

LABORATORIO REMOTO PARA SISTEMAS DE CONTROL DISCRETOS MEDIANTE INTERNET DE LAS COSAS

REMOTE LABORATORY FOR DISCRETE CONTROL SYSTEMS THROUGH INTERNET OF THINGS

Juan José Martínez Nolasco

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
juan.martinez@itcelaya.edu.mx

Víctor Manuel Sámano Ortega

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
d2003009@itcelaya.edu.mx

Luis Fernando Pérez Ángeles

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
16030337@itcelaya.edu.mx

Josué Halim Uscanga Acosta

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
16030345@itcelaya.edu.mx

Humberto Soto López

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
humberto.soto@itcelaya.edu.mx

Recepción: 28/septiembre/2021

Aceptación: 30/noviembre/2021

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollado de un laboratorio remoto de sistemas de control discreto empleando la técnica de Hardware in the Loop (HIL). El laboratorio consta de dos partes principales, la primera es una plataforma HIL integrada por tres elementos, los cuales son un emulador en tiempo real, un controlador PID discreto y una tarjeta de adquisición de datos. El emulador se embebió sobre una tarjeta de desarrollo NI myRIO-1900 empleando el lenguaje de programación gráfico de la compañía National Instruments LabVIEW. La principal función del emulador es reproducir el comportamiento de sistemas de primer y segundo orden que representan el proceso en un sistema de control. La plataforma cuenta con una biblioteca de los siguientes procesos preestablecidos: primer orden general, segundo orden general, mecánico de traslación y rotación de masa-resorte-

amortiguador, circuito eléctrico RC y RLC, tanque de agitación continua y de motor CD; esta plataforma permite a los usuarios seleccionar y configurar los parámetros de cada uno de los procesos. El controlador PID también es configurable, en este elemento el usuario puede seleccionar el periodo de ejecución y las ganancias proporcional, integral y derivativa de una estructura PID en paralelo. La tarjeta de adquisición de datos empleada fue una NI myDAQ, la cual trabaja sobre la misma plataforma de programación de LabVIEW, esta tarjeta permite monitorear las variables del proceso, recolectando y almacenando los datos que describen la respuesta del sistema de control con una resolución y durante un tiempo definidos por el usuario. La segunda parte del laboratorio remoto es una aplicación web implementada en Android Studio, la cual está vinculada al igual que LabVIEW a una base de datos en tiempo real desarrollada mediante el software Firebase, esta permite enviar y recibir información entre ambos sistemas. El usuario de esta aplicación tiene acceso mediante su dispositivo móvil con conexión a internet. La aplicación contiene una interfaz que guía al usuario en la configuración de la planta, el controlador y la tarjeta de adquisición de datos.

Palabras Clave: Controlador PID, Emulador, Hardware in the Loop, Laboratorio Remoto, Sistemas de Control.

Abstract

This paper presents the development of a remote laboratory for discrete control systems using the Hardware in the Loop (HIL) technique. The laboratory consists of two main parts, the first is a HIL platform made up of three elements, which are a real-time emulator, a discrete PID controller and a data acquisition board. The emulator was embedded on a NI myRIO-1900 development board using the National Instruments LabVIEW graphical programming language. The main function of the emulator is to reproduce the behavior of first and second order systems that represent the process in a control system. The platform has a library of the following pre-established processes: first general order, second general order, mechanical translation and rotation of mass-spring-damper, RC and RLC electrical circuit, continuous stirring tank, and DC motor; This platform allows users to select and

configure the parameters of each of the processes. The PID controller is also configurable, in this element the user can select the execution period and the proportional, integral, and derivative gains of a PID structure in parallel. The data acquisition board used was a NI myDAQ, which works on the same LabVIEW programming platform, this card allows monitoring the process variables, collecting, and storing the data that describes the response of the control system with a resolution and for a user-defined time. The second part of the remote laboratory is a web application implemented in Android Studio, which, like LabVIEW, is linked to a real-time database developed using the Firebase software, which allows information to be sent and received between both systems. The user of this application has access through their mobile device with an internet connection. The application contains an interface that guides the user in the configuration of the plant, the controller, and the data acquisition board.

Keywords: *PID Controller, Emulator, Hardware in the Loop, Remote Laboratory, Control Systems.*

1. Introducción

Un laboratorio remoto está definido como un laboratorio controlado por computadora al que se puede acceder y manipular a través de algún medio de comunicación [Instruments, 2015]. Los laboratorios virtuales activados por control remoto han evolucionado con los avances en tecnologías de la información y las telecomunicaciones y han surgido como una herramienta poderosa con respecto a experimentación in situ [García-Zubia, Orduña, et al, 2009]. La World Wide Web ha brindado una oportunidad para el diseño y análisis de sistemas de control a través de internet. Cada vez más paquetes de software basados en la web han sido desarrollados para mejorar la enseñanza y el diseño de sistemas de control. Una de las aplicaciones más populares en sistemas de control son los entornos educativos y los laboratorios basados en la web [Yu, Chen, et al, 2015].

Hoy en día, los servidores web embebidos se han vuelto omnipresentes, están integrados en muchos dispositivos domésticos, industriales y electrodomésticos, conectándolos a internet y, por lo tanto, accesibles de forma remota para

configuración y control. Están presentes en una amplia gama de campos relacionados con la electrónica de consumo y aplicaciones industriales, incluidas áreas como redes de sensores [Magadaleno, Rodríguez, et al, 2014]. Por lo tanto, existe una tendencia creciente en la investigación e industria, impulsada por la expansión del internet de las cosas (IoT), relacionados con el uso de servidores web integrados, ya que tienen el potencial de ampliar el rango de la aplicación [Cuenca, Grediaga, et al, 2007].

La situación mundial generada por el COVID-19 ha ocasionado que diversas instituciones y académicos recomienden la apropiación de e-learning como medida de contención para la continuidad de la educación que ahora debe sumar a sus retos las implicaciones del aislamiento [Gazzo, 2020]. Según el informe “La educación en tiempos de pandemia de COVID-19”, 29 países de América Latina y del Caribe continuaron con el proceso educativo a través de distintas modalidades como virtual, a distancia, mixta, con encuentros sincrónicos y asincrónicos, en todos los niveles de educación. La educación virtual ha sido sin duda la gran protagonista por estos tiempos debido a que ha ayudado a reducir las barreras de la distancia de la enseñanza [Cepal, 2020]. El aumento de las herramientas virtuales favorece el cambio del medio presencial al virtual en la educación transversal y multidisciplinaria que incluye diversas áreas o ámbitos y que a través de una organización flexible responde a las necesidades formativas de los estudiantes y los acerca a las herramientas del mundo profesional al que se enfrentarán en el futuro [Sangrá Morer, 2001]. En este trabajo se presenta una herramienta didáctica educativa orientada a realizar prácticas en la modalidad educativa virtual.

2. Métodos

La metodología utilizada para el desarrollo del proyecto se define en las siguientes tres partes principales, la plataforma HIL, el envío y descarga de datos en la nube, y el uso de una interfaz para los usuarios, esta última es una aplicación desarrollada en Android Studio para tener acceso y manipular el laboratorio, permitiendo realizar las prácticas en los sistemas de control. En la figura 1 se presenta un esquema general de la estructura del sistema propuesto. En la parte

principal se maneja la selección entre los distintos sistemas de control discreto preestablecidos, a partir de los cuales se introducen las variables correspondientes al sistema para realizar la práctica. Otra parte importante dentro del laboratorio es la configuración del controlador PID, aquí el usuario ingresa los valores de las ganancias K_p , K_i y K_d . Todo el proceso anteriormente descrito se realiza en la aplicación Android.

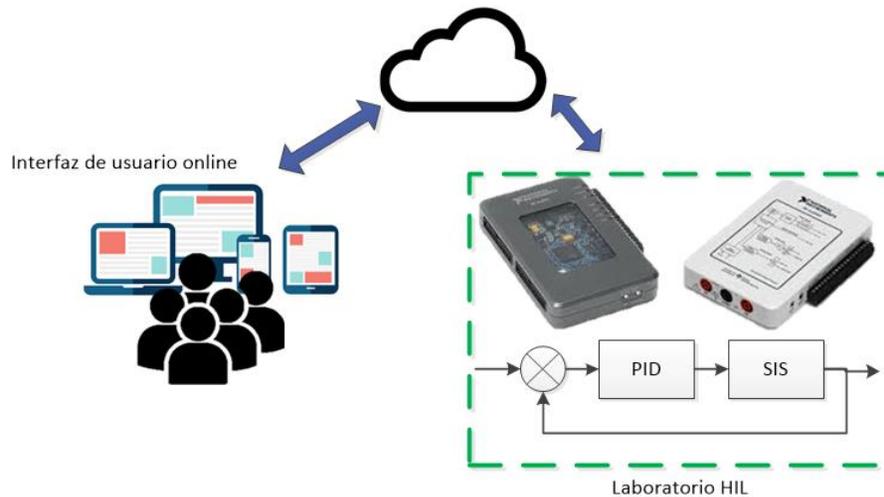


Figura 1 Metodología del funcionamiento del laboratorio remoto.

La plataforma HIL trabaja empleando dos tarjetas de desarrollo, la tarjeta NI myRIO se encarga de realizar el proceso analítico del laboratorio en tiempo real, cuando este proceso se está ejecutando, la tarjeta envía una señal de voltaje proporcional a la respuesta del sistema, esta señal es adquirida por la tarjeta NI myDAQ, esta envía el valor de voltaje adquirido al Instrumento Virtual (IV), el cual tiene como función analizar el nivel de voltaje recibido y registrar el valor del mismo, permitiendo obtener una gráfica correspondiente a la respuesta del sistema. La aplicación web desarrollada tiene la finalidad de generar la interacción entre el usuario y el laboratorio de forma remota, esta aplicación fue diseñada en base a la interfaz del usuario que se desarrolló en el IV del proyecto base de LabVIEW, para así permitirle al usuario elegir el tipo de sistema, seleccionar el valor de las variables correspondientes, las ganancias para el controlador PID e ingresar el correo al cual se enviará la respuesta obtenida. Para realizar la comunicación entre la plataforma

HIL del laboratorio y la aplicación web se utilizó una base de datos desarrollada en la plataforma Firebase, la cual funciona como intermediario entre el usuario y el laboratorio HIL, cuando el usuario envía los valores de las variables del sistema elegido mediante la aplicación a la base de datos, el IV en LabVIEW descarga la información del sistema para posteriormente realizar la práctica solicitada en tiempo real. Finalmente, el envío de la información obtenida durante la ejecución de la práctica se realiza mediante el correo electrónico seleccionado por el usuario en la aplicación web en forma de un reporte generado por el IV, este reporte presenta las gráficas resultantes.

Base de datos en Firebase

Una base de datos es un espacio virtual en Internet que permite a los usuarios con acceso enviar y descargar datos cuando lo deseen. La plataforma de Google, Firebase, ofrece una base de datos en tiempo real, la cual permite ingresar caracteres para ser almacenados o descargados fácilmente mediante el uso de una aplicación Android. Firebase tiene en sus opciones la selección de la ubicación de dicha base, para este proyecto se seleccionó la ubicación de Estados Unidos, esto por ser la opción más cercana. Se desarrolló un App en Android Studio que sirve como medio para el envío de información a la base de datos en tiempo real, esto quiere decir que un usuario con la aplicación instalada en su dispositivo móvil puede enviar los valores seleccionados en la interfaz de la App y automáticamente estos valores son registrados en Firebase en tiempo real. El almacenamiento en la base de datos debe estar controlado debido a que la plataforma ofrece un total de 1 Gb de almacenamiento y 10 Gb de descarga de datos en el modo de uso gratuito, el cual se empleó para el desarrollo de este proyecto. En la tabla 1 se muestran las condiciones de uso de la base de datos en el modo gratuito, esta tabla especifica la cantidad de usuarios, el total de información a descargar y los días estimados de uso. Cabe mencionar que el cálculo de la sumatoria de la información registrada en la base de datos se realiza a medianoche, hora del Pacífico y su restablecimiento se hace cada mes, esto quiere decir que el almacenamiento se establecerá nuevamente a 0/1Gb de escritura y 0/10Gb en descargas de datos.

Tabla 1 Condiciones de uso de la base de datos.

Usuarios	Total de peso de datos descargados	Días estimados de uso
5	6 Mb	1666
20	24 Mb	416
35	42 Mb	238
50	60 Mb	166

Para realizar la comunicación entre la App desarrollada y la base de datos, fue necesario modificar las reglas de lectura y escritura en la base de datos, esto permitirá que la App tenga acceso a la Firebase, ingresando los valores solicitados, los cuales se descargan en el proyecto desarrollado en LabVIEW 2015, en la figura 2 se muestra la modificación de dichas reglas. Algunas características importantes que se deben señalar del uso de la base de datos en tiempo real de Firebase, es que la cantidad máxima de filtros de ID de colecciones para solicitudes de importación y exportación es de 100 y la cantidad máxima de importaciones y exportaciones simultáneas son 50.



```
1 {  
2   "rules": {  
3     ".read": true,  
4     ".write": true  
5   }  
6 }
```

Figura 2 Modificación en las reglas de lectura y escritura de Firebase.

Aplicación para dispositivos Android

Para el control del proyecto desarrollado en LabVIEW se diseñó una aplicación para dispositivos móviles empleando el software Android Studio, este software contiene las herramientas para la conexión de la aplicación desarrollada y la base de datos en tiempo real de Firebase. El funcionamiento de la app consiste en

mostrar al usuario el menú de los sistemas de control que desea utilizar inicialmente, este menú consta de los siguientes sistemas:

- Primer orden general.
- Segundo orden general.
- Mecánico de transición: Masa-Resorte-Amortiguador.
- Mecánico de rotación: Inercia-Resorte-Amortiguador.
- Circuito eléctrico RC
- Circuito eléctrico RLC
- Tanque de agitación continua.
- Motor DC.

En la actividad principal de la aplicación el usuario debe pulsar el botón del sistema a elegir, el código de todas las actividades emplea el lenguaje Java y utilizan los comandos "Intent" para pasar de una actividad a otra dependiendo de la decisión de usuario. Para que la app desarrollada se ejecute de forma correcta es necesario que el dispositivo móvil tenga instalado el sistema Android 4.1 Jelly Bean (o superior) debido a que la aplicación tendrá compatibilidad con el 99.8 % de los dispositivos Android, en la figura 3, se muestra la interfaz de la actividad principal de menú de sistemas. Una vez seleccionado el sistema, se pasará a una actividad secundaria, en la cual se muestran las indicaciones de los valores permitidos para cada sección, en estas páginas se le solicita al usuario que ingrese los valores de las constantes dependiendo del sistema elegido para posteriormente pulsar el botón de enviar y así actualizar los valores escritos en la base de datos. En la figura 4, se presenta la interfaz de la actividad para ingresar las variables del sistema de control. Cabe mencionar que en cada una de las actividades secundarias se solicita ingresar las siguientes constantes del sistema:

- Correo institucional: aquí el usuario ingresa el correo al cual será dirigida la respuesta del sistema con los valores de las constantes ingresadas.
- Set point: es la entrada de referencia de sistema.
- K_p : Constante de proporcional del controlador PID.
- K_i : Constante de integral del controlador PID.

- K_d : Constante de derivativa del controlador PID.



Figura 3 Actividad principal de la aplicación (Menú de sistemas).



Figura 4 Ingreso de variables del sistema de control.

Después de enviar la información que se mostró en la figura 4, la app volverá a mostrar la actividad principal del menú de sistemas. En el código de las actividades secundarias de ingreso de variables, se añade un ID para que cada una de ellas sea reflejada con el mismo nombre en la base de datos en tiempo real y así reducir

el almacenamiento dentro de la misma, actualizando únicamente el valor guardado. En la figura 5 se muestra el funcionamiento de la aplicación en un diagrama de flujo y en la figura 6 se presentan los valores guardados en Firebase.

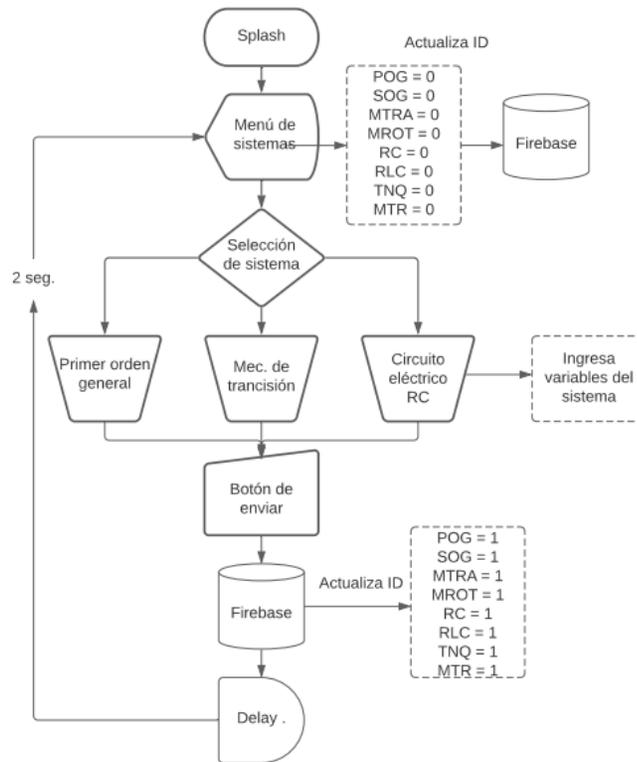


Figura 5 Diagrama de flujo de la App RemoteLab.

Hardware in The Loop (HIL)

En electrónica, la simulación hardware-in-the-loop (HIL) es una técnica usada para el desarrollo y comprobación de sistemas embebidos en tiempo real complejos. La simulación HIL constituye una plataforma efectiva porque incluye toda la complejidad de la planta que controla el sistema embebido. Esto lo realiza mediante modelos matemáticos de todos los sistemas dinámicos relacionados con la planta bajo control, formando lo que se denomina como "simulación de la planta". El sistema embebido que se está comprobando interactúa con esta simulación de la planta. Para la propuesta de este artículo el laboratorio HIL se implementa sobre una plataforma de desarrollo NI myRIO-1900, la cual contiene un FPGA y un procesador que trabaja en tiempo real.

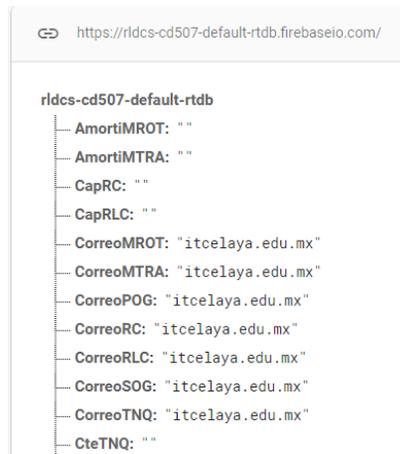


Figura 6 Base de datos en tiempo real de Firebase.

El uso principal de la tarjeta FPGA dentro del laboratorio remoto es embeber el sistema físico propuesto por el usuario, esto con la finalidad de realizar la simulación en tiempo real, generando una emulación de un laboratorio físico, obteniendo resultados similares a los físicos dentro de un entorno virtual mediante la técnica de Hardware in the Loop. De esta manera, se facilita el aprendizaje por parte de los usuarios. La conexión y el uso de la tarjeta se da en el software LabVIEW mediante la funcionalidad de dos programas creados para el laboratorio HIL.

Para el uso de la tarjeta MyRIO se debe tener en cuenta que se divide en dos partes que son el RTP (Real Time Transfer Protocol) y la FPGA (Field-Programmable Gate Array) como se puede observar en la figura 7, para los cuales es necesario desarrollar un programa independiente para cada uno con la finalidad de controlar ambos. Para generar comunicación entre los programas antes mencionados, se utilizan variables globales dentro de la configuración del proyecto.

En la tarjeta de desarrollo NI myRIO-1900 se embebieron los distintos sistemas discretos en los que se pueden implementar prácticas de sistemas de control, en cada uno de estos sistemas el usuario tiene la opción de definir los parámetros que definen el comportamiento de los sistemas.

El protocolo RTP tiene como objetivo la transmisión en tiempo real de información, el papel que desempeña el RTP dentro del funcionamiento del HIL se divide en un ciclo con tres fases, en la primera se realiza el inicio del ciclo con la configuración básica para realizar el RTP, en la siguiente fase se declaran las variables globales

que han sido previamente creadas en el proyecto, esto se realiza dentro de un bloque destinado a manejarlas en tiempo real. Finalmente, en la tercera fase, se realiza la finalización del ciclo mediante los bloques predeterminados para esta tarea.

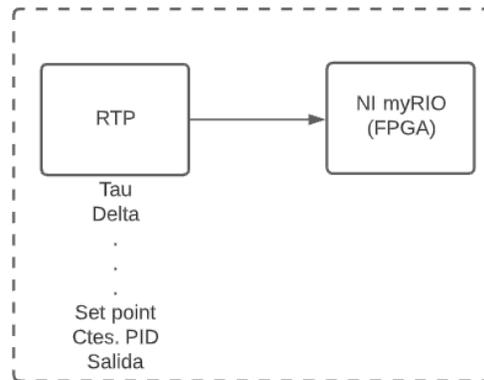


Figura 7 Configuración de la tarjeta NI myRIO-1900.

En el FPGA se implementan los sistemas de control discretos que son la base del laboratorio remoto. El objetivo principal del FPGA es la implementación de los sistemas de control, esto se logra a partir de la declaración de las entradas que son las variables globales y mediante el uso de operaciones previamente establecidas para cada uno de los sistemas de control, estos arrojan las respuestas correspondientes a cada uno de los sistemas que han sido previamente seleccionados. Además, dentro del proyecto se emplea una tarjeta de adquisición de datos NI myDAQ de National Instruments con la finalidad de monitorear el comportamiento de los sistemas de control, esta tarjeta se comunica con la NI myRIO mediante los puertos de entrada y salida analógicos.

Después de ejecutar el sistema de control seleccionado en el laboratorio remoto, se envía al usuario un reporte de resultados mediante un correo electrónico. Este reporte se genera en formato de Word, y contiene principalmente una imagen de la gráfica obtenida y una descripción de los puntos importantes a considerar en la misma. Este proceso se realiza mediante el protocolo SMTP, este debido a que es compatible con Gmail, y es uno de los sistemas de correo electrónico más utilizados, además de que fue pensado en consideración con el correo institucional de los

alumnos del Tecnológico Nacional de México en Celaya, el cual pertenece a este sistema.

3. Resultados

Una de las ventajas de la aplicación creada en Android Studio es que cuenta con una interfaz gráfica amigable con botones y edición de las variables a manipular. En la figura 8 se ilustra la pantalla principal con un ejemplo de los parámetros seleccionados para el sistema de control PID. Una vez que se ejecuta la App, el sistema envía un correo electrónico al usuario con el reporte generado durante el proceso de la simulación en tiempo real.



Figura 8 Selección de parámetros de un controlador PID.

En la figura 9 se ilustra la bandeja de entrada del correo electrónico elegido para correr la simulación. La estructura del reporte cuenta con un título con la leyenda de "Sistemas de control discreto", posteriormente presenta al destinatario la gráfica de la respuesta junto con la leyenda del nombre que le corresponde al sistema seleccionado, el tiempo de asentamiento y el valor del sobretiro de la respuesta del sistema de control como se muestra en la figura 10.

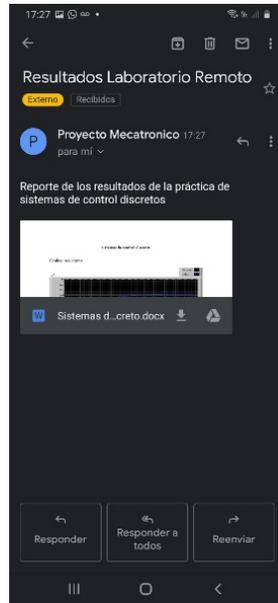


Figura 9 Recepción del correo electrónico con resultados.



Figura 10 Reporte de los resultados de la práctica.

A continuación, se presentan algunos de los resultados gráficos que se pueden obtener con el laboratorio remoto propuesto. En el primer caso, se muestra un sistema de primer orden general, este es un sistema lento que cuenta con un tiempo de asentamiento de aproximadamente 12.7 segundos. En las figuras 11 y 12, se

ilustra el resultado obtenido en Simulink en comparación con el resultado obtenido en el laboratorio remoto. Se puede ver una variación en las gráficas, ya que en simulink se da de forma continua la gráfica hasta que se estabiliza, y en LabVIEW primero se da un pico para finalmente estabilizarse. Estas variaciones se deben a la discretización de los sistemas.

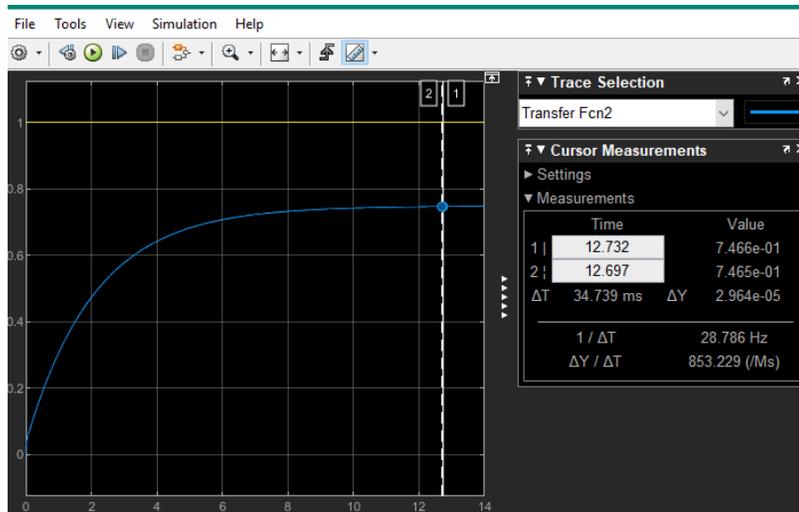


Figura 11 Resultado Simulink.

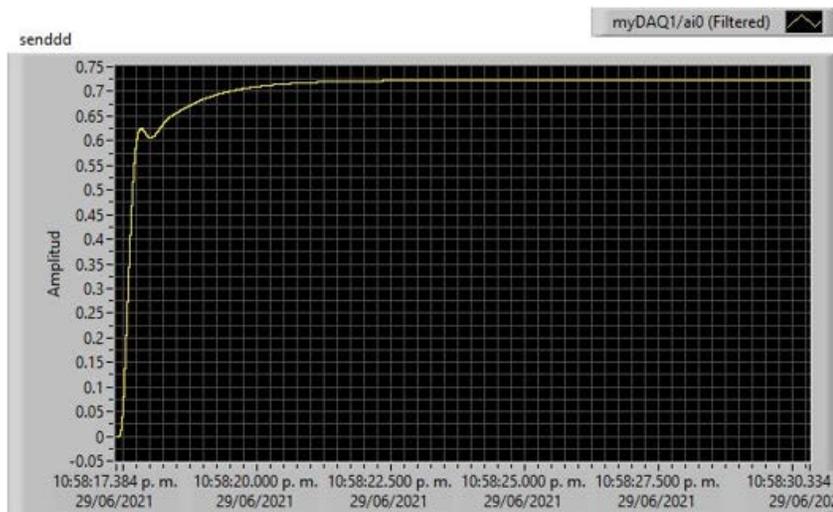


Figura 12 Resultado LabVIEW.

En el siguiente caso, se muestra un sistema de segundo orden, este sistema tiene un tiempo de asentamiento de 2.44 segundos. En este sistema, existe mayor

semejanza en cuanto a las gráficas obtenidas en simulink y las arrojadas por el laboratorio propuesto, como se puede observar en las figuras 13 y 14.

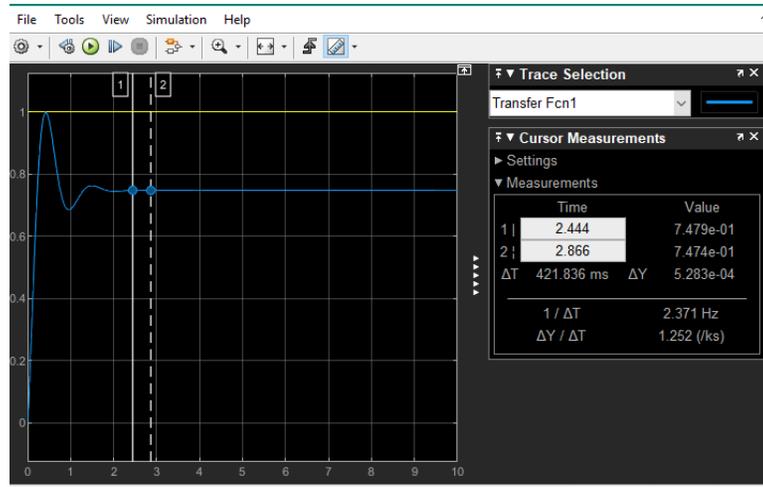


Figura 13 Gráfica obtenida en Simulink.

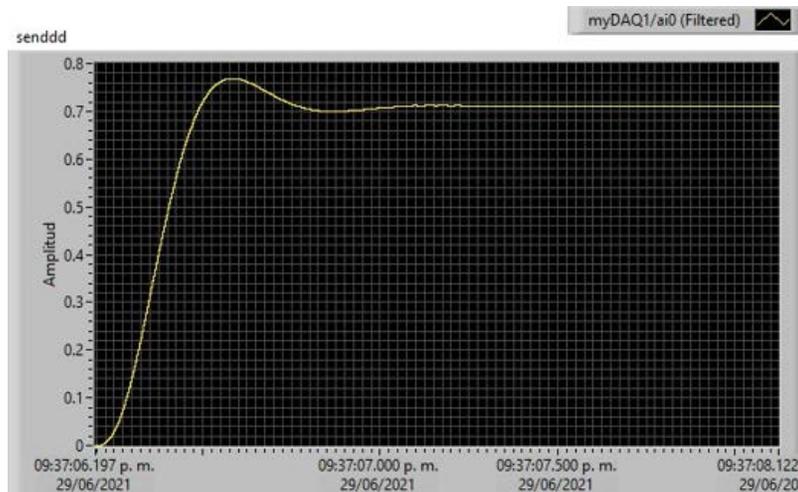


Figura 14 Gráfica obtenida en LabVIEW.

La tercera prueba se realizó con un sistema de primer orden considerando una velocidad de respuesta intermedia con un tiempo de asentamiento de 5.99 segundos. En este caso, se observa una variación notoria en cuanto a las gráficas resultantes se refiere, en la primera gráfica, es un resultado continuo, y en la gráfica de LabVIEW se puede observar un pico para luego estabilizarse, como se observa en las figuras 15 y 16.

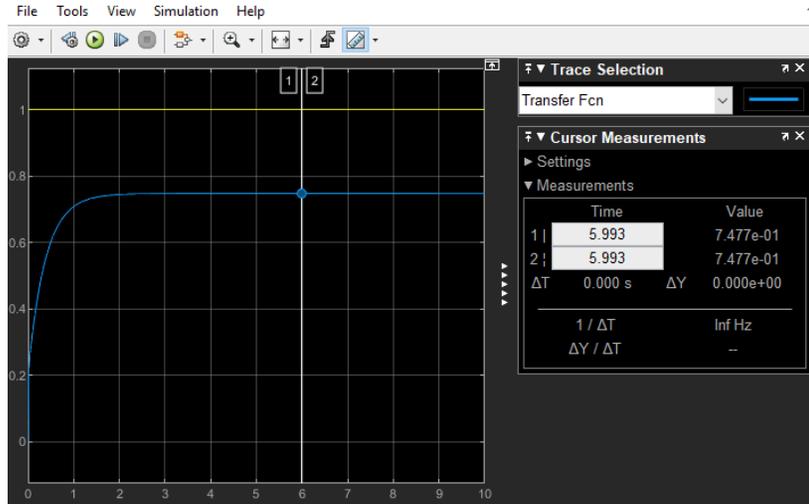


Figura 15 Gráfica Simulink.

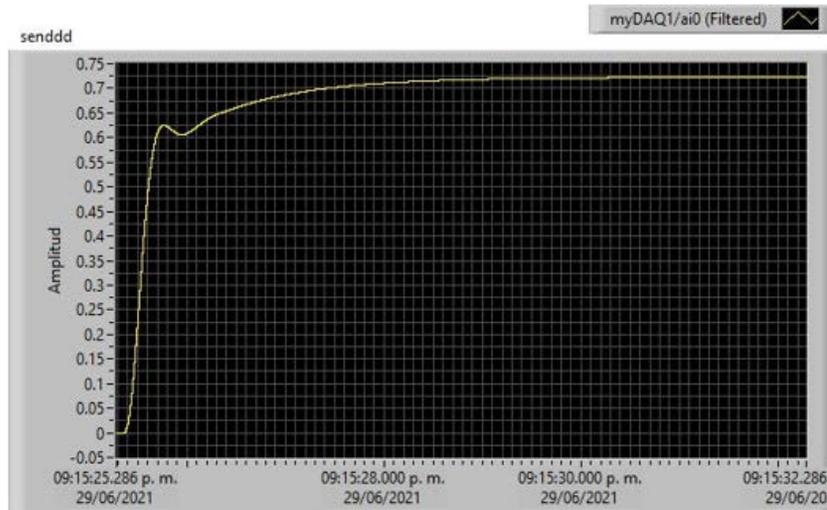


Figura 16 Gráfica LabVIEW.

4. Discusión

En la última prueba, se seleccionaron los parámetros que se ilustran en la figura 17, obteniendo los resultados que se presentan en las figuras 18 y 19. Como se puede observar en las respuestas, el laboratorio remoto cumple con la respuesta esperada a obtener en Simulink, teniendo un valor de estable de la respuesta de 0.720490 y un tiempo de establecimiento de 30 ms, dando por hecho que el sistema funciona adecuadamente en la práctica y la adquisición de los datos en tiempo real por parte de la tarjeta myDAQ es la deseada.

proyecto base, la cual no pudo ser modificada. Uno de los trabajos a futuro es expandir el Laboratorio Remoto propuesto para contar con la opción de que múltiples usuarios trabajen de manera concurrente.

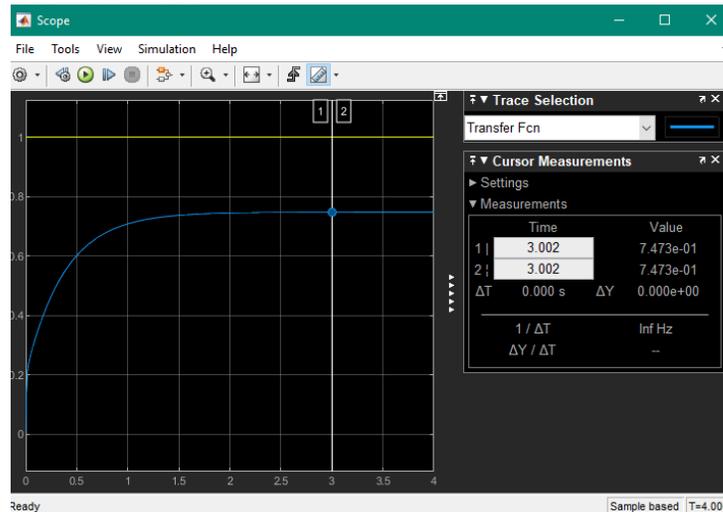


Figura 19 Respuesta del sistema en Simulink.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Cepal, N. (2020). La educación en tiempos de pandemia de COVID-19. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)., 923-935.
- [2] Cuenca, S., Grediafa, A., Llorens, H., & Alberto, M. (2007). Performance Evaluation of FPGA-Embedded Web Server. 14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 1187-1190.
- [3] García-Zubia, J., Orduña, P., López de Ipiña, D., & R. Alves, G. (2009). Addressing Software Impact in the Design of Remote Laboratories. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 4757-4767.
- [4] Gazzo, M. (2020). La educación en tiempos de COVID-19: Nuevas prácticas docentes, ¿nuevos estudiantes? Revista del departamento de Ciencias Sociales, 58-63.
- [5] Instruments, N. (2015). National Instruments. Obtenido de Distance Learning Remote Laboratories using LabVIEW: https://www.ni.com/pdf/academic/us/distance_learning.pdf

- [6] Magdaleno, E., Rodríguez, M., F., P., Hernández, D., & E., G. (2013, 2014). A FPGA embedded web server for remote monitoring and control of smart sensors networks. *Sensors* .
- [7] Sangrá Morer, A. (2001). Enseñar y aprender en la virtualidad. . *Educación* , 117-131.
- [8] Yu , Q., Chen , B., & Cheng , H. (2015). Web-based control system design and analysis. *IEEE Control Syst Mag* 24, 45-57.