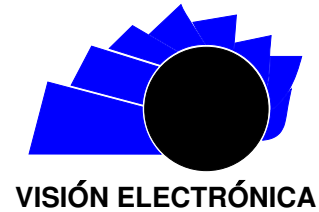




Visión Electrónica

Más que un estado sólido

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele>



VISIÓN DE CASO

Prototipo para modelar y controlar un motor DC

Prototype for modeling and controlling a DC motor

Jairo David Cuero Ortega.¹

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Enviado: 13/10/2017

Recibido: 22/10/2017

Aceptado: 12/01/2018

Palabras clave:

Controlador PID

MATLAB®

MBED®

Modelamiento de sistemas

Motor DC

Sistemas de control

Open access



Keywords:

PID controller

MATLAB®

MBED®

System modeling

DC motor

Control systems

RESUMEN

Este artículo presenta el diseño e implementación de un sistema de control de velocidad y posición para un motor de corriente continua (12VDC – 200RPM) que consta de una interfaz en MATLAB® que se comunica con un microcontrolador ARM® de 32Bits programado en la plataforma MBED®. El usuario, a través de la interfaz gráfica, puede realizar el proceso de diseño de un sistema de control desde la adquisición de los datos para identificar la planta hasta la simulación del sistema directamente en el motor. Esto permite que el usuario visualice rápidamente el funcionamiento del controlador recién diseñado y pueda realizar los ajustes y sintonización del mismo. El equipo se utiliza actualmente como ayuda didáctica en la Universidad de los Llanos, esto ha contribuido a que el proceso de enseñanza sea más práctico y que se apliquen los fundamentos de la teoría de control más allá de la simulación en Matlab.

ABSTRACT

This paper presents the design and implementation of a speed and position control system for a DC motor (12VDC - 200RPM) consisting of a MATLAB interface that communicates with a 32bit ARM® microcontroller programmed on the MBED platform. The user, through the graphic interface, can perform the design process of a control system from the acquisition of the data to identify the plant to the simulation of the system directly in the engine. This allows the user quickly visualize the operation of the newly designed controller and make adjustments in order to tune it. The equipment is currently used as a didactic tool in the University of Los Llanos, this has contributed to make the teaching process more practical and to apply the fundamentals of the control theory beyond the simulation in Matlab.

¹Ingeniero electrónico, Universidad de los Llanos, Colombia. Especialista en instrumentación y control industrial, Universidad de los Llanos, Colombia. Lugar de trabajo o Afiliación institucional: Universidad de los Llanos, Colombia. Correo electrónico: Jairo_cuero@unillanos.edu.co

1. Introducción

La educación superior está presentando cambios estructurales en la forma de enseñar los conceptos básicos de las asignaturas transversales en las ciencias del saber, dichos cambios buscan un fortalecimiento en las bases del conocimiento de los futuros profesionales. [1] En la enseñanza de la ingeniería los laboratorios de instrucción han sido una parte esencial de los programas de pregrado, ya que eran, en un principio, la única fuente de instrucción práctica que se necesitaba para complementar la ciencia de ingeniería que se enseñaba en el aula de clases. En cierto modo, los laboratorios con estudiantes que trabajaban en grupos eran el primer reconocimiento de que la mejor manera de enseñar era “practicar haciendo” y “enseñar a otros”. [2]

La ingeniería electrónica, como carrera de base científica, aborda temáticas y cursos como sistemas de control que requieren de un componente práctico en el proceso de enseñanza, y aunque el uso de programas de simulación o de laboratorios virtuales permite a los estudiantes poner en práctica sus habilidades de diseño [3], éstas se ven limitadas al impedirles enfrentarse a los problemas que surgen al momento de implementar un sistema del mundo real. Por otra parte, si las simulaciones se complementan con hardware configurable se puede realizar un acercamiento a las situaciones y condiciones del entorno físico que permite al estudiante fortalecer su capacidad para corregir errores y adquirir habilidades que no son posibles en un entorno controlado como el académico.

Consciente de ésta necesidad, se planteó el diseño e implementación de un sistema de control de velocidad para un motor DC que provee a los estudiantes de una herramienta práctica muy útil en la aplicación de los conocimientos adquiridos en cursos como modelamiento de sistemas dinámicos y teoría de control. Varios productos de este tipo se comercializan en el mercado, de los más importantes está QNET 2.0 DC Motor Board que es un sistema de servomotor diseñado para enseñar y demostrar los fundamentos del control en motores de corriente continua en una variedad de maneras [4]. Sin embargo, éste está diseñado exclusivamente para la plataforma NI ELVIS y el software LabVIEWTM y no así para Matlab que es ampliamente utilizado en la enseñanza de sistemas de control gracias a los poderosos toolbox que ofrece, como el de identificación de sistemas (IDENT) y el de diseño de controladores (SISOTOOL).

Con respecto al desarrollo del proyecto, éste se llevó a cabo a través de las siguientes fases: fase conceptual, fase de requerimientos, diseño, implementación y finalmente

la fase de presentación de los resultados. En la fase conceptual se investiga sobre modelado de sistemas y teoría de control; la siguiente fase comprende la definición de requerimientos y la selección de componentes; en la fase de diseño se aborda el diseño electrónico, la programación del MBED y el desarrollo de la interfaz gráfica en el GUIDE de MATLAB; la fase de implementación consiste en el montaje electrónico, la comunicación entre MATLAB y el MBED, pruebas y ajustes finales. Una vez culminadas las anteriores fases se procedió a evaluar los resultados obtenidos a través del funcionamiento del proyecto en el aula de clases.

2. Materiales y métodos

La puesta en funcionamiento del proyecto y su evaluación se realizó en los cursos de control digital y modelado de sistemas con estudiantes de octavo y sexto semestre, respectivamente, ambos cursos, pertenecen al programa de ingeniería electrónica de la universidad de los Llanos, ubicada en la región de la Orinoquía Colombiana, con georreferenciación 4°04'27"N 73°35'04"W.

2.1. Requerimiento de diseño y selección de materiales

Para el desarrollo del proyecto se consideraron los siguientes requerimientos:

- El elemento a controlar debe ser un motor de corriente continua debido a la facilidad para modelarlo. Debe traer incorporado un encoder con el fin de obtener su velocidad y sentido de giro.
- Se debe contar con una tarjeta de adquisición, un sistema de desarrollo o un microcontrolador que actúe como puente entre el motor y el software en el computador. El sistema seleccionado ha de tener entradas y salidas analógicas, capacidad de comunicación con otros dispositivos y/o PC, Unidad de punto flotante y ser capaz de operar a alta velocidad.
- Es necesario que la interfaz se desarrolle o sea compatible con MATLAB ya que cuenta con herramientas exclusivas (toolbox) para trabajar con sistemas de control.
- Se requiere que la interfaz gráfica sea bastante intuitiva para facilitar el manejo por parte de los estudiantes y robusta para evitar los posibles errores de los mismos.
- El prototipo tiene que incluir todos los procesos para diseñar un controlador (adquisición de los

datos, identificación de la planta, verificación, fijación de requerimientos, selección del controlador y obtención de los parámetros del controlador) [5], además de ser capaz de realizar la simulación del sistema de control y la implementación del mismo para verificar su funcionamiento.

Una vez establecidos los parámetros de diseño, se hizo la selección de los componentes teniendo en cuenta la relación costo – beneficio y la asequibilidad en el mercado nacional. (Ver Tabla 1).

Tabla 1: Materiales seleccionados.

Hardware	Motor reductor con encoder pol-1444
	Puente H – L298
	Tarjeta de desarrollo MBED-LPC1768
Software	Matlab 2014a.

Fuente: elaboración propia.

2.1.1. Motor reductor pol-1444

Este motor usa un encoder de efecto Hall de dos canales que se utiliza para detectar la rotación de un disco magnético que se encuentra en la parte posterior del eje de rotación del motor. El encoder de cuadratura proporciona una resolución de 64 pulsos por revolución del eje del motor. El sensor de efecto Hall requiere una tensión de entrada desde 3.5V a 20V con una corriente máxima de 10mA. Las salidas A y B son ondas cuadradas de 0V a Vcc, con un desfase aproximado de 90° entre las dos. La frecuencia de las señales indica la velocidad del

motor y el orden de las transmisiones indica la dirección. [6]

2.1.2. Puente H

Es un circuito electrónico que permite controlar la velocidad y el sentido de giro de un motor de corriente continua ya sea en sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario de estas. El puente H seleccionado es el L298 de alta potencia y puede manejar directamente dos motores.

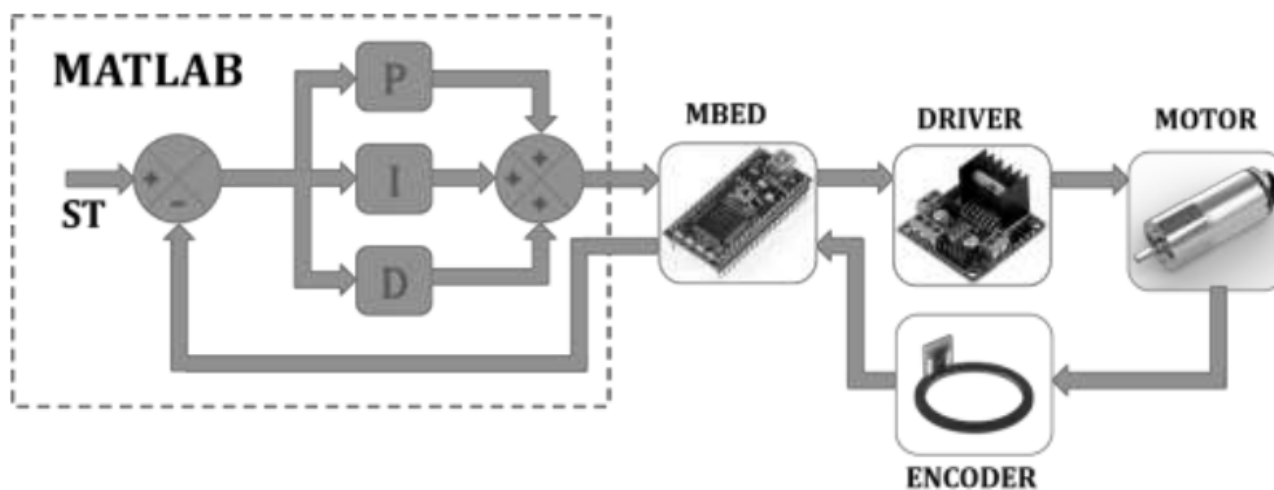
2.1.3. Tarjeta de desarrollo MBED-LPC1768

Los microcontroladores MBED son una serie de tarjetas de desarrollo de microcontroladores ARM, diseñados para crear rápidamente prototipos de desarrollo. El MBED LPC1768 cuenta con núcleo Cortex M3 de 32 bits a 96MHz, 512KB FLASH, 32 KB de RAM e interfaces como: Ethernet incorporada, USB, CAN, SPI, I2C, ADC, DAC, PWM y otras interfaces de E/S. Esta tarjeta viene en un encapsulado DIP de 40 pines. Incluye una interfaz de programación USB tan sencilla de usar como una unidad flash, solo basta conectarlo, cargar el programa ARM y queda listo para usar. [7]

2.2. Diseño Electrónico

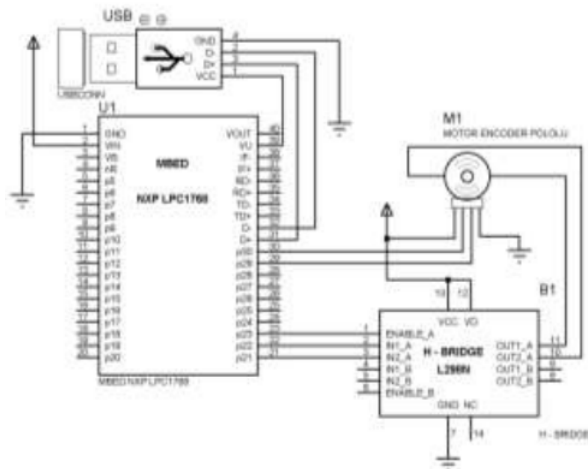
El esquema general del proyecto se muestra en la Figura 1. El diseño electrónico se encarga del circuito para controlar la velocidad y giro del motor a través del puente H como driver de potencia (ver Figura 2); estos son controlados por el MBED que se comunica por puerto USB con la interfaz gráfica.

Figura 1: Esquemático del Sistema.



Fuente: elaboración propia.

Figura 2: Diagrama Electrónico.



Fuente: elaboración propia.

2.3. Desarrollo del Software para el MBED

El programa en el MBED cuenta con tres opciones principales: Adquirir, Velocidad y Posición.

- **Adquirir:** Esta opción recibe los parámetros de tiempo de muestreo y el valor de tres señales de escalón enviadas desde Matlab, las cuales serán aplicadas al motor. Así mismo lee los datos del encoder que resultan de estas señales aplicadas y los envía a Matlab.
- **Velocidad:** se encarga de recibir el valor del ciclo de trabajo que será aplicado al motor y a su vez leer los datos del encoder para graficar y realizar la realimentación del sistema de control.
- **Posición:** realiza las mismas operaciones que la opción de velocidad, además de ello convierte los valores recibidos en un rango de -1 a 1 para aplicar al motor, donde 1 indica 100 % del ciclo de trabajo en sentido horario y -1 se traduce como 100 % del ciclo de trabajo en sentido anti horario.

2.4. Diseño de la Interfaz Gráfica

La interfaz gráfica se realizó en el GUIDE de Matlab, se planteó en primera medida la comunicación de la interfaz con el MBED, luego los procesos de identificación y diseño de control y finalmente la simulación (ver figura 3).

Figura 3: Diagrama de la Interfaz Gráfica.



Fuente: elaboración propia.

Ésta cuenta con un panel de mensajes que permite al usuario saber el estado del proceso y los posibles errores que se presentan durante el mismo. La comunicación entre la interfaz y el MBED se realiza a través del puerto serial.

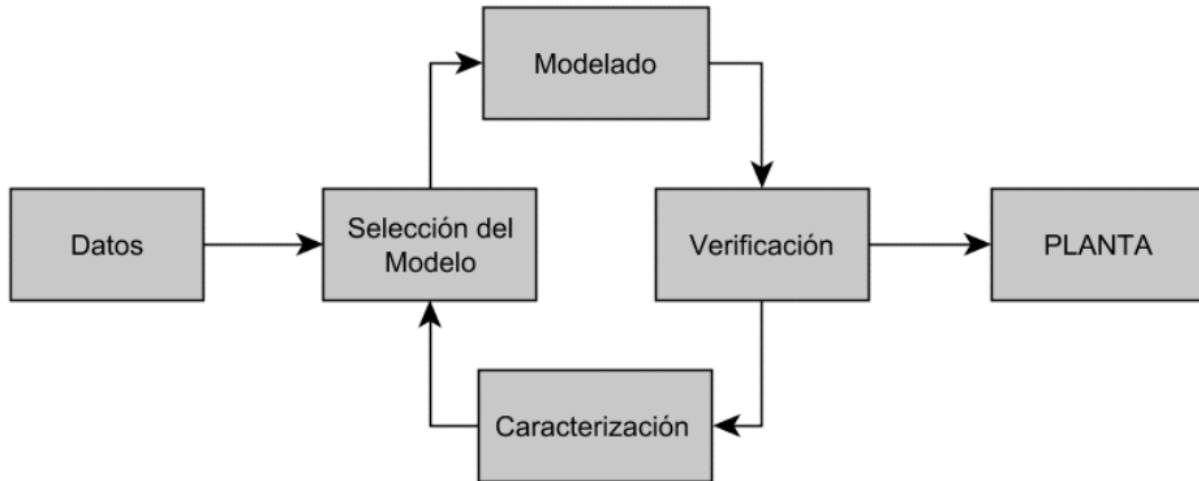
En el proceso de adquisición se realiza la caracterización del motor DC (ver figura 4). La caracterización del motor consiste en leer la respuesta del motor en lazo abierto, a una o varias entradas escalón en un intervalo de tiempo, para el proyecto se usaron tres entradas. Matlab envía las tres entradas escalón al MBED distribuidas en el tiempo de muestreo seleccionado, el MBED se encarga de transformarlas en un pulso PWM el cual se envía al motor y al mismo tiempo el MBED lee los datos generados por el encoder y los envía a Matlab de forma serial.

Matlab recibe los datos del encoder enviados por el MBED, los traduce en velocidad y realiza la gráfica correspondiente de la entrada y de la respuesta del sistema (Motor DC) ante la entrada correspondiente.

Una vez realizada la caracterización de la planta se elige el modelo de la misma al cual se quiere ajustar, ésta debe ajustarse de la mejor forma a la caracterización de los datos para que al momento de diseñar el controlador, la respuesta del sistema sea la más óptima posible y una vez elegido el modelo que se quiere usar, se realiza la identificación.

Para realizar el diseño del controlador para la planta que se ha identificado, la interfaz proporciona una planta en tiempo discreto. Ésta se lleva a la herramienta de diseño de controladores para sistemas una entrada – una salida (SISO) con realimentación, llamado SISOTOOL.

Figura 4: Proceso para identificar la planta.



Fuente: elaboración propia.

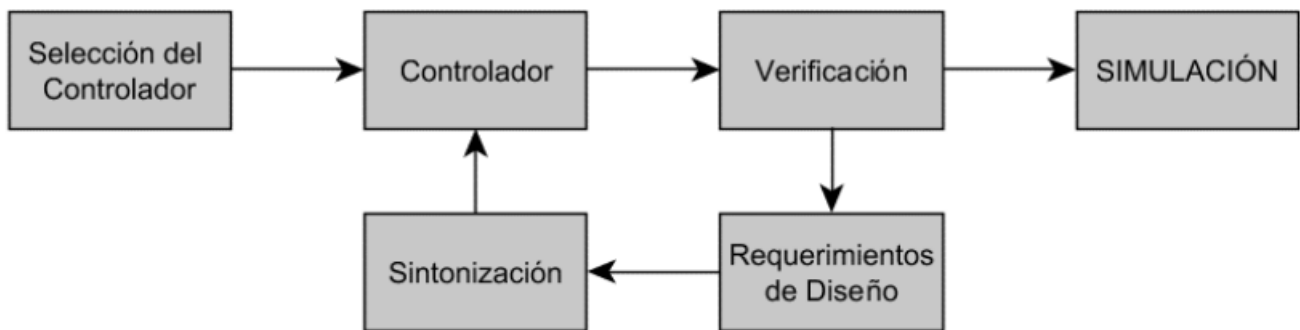
Para el presente proyecto se determinó abordar el diseño de controladores PID sin filtro derivativo. Una vez seleccionado el controlador, SISOTOOL muestra en primera instancia un controlador estándar poco ideal, a éste se le establecen ciertos requerimientos de diseño (sobrepaso máximo y tiempos de levantamiento y de establecimiento) y se procede a hacer la optimización de la ganancia y la localización de los polos y ceros (Sintonización).

Si Matlab no logra encontrar un controlador que cumpla los requerimientos de diseño, se deben elegir otros parámetros y volver a generar la optimización; este proceso debe ser repetido tal como se muestra en la Figura 5, hasta encontrar una respuesta estable.

Finalizado el diseño del controlador, éste se exporta desde SISOTOOL y se procede a verificar si la respuesta de la planta matemática usando ese controlador es la correcta. En caso de que el controlador elegido no cumpla con las especificaciones o el sistema matemático no responda de forma adecuada a las entradas de prueba, se debe proceder a obtener de nuevo la respuesta del motor DC para una entrada específica, (proceso de adquisición) pero se deben usar diferentes parámetros de tiempo de muestreo, tiempo de captura y valores de escalón.

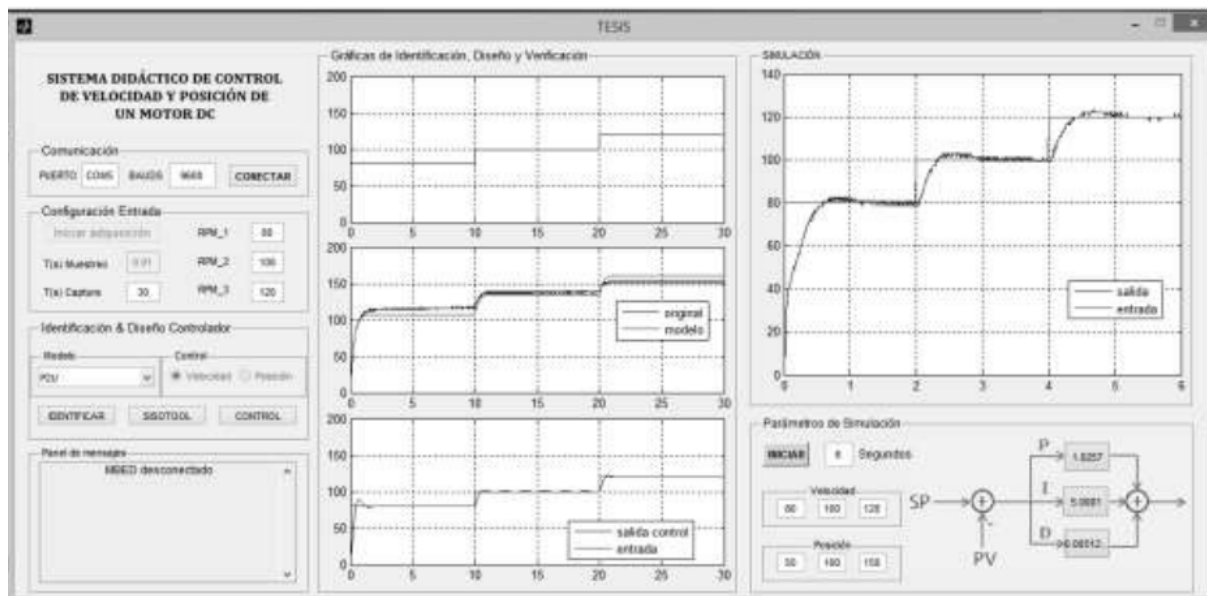
Si Una vez aplicado el controlador diseñado a la planta matemática, y verificado que la respuesta a las entradas escalón es la correcta, se procede a realizar la simulación del controlador con el sistema real: Motor DC.

Figura 5: Proceso para diseñar el controlador.



Fuente: elaboración propia.

Figura 6: Interfaz gráfica terminada.



Fuente: elaboración propia.

En la Figura 6 se observa como quedó la interfaz gráfica de usuario terminada. Se pueden ver que los procesos anteriormente descritos están en orden en la parte izquierda y de arriba hacia abajo. Los botones que maneja el usuario se van activando a medida que se avanza en los procesos, de ésta manera se evitan posibles errores que detengan la ejecución del programa. En la parte inferior izquierda se localiza el panel de mensajes que muestra información relevante de los procesos y del prototipo mismo como la carga de la batería y el estado de la comunicación entre MATLAB y el MBED.

2.5. Diseño Físico del Prototipo

Al diseño electrónico se le agregó una batería sellada de 12V y 3.3Ah para proveerle autonomía y permitir su uso en cualquier espacio que no cuente con fuentes de alimentación. También cuenta con una entrada para un adaptador de 12VAC que, a través de un circuito interno de rectificación, se ocupa de cargar la batería cuando sea necesario. La cubierta del equipo se fabricó en acrílico semitransparente que permite ver los componentes utilizados en su fabricación y facilita el transporte y almacenamiento del prototipo.

En el panel frontal se encuentran los leds indicadores de la función que se está realizando en el momento, el interruptor de apagado y encendido y la entrada del cable USB para la conexión con el pc (ver figura 7). La Entrada de carga para la batería se localiza en la parte lateral

derecha.

Figura 7: Imagen frontal del equipo terminado.



Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

- El proyecto cumple con los objetivos propuestos ya que se finaliza con el diseño e implementación de un sistema didáctico de control para un motor dc, que brinda la posibilidad de aplicar los conocimientos en asignaturas relacionados con Ingeniería de Control en un sistema real.
- El proceso de diseño y puesta en funcionamiento de un controlador PID sin filtro derivativo para un motor DC, iniciando desde la adquisición de los datos de entrada – salida, se pudo realizar

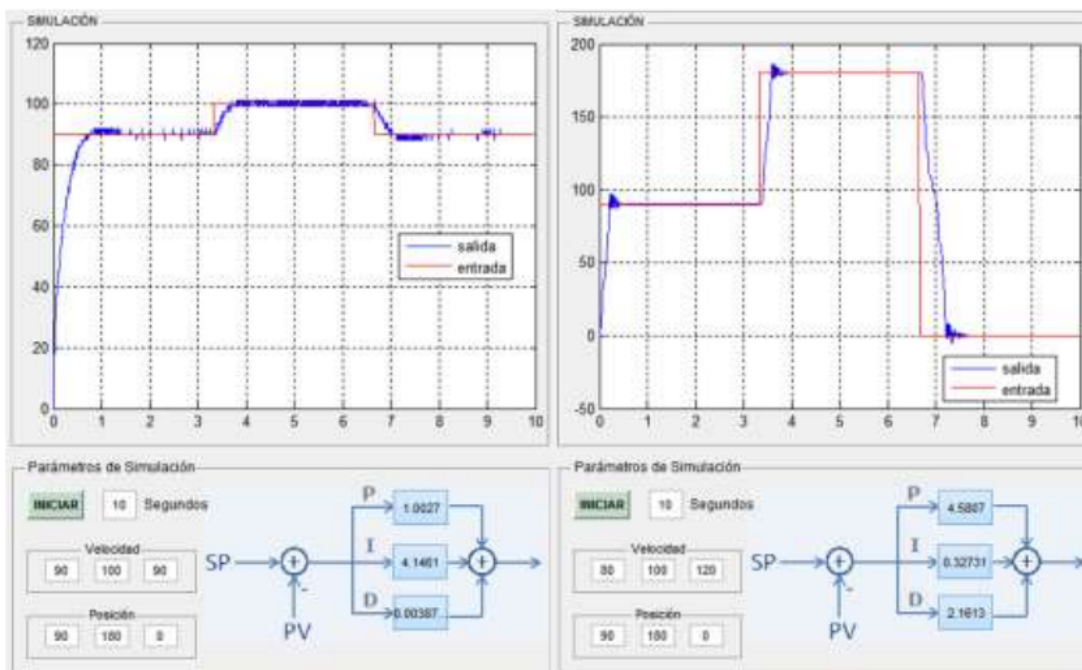
en un tiempo aproximado de diez minutos, lo que es significativamente menor al tiempo que tomaría hacer lo mismo de manera aislada, esto es: llevando los datos a Matlab, identificando la planta, diseñando el controlador, luego hacer la implementación en el hardware.

- La interfaz dispone de dos modelos de planta para ajustar los datos de la respuesta del motor: modelo de sistema de primer orden y modelo ARX. El modelo de primer orden es en tiempo continuo y el de ARX es en tiempo discreto, sin embargo, el controlador que se implementa siempre es digital. El programa se encarga de pasar a tiempo discreto la planta si el usuario opta por hacer la identificación en tiempo continuo.
- Esta herramienta ha permitido a los estudiantes

de ingeniería electrónica de la Universidad de los Llanos, realizar diseños basados en un sistema estándar, probar dichos diseños y corregir los errores de un sistema de control en un entorno real.

- Se intentó realizar la gráfica en tiempo real del proceso de captura de datos y de simulación, sin embargo, las funciones para graficar en Matlab tardan más de 10ms en ejecutarse (mayor al periodo de muestreo) por tanto se ralentizaba todo el proceso haciendo que se perdieran datos de la comunicación serial. Por ello, se optó por hacer primero la captura de datos y luego realizar la gráfica, con ésta solución se obtuvieron resultados apropiados. La figura 8 muestra la respuesta del sistema con controlador, tanto para velocidad como para posición.

Figura 8: Control de velocidad (izq) y de posición (der).



Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

Desde el punto de vista investigativo, la experiencia adquirida en la puesta en marcha de este sistema, permite contar con una valiosa herramienta para trabajos futuros, tanto desde el punto de vista de hardware (MBED) como de software (MBED PLATFORM y GUIDE).

- La usabilidad de la interfaz y del dispositivo en general le brinda al estudiante la posibilidad de

comprobar los conocimientos teóricos a través de prácticas sencillas sobre una planta física y no sólo sobre un modelo de simulación.

- El prototipo cumple con todos los requerimientos necesarios para ser utilizado en un laboratorio de control o incluso en una sala de informática debido a que cuenta con batería incorporada que le proporciona portabilidad.

- El mayor desafío fue lograr una comunicación estable entre el MBED y Matlab debido a la complejidad en el manejo de los puertos desde Matlab. Estos problemas que detenían la ejecución del programa fueron sorteados con sentencias try – catch.
- Los valores de las señales escalón que se requieren para realizar la caracterización de la planta, pueden ir desde 50 RPM hasta 200 RPM que es la máxima velocidad del motor, para amplitudes inferiores a 50 RPM el motor no responde de forma adecuada.
- Para futuros proyectos similares se recomienda utilizar una plataforma soportada por el toolbox de tiempo real de Matlab o el xPC target.

5. Reconocimientos

El desarrollo del proyecto se hizo con apoyo del grupo de investigación MACRYPT, cuyos intereses abarcan arquitecturas computacionales, sistemas digitales y matemáticas aplicadas en la ingeniería. Acorde con el avance de la tecnología aborda la implementación de sistemas digitales en dispositivos lógicos reconfigurables, para aplicaciones en criptografía, procesamiento digital de señales y sistemas de control. Actualmente, el grupo MACRYPT está reconocido por Colciencias en categoría D

Referencias

- [1] D. O. Rodríguez, S. Fernández, S. Estupiñán “Herramienta virtual para la enseñanza de control automático usando Pbl” Encuentro internacional de educación en ingeniería ACOFI 2014. Cartagena de Indias.
- [2] L. Feisel, A. Rosa, “The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education”. *J. of Eng. Educ.* 94, 121-130, 2005. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2005.tb00833.x>
- [3] A. Loyarte, M. Blas, “Laboratorio Virtual Remoto: “Una Herramienta para La Enseñanza de Control Automático”. XXIII AAECA, 03-05 de oct. de 2012, Buenos Aires.
- [4] QNET 2.0 DC Motor Board, QUANSER INNOVATE-EDUCATE, 12 de mayo de 2017, [En línea] Disponible en: <http://www.quanser.com/products/qnet-dcmotor>
- [5] S. Fadali, A. Visioli “Digital Control Engineering – analysis and design”, Elsevier second edition. 2013.
- [6] 50:1 Metal Gearmotor 37Dx54L mm with 64 CPR Encoder, Pololu robotics and electronics, 12 de mayo de 2017, [En línea] Disponible en: <https://www.pololu.com/product/1444>.
- [7] Rapid prototyping for the LPC1768 MCU. “SparkFun Electronics inc” 12 de mayo de 2017, [En línea] Disponible en: https://www.sparkfun.com/datasheets/DevTools/ARM/mbed_LPC1768