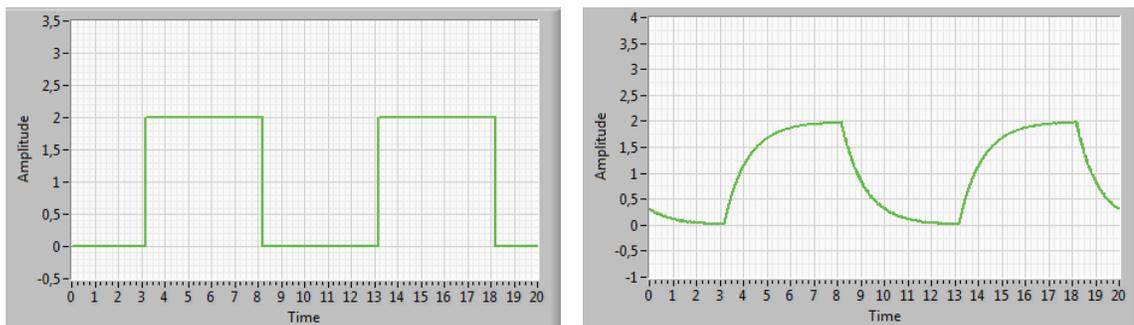


Figura 4-8: Señal de entrada y salida de la función.

Como se puede observar a partir de la Figura 4-8 las respuestas son muy similares, y el módulo posee un comportamiento de acuerdo a lo esperado en la simulación, alcanzándose un valor de 2[V] de magnitud y de aproximadamente 1.3 [V] a los 4 [s] ($\tau=1$ [s]). En este caso el porcentaje de error cuadrático medio entre ambas curvas es de 1.24%.

Ganancia y Primer Orden

Se conectan en serie los módulos de ganancia $K=9$ y primer orden de $K=3$ y $\tau=3$ [s], que aparecen en la Figura 4-9.



Figura 4-9: Conexión de módulo de ganancia y primer orden.

De esta forma, se utiliza la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{9}{(3s + 1)}$$

A continuación, en la Figura 4-10 se presenta la respuesta simulada ante una entrada escalón:

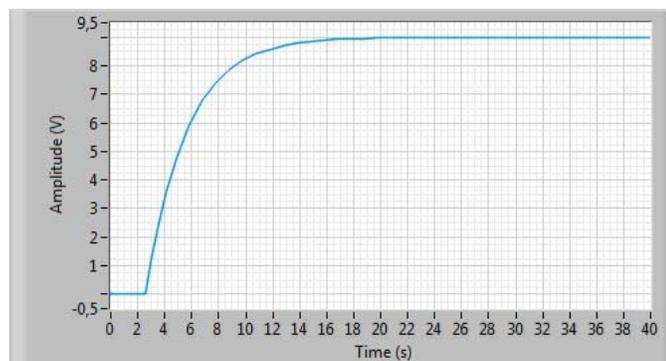


Figura 4-10: Respuesta simulada de los módulos ganancia y primer orden ante una entrada escalón unitario.

Es posible observar que la respuesta del módulo, Figura 4-11, es muy similar a la obtenida en la Figura 4-10, donde puede apreciarse que la curva alcanza un valor de 9[V] y cumple con la constante de tiempo de 3 [s]. En este caso el porcentaje de error cuadrático medio entre ambas curvas es de 0.25%.

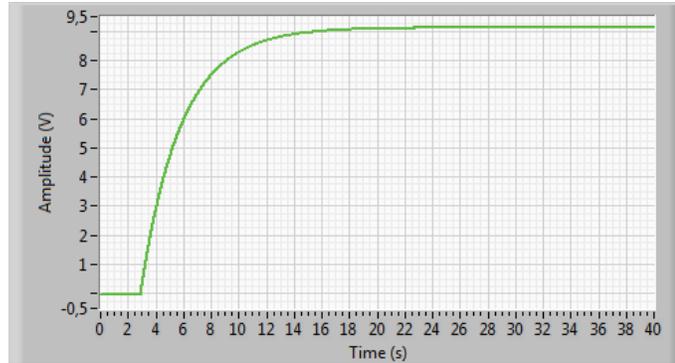


Figura 4-11: Respuesta de los módulos ganancia y primer orden ante una entrada escalón unitario.

Segundo orden

Como se puede visualizar en la Figura 4-12 se realizan las conexiones correspondientes para el módulo de segundo orden.



Figura 4-12: Conexión del módulo de segundo orden.

Además se ajustan los siguientes parámetros:

$$K = 2.4 \quad \omega_n = 1 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad \xi = 0.3$$

Formando así, la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{2.4}{s^2 + 0.6s + 1}$$

En la Figura 4-13 se presenta la simulación de la respuesta de esta función ante una entrada escalón y en la Figura 4-14, la respuesta obtenida desde el módulo.

Cabe destacar que en este caso se presenta una mayor diferencia entre la respuesta real y la simulada, esto es debido a que este circuito es muy sensible ante los cambios de valor de las resistencias. En este caso el porcentaje de error cuadrático medio entre ambas curvas es de 4.98%.

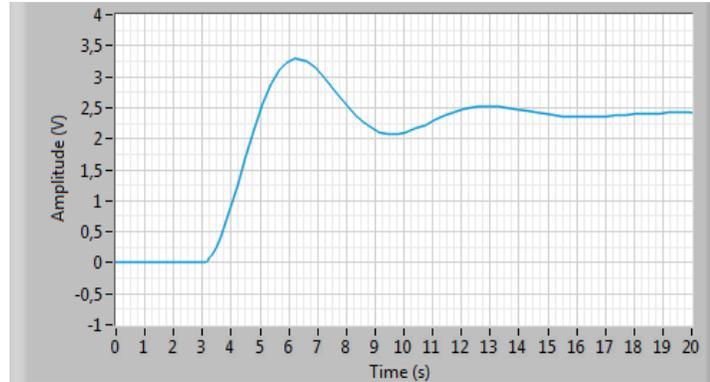


Figura 4-13: Simulación respuesta de segundo orden con $\omega_n = 1 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ $\xi = 0.3$.

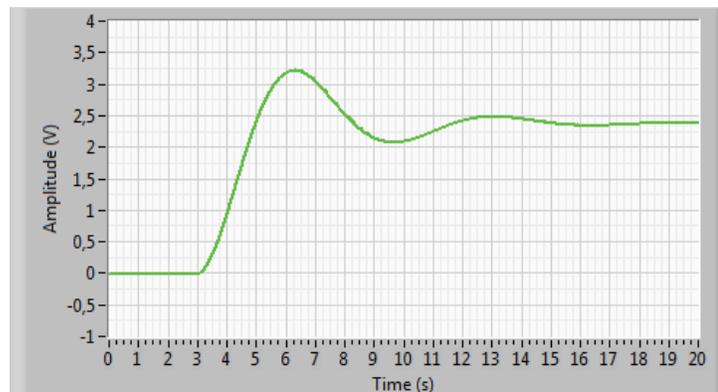


Figura 4-14: Respuesta del módulo de segundo orden con $\omega_n = 1 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ $\xi = 0.3$.

Anteriormente se mencionó que la frecuencia natural depende de las resistencias $R_1 R_2$ y los capacitores $C_1 C_2$, que en este caso se consideraron de igual valor, pero como estos circuitos están realizados con elementos que poseen ciertas tolerancias, estos valores cambian, en algunos casos significativamente, en la realidad.

$$\omega_n = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \rightarrow \omega_n = \frac{1}{RC}$$

Para obtener R_1 y R_2 de igual valor, se utilizó un potenciómetro doble, pero las resistencias medidas presentan ciertas diferencias que se muestran en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Valores reales de R_1 y R_2

$\omega_n \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$	$R_{ideal} [k\Omega]$	$R_1 [k\Omega]$	$R_2 [k\Omega]$
0.5	20	20,5	22
1	10	9.7	10.9
10	1	1	1.3
100	0.1	0.109	0.99

Posteriormente se cambian los valores de la frecuencia natural y del factor de amortiguamiento, realizando la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{260}{s^2 + 4s + 100}$$

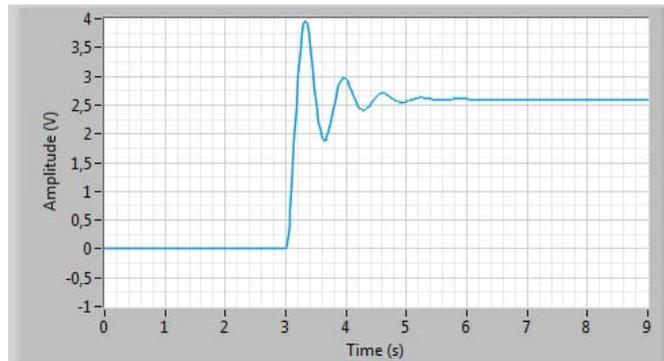


Figura 4-15: Simulación respuesta de segundo orden con $\omega_n = 10 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ $\xi = 0.2$.



Figura 4-16: Respuesta del módulo de segundo orden con $\omega_n = 10 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ $\xi = 0.2$.

Como se observa en este caso, también se produce una diferencia entre ambas respuestas, por lo que lo aconsejable es buscar componentes con tolerancias más pequeñas. En este caso el porcentaje de error cuadrático medio entre ambas curvas es de 6.74%.

4.2.2 Controlador PID

Para trabajar con el módulo de control PID, se utiliza una función de transferencia de tercer orden, la cual se logra conectando los módulos de primer y segundo, junto con el módulo de realimentación (Figura 4-17).

La función de transferencia utilizada es:

$$G(s) = \frac{5.28}{s^3 + 6s^2 + 8s + 4}$$

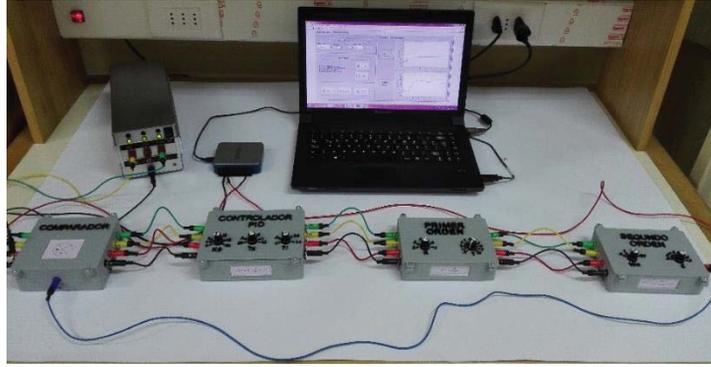


Figura 4-17: Módulos PID con función de transferencia de tercer orden.

Y se diseña un controlador para las siguientes especificaciones de desempeño:

$$M_p \leq 0.15, t_{s(2\%)} = 3[\text{seg}], e_{ss} \leq 0,1$$

Dando como resultado el siguiente controlador PID:

$$G_c(s) = \frac{1.83(s + 1.23)^2}{s}$$

$$K_p = 4.5$$

$$T_i = 1.64[\text{s}]$$

$$T_d = 0.41[\text{s}]$$

En la Figura 4-18 se muestra la gráfica de la respuesta simulada, y en la Figura 4-19 la gráfica de la respuesta real, ante una entrada escalón. Se puede observar que ambas son similares y que se cumple con el porcentaje de sobrepaso máximo y el tiempo de asentamiento para el cual fue diseñado este controlador PID. En este caso el porcentaje de error cuadrático medio entre ambas curvas es de 2.98%.

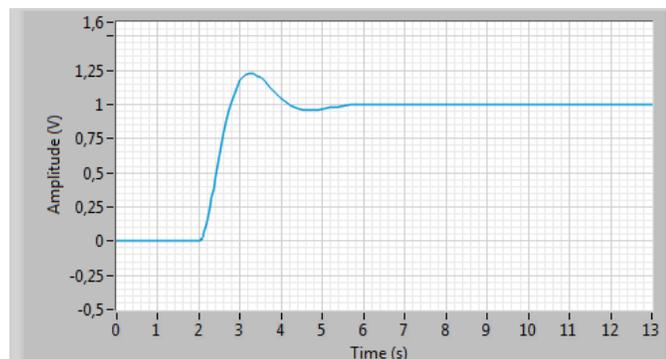


Figura 4-18: Respuesta simulada módulo PID.

Posteriormente en la Figura 4-20 se muestra en color rojo, la señal de control, la cual mediante un botón se puede activar o desactivar cuando se desee.

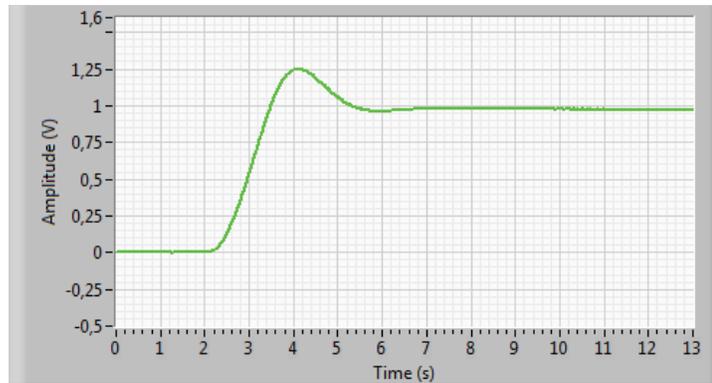


Figura 4-19: Respuesta módulo PID.

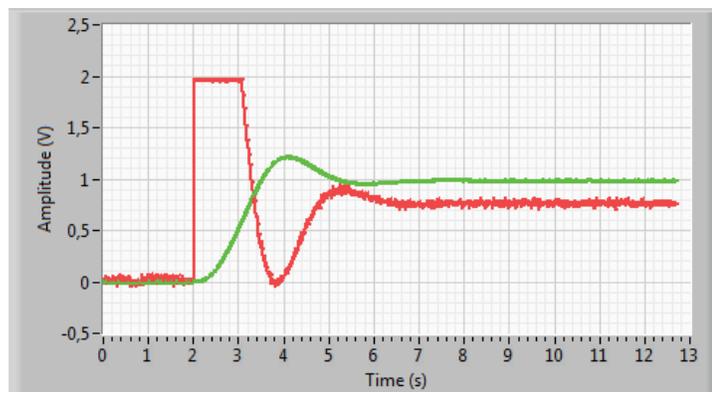


Figura 4-20: Señal de control obtenida (curva roja) y señal controlada (curva verde).

Posteriormente, se desactivó la acción derivativa (mediante un interruptor) para observar el resultado (Figura 4-21), considerando que es una buena forma de que los alumnos puedan comprobar los efectos de cada etapa en el controlador.

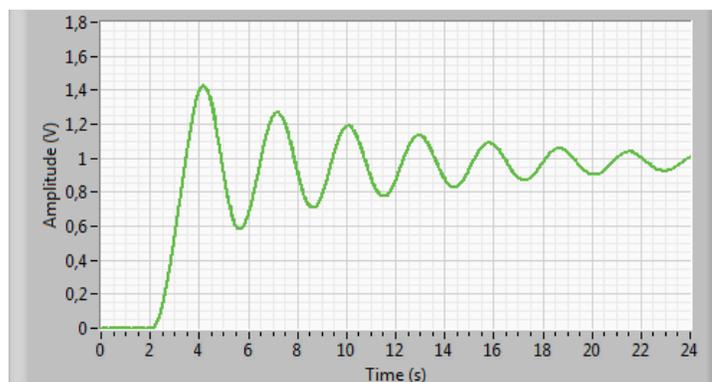


Figura 4-21: Efecto del controlador PID sin la presencia de la acción derivativa.

Como es de esperar la respuesta posee una mayor oscilación y alcanza una sobreoscilación un poco mayor, ya que la acción derivativa ayuda a mejorar ambos efectos.

Posteriormente se utiliza la siguiente función de transferencia de primer orden para realizar un controlador PI:

$$G(s) = \frac{3}{(10s + 1)}$$

Y se diseña un controlador para las siguientes especificaciones de desempeño:

$$M_p \leq 0.05, t_s(2\%) = 4[\text{seg}], e_{ss} \leq 0,1$$

Dando como resultado el siguiente controlador PI:

$$G_c(s) = \frac{6.33(s + 1,1)}{s}$$

$$K_p = 6.33$$

$$T_i = 0.9[\text{s}]$$

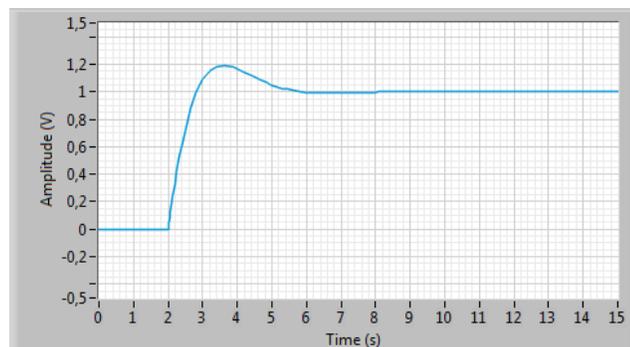


Figura 4-22: Respuesta simulada del controlador PI para una función de tercer orden.

La Figura 4-23 corresponde a la respuesta obtenida de forma experimental del sistema presentado en forma simulada en la Figura 4-22. Ambas gráficas son similares se cumple con el porcentaje de sobrepaso máximo y el tiempo de asentamiento para el cual fue diseñado este controlador PI. En este caso el porcentaje de error cuadrático medio entre ambas curvas es de 0.88%.

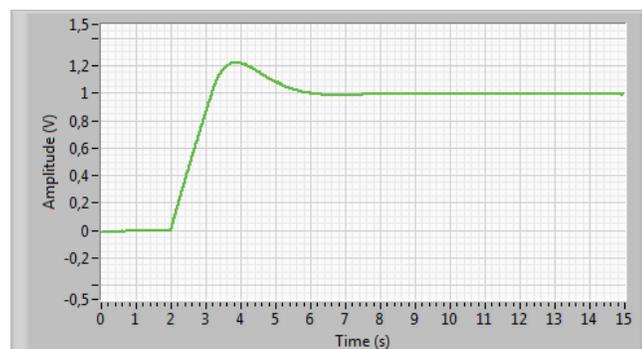


Figura 4-23: Respuesta módulo control PI para una función de tercer orden.

En la Figura 4-24 se puede ver la misma respuesta anterior, pero con la señal de control incluida (curva roja).

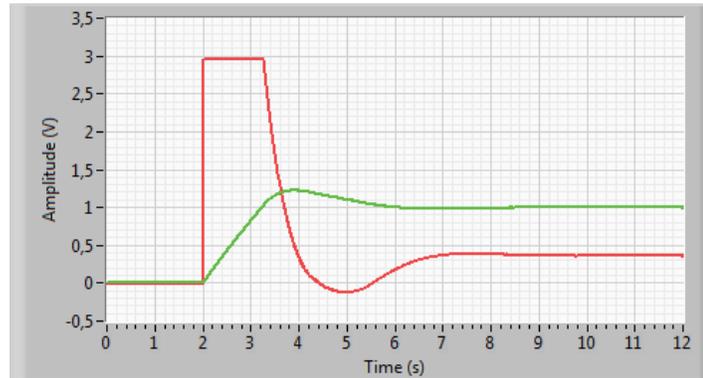


Figura 4-24: Señal de control obtenida (curva roja) y señal controlada (curva verde).

4.2.3 Obtención del diagrama de Bode

A continuación se realiza la obtención del diagrama de Bode tanto de magnitud como de fase para una función de primer orden de forma automática. En general se buscará que el alumno logre construir el diagrama, a partir de un barrido de frecuencias aplicado al sistema, por lo que este paso será de gran ayuda para revisar sus resultados.

Se trabaja con la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{1}{(2s + 1)}$$

Y se realiza tanto la simulación del diagrama de Bode, como el real, a partir de los datos experimentales. En la Tabla 4-3 se presentan los valores para cada caso que posteriormente son graficados.

Tabla 4-3: Valores para el Bode simulado y el real.

Frecuencia [rad/s]	Magnitud teórica [dB]	Magnitud obtenida [dB]	Fase teórica [°]	Fase obtenida [°]
0,1	0	-0.002	-10	-13
1	-8	-6.529	-65	-61.5
10	-25	-24.27	-88	-83.4
40	-38	-36	-89	-80

En la Figura 4-25 A y Figura 4-25 B se presenta la simulación correspondiente al diagrama de Bode, tanto de magnitud como de fase, y en la Figura 4-26 A y Figura 4-26 B, el diagrama generado automáticamente a partir de los datos experimentales.

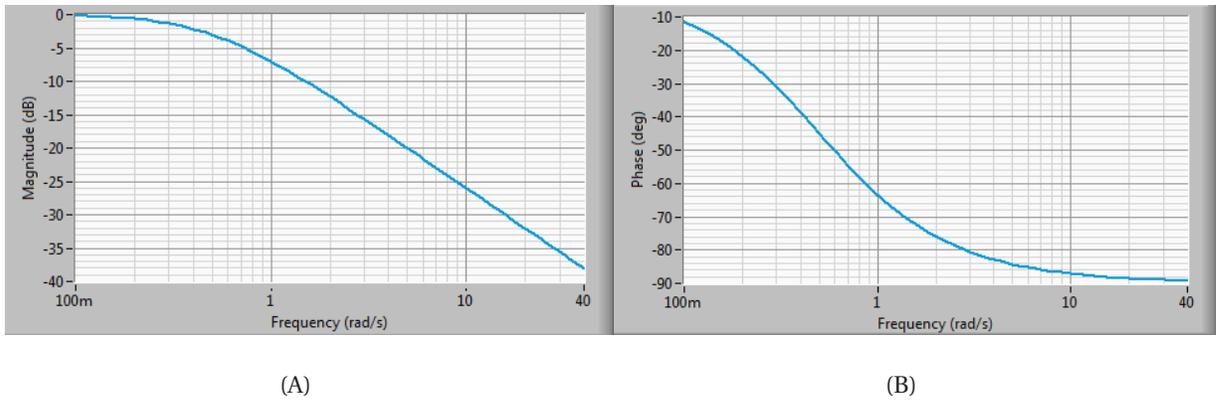


Figura 4-25: Diagrama de Bode de magnitud (A) y de fase (B) simulado.

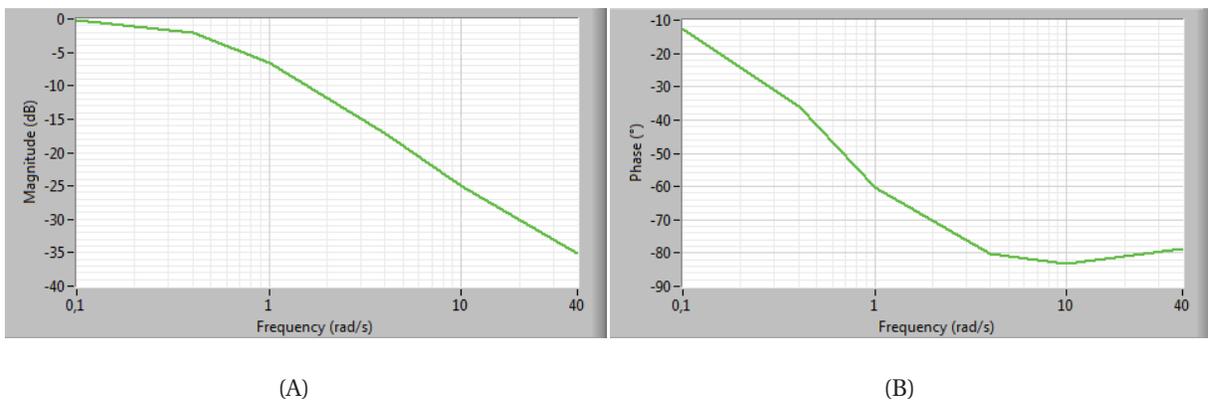


Figura 4-26: Diagrama de Bode de magnitud (A) y de fase (B) experimental.

Cabe mencionar que existen ciertas diferencias entre los valores teóricos y los experimentales, que se encuentran aproximadamente a partir de los 40[rad/s], ya que la respuesta tiene una magnitud tan pequeña, que el sistema no logra precisar esos valores, pero de igual manera, permite tener una aproximación bastante cercana de los resultados que debiesen obtenerse.

5 Material docente

En este capítulo se presenta la elaboración tanto de guías para el uso docente como de documentación sobre la planta en general. Este material complementario es de gran importancia no solo para la correcta utilización de la planta, sino que también para obtener el mayor provecho de esta.

5.1 Datasheet

En cuanto a la documentación que acompaña a la planta, por un lado, se encuentra el datasheet (Figura 5-1), que permitirá conocer todos los datos técnicos de esta, como sus principales características, límites, voltajes de alimentación, información sobre el amplificador operacional, rango de operación, formas de conexión, entre otros.

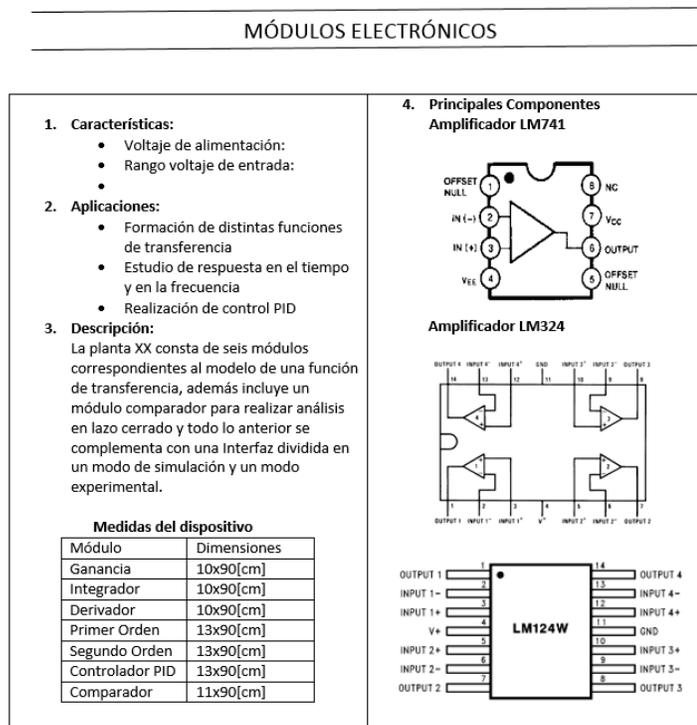


Figura 5-1: Datasheet.

Guía Práctica 2: Dominio de la Frecuencia (Apéndice B: Fundamentación del proyecto)

- Obtener la respuesta en frecuencia de las distintas funciones propuestas.
- Analizar, comprender y justificar la información y datos resultantes de las actividades.
- Determinar la estabilidad del sistema
- Comparar resultados obtenidos a partir de simulaciones y conocimientos teóricos, con las respuestas obtenidas de forma experimental.

Guía Práctica 3: Controladores PID (Apéndice C: Guía Práctica 3)

- Reconocer y visualizar la función de cada acción (proporcional, integral y derivativa) en un controlador PID.
- Detectar qué tipo de controlador se necesita de acuerdo a las especificaciones de diseño.
- Diseñar un controlador PID mediante el método del LGR.
- Comparar resultados obtenidos a partir de simulaciones y conocimientos teóricos, con las respuestas obtenidas de forma experimental.

Además, cada guía cuenta con un marco teórico que permita a los alumnos recordar los conceptos y conocimientos básicos que deben poseer para trabajar en la experiencia (Figura 5-3). También se incluyen algunos ejemplos relacionados con el tema desarrollado en los casos que corresponda y finalmente una propuesta de rúbrica de evaluación, que permita conocer al alumno en detalle la forma en que será evaluado (ejemplo presentado en la Figura 5-4).

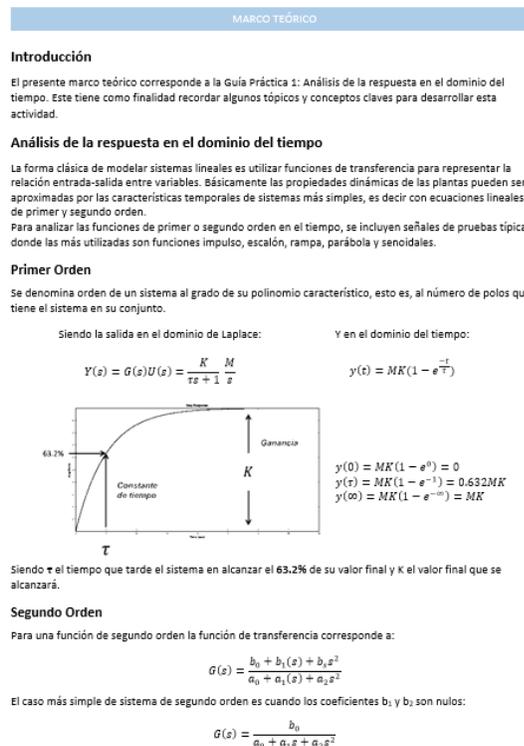


Figura 5-3 Marco teórico de primera guía.

Concepto	Ponderación	Muy logrado (7.0)	Logrado (6.9-5.5)	Medianamente logrado (5.4-4.0)	No logrado (3.9-1.0)
Formato y consideraciones	20%	El estudiante cumple con el formato estipulado para el desarrollo del informe. Sigue indicaciones del profesor y manipula con responsabilidad la planta.	El estudiante cumple con el formato estipulado para el desarrollo del informe en la mayoría de sus partes. Sigue indicaciones del profesor y manipula con responsabilidad la planta.	El estudiante no cumple por completo con el formato estipulado. No sigue todas las indicaciones, y/o no manipula con responsabilidad la planta.	El estudiante no cumple con el formato estipulado para el desarrollo del informe. No sigue indicaciones del profesor y no manipula con responsabilidad la planta.
Uso de las herramientas de estudio	35%	El estudiante es capaz de seguir indicaciones para la utilización de la interfaz, conoce las instrucciones del manual de uso y pone en funcionamiento de manera adecuada los módulos.	El estudiante es capaz de seguir indicaciones para la utilización de la interfaz, conoce la mayoría de las instrucciones del manual de uso y pone en funcionamiento los módulos de forma correcta.	El estudiante es capaz de seguir algunas indicaciones y requiere asistencia para la utilización de la interfaz y para hacer funcionar los módulos.	El estudiante no es capaz de seguir indicaciones y requiere asistencia reiterada para la utilización de la interfaz. No logra conectar y poner en funcionamiento los módulos.
Aplicación del conocimiento y resultados obtenidos	45%	El estudiante es capaz de realizar por completo la actividad. Además los resultados experimentales, explicaciones y análisis teóricos son correctos.	El estudiante es capaz de realizar por completo la actividad. Posee algunos errores en los resultados experimentales, explicaciones y análisis teóricos.	El estudiante no es capaz de realizar por completo la actividad. Además presenta grandes errores en los resultados y análisis teóricos equivocados.	El estudiante no es capaz de realizar por completo la actividad. Además presenta grandes errores en la mayoría de los resultados y sus análisis teóricos son erróneos.

Figura 5-4: Propuesta de rúbrica.

Otro elemento de gran importancia que se ha querido incorporar son las pautas de cada guía, ya que esto permite al profesor tener una referencia de los resultados que debiesen obtenerse en cada una de las sesiones de laboratorio, lo cual servirá de ayuda sobre todo cuando recién se ponga en marcha la utilización de esta planta. En la Figura 5-5 se puede observar parte de la pauta de la primera guía de trabajo.

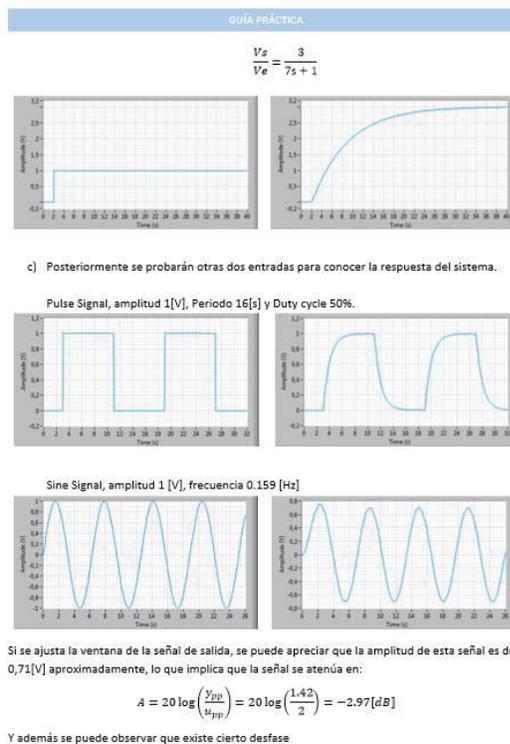


Figura 5-5: Pauta de primera guía.

Discusión y conclusiones

Se ha descrito y presentado una planta didáctica diseñada especialmente para el laboratorio de control automático. El proyecto se enfoca en el aprendizaje y profundización de los tópicos básicos de la asignatura, desarrollando principalmente identificación y control de sistemas. Se estableció como principal desafío unir de manera coherente estos dos enfoques para transformarla en una herramienta que aporte a la formación del estudiante de manera significativa, convirtiéndola en una excelente oportunidad de aprendizaje para los alumnos, lo que repercute de una forma directa y positiva en la calidad de la educación.

Una gran ventaja de esta planta es que se pueden realizar un gran número de combinaciones de función de transferencia, donde se representen distintos procesos, y no estar limitado a un solo sistema como en el caso de otras plantas educativas más típicas. Esto mismo entrega la posibilidad de realizar funciones y modelos de sistemas conocidos en nuestro entorno, como por ejemplo diversos circuitos, modelado de un motor DC, entre otros.

Además, esta propuesta está basada en el desarrollo de circuitos análogos, lo que se traduce en un costo mucho menor al de otras plantas existentes y también en un trabajo novedoso, al conectar dos asignaturas esenciales en la formación de la carrera, que es el control automático con los circuitos electrónicos. Esto permite continuar equipando el laboratorio con prototipos interesantes y motivadores, que respondan a un formato amigable con el estudiante, acercándolo a la asignatura a partir de una serie de actividades y así cumplir con el principal objetivo del proyecto.

Uno de los pasos fundamentales de este proyecto, consistió en estudiar a fondo los circuitos análogos con amplificadores operacionales, cómo se comportan en distintas configuraciones, como responden a distintos tipos de entradas, cómo realizar control PID de manera adecuada, entre otras. Con la intención de continuar analizando más a fondo los circuitos correspondientes a las distintas funciones de transferencia con amplificadores operacionales, se procedió a realizar un estudio en el dominio de la frecuencia, probando esta vez con otro tipo de entrada, la señal sinusoidal. Cabe destacar que el uso del método del barrido frecuencial para obtener los distintos Diagramas de Bode de forma experimental, tanto de magnitud, como de fase, se aplicó con bastante éxito, ya que, en todos los casos, los resultados corresponden a valores muy cercanos a los esperados teóricamente.

Cabe destacar que el proceso de diseño y armado de los módulos es más complejo de lo que parece, estos tienen una etapa de planificación muy extensa y la mayoría de las veces no funcionan de la manera esperada en un primer momento, teniendo que recurrir a diversas pruebas y revisiones de las placas, de los componentes y de la estructura en general. Se puede decir que trabajar con circuitos análogos a la vez puede resultar en una desventaja desde cierto punto de vista, ya que hay que tener en cuenta que este trabajo fue realizado con componentes reales que no son 100% precisos, debido a que poseen ciertas tolerancias y en algunos casos, esas diferencias se traducen en errores o en imprecisiones indeseables en los resultados, como en el caso más evidente que fue en el módulo de segundo orden.

En cuanto al diseño y desarrollo de los módulos propiamente tal, cabe mencionar que el uso de la impresión 3D significó una simplificación considerable en la realización de piezas a medida y de igual manera un ahorro de tiempo y presupuesto significativo, si es que se compara con la posibilidad de mandar a hacer las cajas a alguna empresa externa.

Con respecto al desarrollo de la interfaz, fue de gran utilidad el software LabVIEW y la programación en bloques, la cual está diseñada para que sea bastante intuitiva por el usuario. Esta simplificó en gran medida el trabajo de programación y el tiempo de dedicación a aprender un nuevo lenguaje, siendo este reducido debido a la simplicidad de los bloques. Esta interfaz es el punto de unión entre los módulos electrónicos, el computador y el usuario.

Una de las características notorias de la interfaz, es que tiene dos modos complementarios entre sí, el Modo Simulación y el Modo Experimental, los cuales se pueden alternar de forma muy rápida con solo apretar un botón. Esta dualidad permite al usuario poder comparar fácilmente si las respuestas reales se acercan a lo esperado teóricamente.

El dispositivo DAQ USB-6002, demostró ser de gran utilidad para el desarrollo de esta planta y la interfaz, la compatibilidad con LabVIEW, la facilidad de conexión y de uso hizo que el proceso de enviar señales y recibir las respuestas fuera una nula preocupación en el desarrollo de este proyecto.

Con las pruebas realizadas se pudo comprobar que los resultados se presentan de acuerdo a lo esperado, esto comprueba el correcto funcionamiento de los módulos y su configuración electrónica, y, además, demuestra que el análisis desarrollado y el proceso de construcción fueron correctos.

Finalmente, cabe destacar que este trabajo tiene grandes posibilidades de desarrollo futuro, ya que es posible incorporar otros módulos electrónicos, realizar guías docentes basadas en otros tópicos de la asignatura o enriquecer la interfaz con otras herramientas de control. Además, el trabajo ya realizado, es una importante base de conocimientos, como para continuar perfeccionando los módulos, con componentes de baja tolerancia, y reemplazo de algunas conexiones o detalles que se pudiesen mejorar.

Bibliografía

- [1] K. Ogata, Ingeniería de control moderna, Madrid: Pearson educación S.A, 2010.
- [2] Universidad de Oviedo, «Obtención experimental del diagrama de Bode,» [En línea]. Available: http://isa.uniovi.es/ISAwiki/index.php/Obtención_experimental_del_diagrama_de_Bode. [Último acceso: 20 Julio 2017].
- [3] R. Gutiérrez, P. Guevara y J. Valdéz, «Herramientas didácticas para la enseñanza del Control-Automático bajo el Modelo EBC: Propuesta en la UPVT,» *Revista Mexicana de Psicología*, nº 28, pp. 1365-1367, 2011.
- [4] L. Victorino y M. Medina, «Educación basada en competencias y el proyecto Tuning en Europa y Latinoamérica,» 2008.
- [5] D. Ruiz, J. Magallón y E. Muñoz, «Herramientas de aprendizaje activo en las asignaturas de ingeniería estructural,» Bogotá, 2006.
- [6] L. Feisiel y A. Rosa, «The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education,» 2005.
- [7] V. M. Alfaro, «La simulación digital como herramienta en la docencia y la investigación,» San José, Costa Rica, 2000.
- [8] M. Blas y A. Loyarte, «Laboratorio Virtual y Remoto: Uso de la Tecnología de la Información como Ayuda en la Educación,» Universidad Tecnológica Nacional, Santa Fe, 2012.
- [9] Z. Cataldi, F. Lage y C. Dominighini, «Fundamentos para el uso de simulaciones en la enseñanza,» 2013.
- [10] I. S. Ching, «Herramientas para la docencia en automática orientadas hacia la metodología ECTS,» Madrid, 2012.

-
- [11] D. Sabín, A. Quintana, A. Fundora y G. Vega, «La enseñanza por proyecto en el proceso de enseñanza y aprendizaje de ingenieros automáticos,» Sociedade Brasileira de Física, 2011.
- [12] G. Ariza, «Metodologías utilizadas para el desarrollo de la habilidad experimental mediante prácticas de laboratorio en el programa de ingeniería electrónica de la universidad autónoma del caribe,» 2010.
- [13] Universidad de Sevilla, «Ingeniería de Sistemas y Automática,» [En línea]. Available: <http://disa.us.es/disa/>. [Último acceso: 25 Marzo 2017].
- [14] «Didac International,» [En línea]. Available: <http://www.didacinternational.com/automation.tml>. [Último acceso: 23 Mayo 2017].
- [15] F. Quiles, M. Ortiz, M. Brox, C. Moreno, M. Montijano y A. Gersnoviez, «La importancia de las prácticas en laboratorios tradicionales para el aprendizaje de Tecnología de Circuitos Integrados Digitales,» Universidad de Córdoba, Córdoba, 2010.
- [16] Universidad de Chile, «Laboratorio de Automática,» [En línea]. Available: <http://ingenieria.uchile.cl/>. [Último acceso: 14 Abril 2017].
- [17] Universidad de los Andes, «Laboratorio de Control Automático,» [En línea]. Available: <http://ing.uandes.cl/laboratorios/laboratorio-de-control-automatico/>. [Último acceso: 14 Abril 2017].
- [18] Universidad Federico Santa María, «Laboratorio de Control Automático,» [En línea]. Available: <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo271/>.
- [19] M. Bañuelos, J. Castillo, G. Rayo, S. Quintana, R. Damián y J. Pérez, «Controlador PID de temperatura de tipo didáctico,» Querétaro, México, 2001.
- [20] R. Coughlin y F. Driscoll, Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales, Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A..
- [21] Texas Instruments, *Datasheet LM741*, Dallas, 2015.
- [22] HyperPhysics, «El 741: Consideraciones Prácticas,» 2000. [En línea]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Electronic/a741p.html#c1>. [Último acceso: 12 Abril 2017].
- [23] J. A. Contreras, «Introducción a la implementación de controladores PID análogos,» Cartagena.

- [24] J. I. Huircán, «El Amplificador Operacional Real: Parámetros y especificaciones técnicas,» Universidad de la Frontera, Temuco, Chile.
- [25] ELAI - Universidad Politécnica de Madrid, «Análisis en el dominio del tiempo de sistemas de primer y segundo orden,» Madrid, 2008.
- [26] Universidad Simon Bolivar, «Respuesta Frecuencial,» 26 Abril 2010. [En línea]. Available: [http://prof.usb.ve/montbrun/Respuesta_Frecuencial primera version 26abril.pdf](http://prof.usb.ve/montbrun/Respuesta_Frecuencial_primera_version_26abril.pdf). [Último acceso: 28 Julio 2017].
- [27] M. A. Bañuelos, «Análisis y diseño de un controlador PID analógico,» Ciudad de México, 1999.
- [28] E. Gonzalez y M. Garavito, «Diseño de un controlador PID análogo para un circuito RC de segundo orden mediante la Sisotool de MATLAB,» Bucaramanga, Colombia, 2007.
- [29] R. Gonzáles y R. Pradines, «Análisis de software para desarrollo entorno gráfico LabVIEW y propuesta de implementación para laboratorio en el instituto de electricidad y electrónica en Universidad Austral de Chile,» Valdivia, 2007.
- [30] National Instruments, «USB-6002 Device Specifications,» 14 Mayo 2014. [En línea]. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374371a.pdf>. [Último acceso: 16 Diciembre 2017].

A Guía Práctica 1

A.1 Introducción

La presente guía tiene como finalidad introducir a los estudiantes en la planta Modular TF System, por lo que se desarrollarán distintas actividades enfocadas en el conocimiento de la interfaz y de los módulos, junto con el análisis de distintas funciones de transferencia en el dominio del tiempo.

A.2 Objetivos

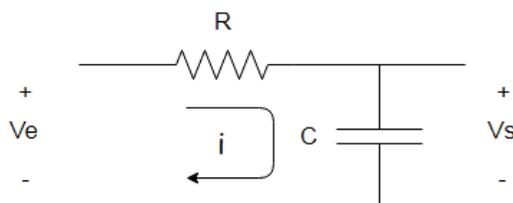
- Familiarización con la planta Módulos electrónicos y su interfaz.
- Observar distintas respuestas en el dominio del tiempo utilizando tanto una función de primer orden como una de segundo orden.
- Analizar, comprender y justificar la información y datos resultantes de las actividades.
- Conocer la función para guardar datos y exportar al software Matlab.
- Comparar resultados obtenidos a partir de simulaciones y conocimientos teóricos, con las respuestas obtenidas de forma experimental.

A.3 Actividad

A.3.1 Análisis de un sistema de Primer Orden

Los circuitos de primer orden son circuitos que contienen solo un componente que almacena energía (puede ser un condensador o inductor) y que además puede describirse usando solamente una ecuación diferencial de primer orden.

En este caso se cuenta con el siguiente circuito RC a partir del cual se obtiene la función de transferencia correspondiente:



En el dominio del tiempo se pueden plantear las siguientes ecuaciones tanto para el voltaje de entrada como el de salida:

$$V_e = R * i(t) + \frac{1}{C} * \int i(t)dt \qquad V_s = \frac{1}{C} * \int i(t)dt$$

Y en el dominio de Laplace:

$$V_e = R + \frac{1}{Cs} \qquad V_s = \frac{1}{Cs}$$

Por lo tanto, la función de transferencia correspondiente a este circuito está dada por:

$$\therefore \frac{V_s}{V_e} = \frac{\frac{1}{Cs}}{R + \frac{1}{Cs}} = \frac{1}{RCs + 1}$$

Donde $\tau = RC$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{\tau s + 1}$$

1. Reemplace en la función presentada anteriormente los valores de $R=10[k\Omega]$ y $C=100[\mu F]$.
2. Ejecute la interfaz. Corra la simulación para “Simulation Mode” y ajuste los parámetros de la señal de entrada para una de tipo escalón de amplitud 1[v] y presione SIMULATE.
3. Observe como cambia la respuesta si se agrega una ganancia $K=3$ y $\tau=7$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{3}{7s + 1}$$

4. Pruebe con las siguientes entradas disponibles para la función del punto a.
 - Pulse Signal, amplitud 1[V], período 16[s], duty cycle 50%.
 - Sine Signal, amplitud 1[V], frecuencia 1[rad/s] $\rightarrow 0.159[Hz]$. ¿Qué le parecen estos resultados?, ¿existe desfase entre ambas señales?, puede apoyarse del diagrama de Bode en la sección “Frequency Domain”.
5. Ahora diríjase al módulo de primer orden y ajuste la ganancia $K=1$ y $\tau=1$ (primera función simulada). Luego conecte los voltajes de alimentación de acuerdo al Manual de Uso.
6. En “Experimental Mode” ajuste los parámetros de la señal de entrada para una de tipo escalón de amplitud 1[v] y presione SIMULATE. Y compare los resultados con los obtenidos en la simulación.
7. Observe como cambia la respuesta si se agrega una ganancia $K=3$ y $\tau=7$ (punto c) Y esta vez utilice la función Grabar para generar un archivo compatible con el software Matlab. (Consulte en el Manual de Uso sección GRABACION).

A.3.2 Análisis de un sistema de Segundo Orden

Se presenta la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{2.4}{s^2 + 0.6s + 1}$$

Donde, $K=2.4$, $\omega_n=1$ [rad/s] y $\xi=0.3$

1. En "Simulation Mode", simule la respuesta ante una entrada escalón de 1[V].
2. Simule la misma función, pero ahora con $\omega_n=10$ [rad/s]. ¿Qué cambios deberían ocurrir en la respuesta con una frecuencia natural mayor?

$$G(s) = \frac{2.4 \cdot 10^2}{s^2 + 60s + 10^2}$$

3. A continuación, simule la siguiente función, en la cual $\xi=0.8$, ¿Cómo se espera que cambie la respuesta con un ξ mayor?

$$G(s) = \frac{1.4 \cdot 10^2}{s^2 + 16s + 10^2}$$

4. Repita los pasos anteriores conectando los módulos correspondientes y compare.

B Guía Práctica 2

B.1 Introducción

En esta práctica se analizará la respuesta ante señales de frecuencia variable de sistemas lineales de primer y segundo orden.

B.2 Objetivos

- Obtener la respuesta en frecuencia de las distintas funciones propuestas.
- Analizar, comprender y justificar la información y datos resultantes de las actividades.
- Determinar la estabilidad del sistema
- Obtención experimental de la respuesta frecuencial de un sistema
- Comparar resultados obtenidos a partir de simulaciones y conocimientos teóricos, con las respuestas obtenidas de forma experimental.

B.3 Actividad

B.3.1 Análisis de la respuesta en frecuencia

1. Simular el Diagrama de Bode tanto de Magnitud como de Fase para las siguientes funciones de transferencia:

- Integrador
- Función de primer orden tipo 0

$$G(S) = \frac{4}{3s + 1}$$

- Función de primer orden tipo 1

$$G(S) = \frac{3}{s(2s + 1)}$$

- Función de segundo orden

$$G(S) = \frac{1 \cdot 10^2}{(s^2 + 6s + 10^2)}$$

2. Comprueba estabilidad criterio magnitud.
3. Conecte los módulos correspondientes y compruebe los resultados obtenidos de forma experimental. Para ellos complete la siguiente tabla:

ω	f	Upp	Ypp	A=Ypp/Upp	A [dB]	Tseñal	Tretardo	Fase
[rad/s]	[Hz]	[V]	[V]			[s]	[s]	[°]

4. Compruebe los resultados obtenidos en “Experimental Mode”, siguiendo las instrucciones del Manual de Uso.

C Guía Práctica 3

C.1 Introducción

Esta guía práctica se enfoca principalmente en el diseño y análisis de controladores PID. Principalmente pretende que el alumno logre identificar las características de las distintas acciones, proporcional, integral y derivativa, y pueda comprobar el efecto que cada una de ellas tiene sobre el sistema.

C.2 Objetivos

- Reconocer y visualizar la función de cada acción (proporcional, integral y derivativa) en un controlador PID.
- Detectar qué tipo de controlador se necesita de acuerdo a las especificaciones de diseño.
- Diseñar un controlador PID mediante el método del LGR.
- Comparar resultados obtenidos a partir de simulaciones y conocimientos teóricos, con las respuestas obtenidas de forma experimental.

C.3 Actividad

C.3.1 Controlador para una función de Primer Orden

Se presenta la siguiente función de primer orden:

$$G(s) = \frac{3}{(10s + 1)}$$

1. Diseñe un controlador PID para los siguientes parámetros:

$$M_p \leq 0.05, t_s(2\%) = 4[\text{seg}], e_{ss} \leq 0,1$$

2. Mencione las principales características de la acción proporcional, integral y derivativa en un controlador PID.

3. Simule la respuesta del sistema con el controlador diseñado y posteriormente compruebe sus resultados de forma experimental.

C.3.2 Diseño de controlador PID para función de tercer orden

Sea la función:

$$G(s) = \frac{5.28}{s^3 + 6s^2 + 8s + 4}$$

1. Diseñe un controlador P, PI, PD o PID según corresponda de acuerdo a las siguientes especificaciones de desempeño:

$$M_p \leq 0.15, t_{s(2\%)} = 3[seg], e_{ss} \leq 0,1$$

2. ¿Qué tipo de controlador eligió?, comente sus razones.
3. Simule la respuesta del sistema con este controlador diseñado.
4. Verificar si se requiere de ajuste fino o si se cumple de manera acertada con las especificaciones estipuladas.
5. Utilizando la interfaz en “Experimental Mode” compruebe sus resultados.
6. Apague la acción derivativa y comente qué sucede y a qué se debe el cambio en la señal.