

Diseño e Implementación de un Sistema de Velocidad y Posición de un Motor DC para la Enseñanza de Conceptos de Control en Ingeniería

Design and Implementation of a DC Motor Speed and Position System for Teaching Control Concepts in Engineering

Diana Marcela Ovalle Martínez¹, Joel Mateo Moreno Quintero²,
Luis Francisco Cómbita Alfonso³

Citar este documento: Diana Marcela Ovalle Martínez, Joel Mateo Moreno Quintero, Luis Francisco Cómbita Alfonso. Diseño e Implementación de un Sistema de Velocidad y Posición de un Motor DC para la Enseñanza de Conceptos de Control en Ingeniería. Revista Technol. Investig. Academia TIA, ISSN: 2344-8288, año 2023 Vol. 11 Numero 1, pp.60-88. Bogotá-Colombia.

RESUMEN

¹ Ingeniera Electrónica, Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, Magister en Ingeniería, Universidad de los Andes, Doctora en Tecnologías Industriales, Universidad Politécnica de Cartagena (España). Docente de planta, Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, dmovallem@udistrital.edu.co, Colombia, ORCID: 0000-0002-3650-4273

² Ingeniero Electrónico, Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, Especialista en Evaluación y Desarrollo de Proyectos, Universidad del Rosario, Master en Visual Analytics y Big Data, UNIR. Sr Data scientist, Mercado Libre, joelmateo3@hotmail.com, Colombia, ORCID: 0009-0006-8465-9815

³ Ingeniero Electrónico, Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, Magister en Ingeniería y Doctor en Ingeniería, Universidad de los Andes. Docente de planta, Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, lfcombata@udistrital.edu.co, Colombia, ORCID: 0000-0001-9835-4453

Este trabajo muestra los procesos de diseño e implementación de un sistema de velocidad y posición de un motor DC para la enseñanza de conceptos de control en ingeniería. Se detalla la justificación de construcción y los requerimientos del prototipo, así como el modelo dinámico que permitirá la verificación del sistema implementado. Se proponen un conjunto de prácticas de laboratorio para el refuerzo de conceptos en el área de sistemas de control como son: identificación de sistemas a partir de la respuesta escalón y a partir de la respuesta en frecuencia, acciones básicas de control (ON – OFF, proporcional e integral), así como el diseño de controladores tanto por el método del lugar geométrico de las raíces como por el método de la respuesta en frecuencia. El trabajo finaliza concluyendo respecto a todo el proceso de elaboración del prototipo y dando algunas recomendaciones adicionales sobre su posible uso y mejoras.

Palabras clave: Sistema de motor DC, Control de posición, Control de velocidad, Educación en ingeniería, laboratorio de control.

ABSTRACT

This work shows the design and implementation processes of a DC motor speed and position system for teaching control concepts in engineering. We give a justification for building the prototype as well as building requirements and the dynamic model, which allows the verification of the implemented system. A set of labs to reinforce concepts in the area of control systems are proposed such as: system identification from the step response and from the frequency response, basic control actions (ON - OFF, proportional and integral) and controller design method by both the root locus and the frequency response methods. Finally, we give some conclusions, recommendations and future work.

Keywords: DC motor system, position control, speed control, Engineering education, Laboratory of control.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, con el surgimiento de los sistemas de aseguramiento de la calidad en la educación, junto con la transición al modelo de educación basado en competencias, a nivel mundial, se ha visto en las universidades un incremento en la adquisición de equipos de laboratorio, con el fin de demostrar al exterior y lograr al interior mejoras en la calidad de la educación que imparten a sus estudiantes. Específicamente en el área de la ingeniería y más exactamente en los programas que ofrecen formación en el área de control y automatización, como ingeniería electrónica, ingeniería eléctrica, ingeniería en control, ingeniería mecánica, ingeniería mecatrónica, ingeniería química, entre otras, se aprecia un interés en incluir experiencias de laboratorio, con el fin de que los estudiantes exhiban competencias a la hora de implementar soluciones en el mundo real.

Entre las primeras publicaciones que evidencian la necesidad de tener experimentos de laboratorio en cursos de ingeniería de control se tiene a Balchen et al. (1981) y entre los primeros programas por preocuparse en incluir dichas experiencias de laboratorio en sus currículos se aprecian los cursos de control de la Universidad de Lund, en Suecia, Astrom and Lundh (1992). Desde entonces, múltiples publicaciones se han hecho en la materia. También se encuentra la publicación de estudios y encuestas hechas a miembros de la comunidad de control a nivel mundial, como egresados, empleadores y profesores, como las mostradas por Feliachi (1991), Cook y Samad (2009), y más recientemente por Rossitier (2019), Rossitier (2020), todas ellas coinciden en que la industria y los centros de investigación a nivel mundial necesitan ingenieros con competencias para el diseño e implementación de sistemas de control en tiempo real.

De manera adicional, en esos mismos trabajos se resalta que el trabajo experimental en el laboratorio con equipos similares a los sistemas reales que el futuro ingeniero encontrará a lo largo de su quehacer profesional incrementa en un alto porcentaje el desarrollo de dichas competencias. Además de las encuestas que cada tanto se realizan para la actualización curricular en el área, también se encuentran estados del arte completos respecto a cómo la experiencia en laboratorios contribuye al desarrollo de las competencias de ingenieros con formación en general, como el desarrollado por Ma y Nickerson (2006).

Así mismo, encontramos documentos asociados a la integración curricular de laboratorios como parte de la formación de estudiantes, como el desarrollado por Mountain y Hibbeler (2006). Adicionalmente, se encuentran metodologías para la evaluación de estudiantes desde las competencias, los resultados de aprendizaje asociados, los indicadores que se desprenden de dichos resultados de aprendizaje y la forma en la que estos indicadores se evidencian en las evaluaciones, indicando formas prácticas de desarrollar rúbricas aplicados a cursos de control y laboratorio de control en Vargas et. al (2024). Todos estos trabajos evidencian la necesidad e importancia del trabajo experimental en la formación en educación superior en los cursos asociados al área del control y la automatización y, en general, en ingeniería.

Orientadas a solventar las necesidades en cuanto a equipos de laboratorio previamente expuestas existen empresas como QUANSER, ECP (Educational Control Products), Elwe Technic, Leybold: LD Didactic, Alecop, entre otras, dedicadas desde hace muchos años al desarrollo de equipos de laboratorio para la enseñanza de ingeniería, algunas de ellas dedicadas exclusivamente al desarrollo de equipos de laboratorio de sistemas de control, o con departamentos especializados para este fin. Sin embargo, los productos ofrecidos por dichas empresas son normalmente, debido a todo el proceso de depuración, de muy alto costo.

En otras ocasiones, a parte del costo, los equipos que se ofrecen son cerrados, en el sentido en el que solamente aceptan accesorios del fabricante; desde fuentes de alimentación, pasando por sistemas de adquisición de datos, software, etc., que incrementan todavía más los costos del equipo. De manera adicional, en un 70% u 80% estas empresas ofrecen equipos más orientados a la investigación en el campo de la teoría de control que a la enseñanza, dado que en general se ofrecen equipos con dinámicas complejas y no lineales, que hacen difícil la labor de enseñanza de conceptos básicos.

Debido a la escasez de equipos de laboratorio para la enseñanza de conceptos básicos de control en ingeniería, el desarrollo de prototipos para ser usados en el laboratorio de control ha sido una preocupación constante desde hace varios años, a nivel mundial. En particular, el sistema de motor DC ha recibido especial atención, con cientos de publicaciones asociadas al uso de este tipo de sistemas en el aprendizaje de conceptos asociados al análisis y control de sistemas dinámicos. El interés particular que el motor DC ha tenido constantemente en la comunidad de control se debe a su uso típico como actuador en una

amplia variedad importante de sistemas. Los trabajos respecto a prácticas de laboratorio utilizando el motor DC se remontan a la década de los 80's. Entre los primeros trabajos encontramos por ejemplo el realizado por Hagan et al. (1984), donde, con la tecnología disponible en la época, conectando un motor DC a un micro-computador a través de un sistema de adquisición de datos y un driver de potencia se presentan los primeros análisis de respuesta al escalón, respuesta en frecuencia y análisis del lugar geométrico de las raíces. Desde entonces se pueden encontrar cientos e incluso miles de publicaciones asociadas a, no solo prácticas de laboratorio, sino al control del motor DC en general, el motor DC como parte de sistemas muy clásicos en control como el péndulo invertido en múltiples variaciones, sistemas bola y viga, aeropéndulos, etc.

En la época reciente, encontramos la implementación de una plataforma didáctica de bajo costo para el reforzamiento de conceptos de control en tiempo discreto, basado en un microcontrolador Arduino Due, desarrollado por Cabré et al. (2021). También encontramos el desarrollo de experimentos sobre un sistema de motor DC para afianzar los conocimientos del curso básico de control, desarrollado por Hypiúsová et al. (2022), donde con la ayuda de un microcontrolador Arduino UNO se logra comunicación con un computador base que dispone del software Matlab® con el cual se desarrolla toda la experimentación sobre el motor; la gran desventaja de este trabajo es que no siempre se dispone de licencia de Matlab® para apoyarnos sobre dicho software. Entre los prototipos más recientes encontramos el desarrollado por Bhatta et al. (2023) que, aunque está orientado a un prototipo de bajo costo, utiliza hardware de adquisición de datos compatible con el software LabVIEW® de National Instruments, lo cual incrementa enormemente los costos del sistema desarrollado.

Vale la pena mencionar que al interior de la Universidad Distrital también se han desarrollado trabajos asociados al desarrollo de prototipos de sistemas de motor DC, como el desarrollado por Cuero Ortega (2018), donde se desarrolla un prototipo para la identificación y el control de un motor DC y se muestra su conexión con un computador a través de una interfaz gráfica desarrollada también por el autor. Así mismo, al interior del grupo de Investigación, Desarrollo y Aplicaciones en Señales – IDEAS – de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Lo anterior puede ser evidenciado por los trabajos en los que se han desarrollado diversos prototipos de sistemas dinámicos basados en motores DC, que ha su vez se han controlado, como, por ejemplo: un prototipo de péndulo de Furuta

desarrollado por Barbosa et. al. (2011), un prototipo de helicóptero de dos grados de libertad desarrollado por Camacho et. al (2012), un prototipo de péndulo invertido de dos ruedas desarrollado por Morales et. Al. (2012), y un prototipo de sistema plato y bola desarrollado por Reyes et. al. (2016).

Así mismo, dentro del grupo de investigación se han desarrollado trabajos orientados a la enseñanza de conceptos básicos de control en ingeniería utilizando diversos sistemas, como, por ejemplo: sistemas térmicos de bajo costo desarrollados por Ovalle y Cómbita (2014), un sistema de péndulo invertido de trayectoria circular desarrollado por Duquino (2015), levitadores neumáticos desarrollados por Ovalle y Cómbita (2019), sistemas bola y viga desarrollado por Díaz et. al (2019), y aeropéndulos de bajo costo desarrollados por Ovalle y Cómbita (2021). Algunos de estos prototipos se desarrollaron en el marco del proyecto de investigación titulado “*Diseño e Implementación de Plantas para la Enseñanza de Conceptos de Control en Ingeniería*”, el cual fue financiado por el Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”.

Sin embargo, hasta ahora no se ha trabajado con el sistema de posición y velocidad de un motor DC, que, como se ha mencionado, por años ha sido un sistema ampliamente utilizado en el estudio del análisis y control de sistemas dinámicos, y del cual existen sistemas comerciales muy conocidos. Justamente, orientado al diseño e implementación de este tipo de sistemas está orientado este artículo.

El interés en el desarrollo de prototipos para la enseñanza de conceptos de control en ingeniería radica en varios factores:

- Los estudiantes no alcanzan a percibir de manera real los alcances que la teoría de control tiene cuando solo dedican su tiempo a cálculos y simulaciones y quedan con la idea de que probablemente todo lo que se les enseña no tiene aplicación real.
- Pese a que existen en la actualidad equipos de laboratorio de sistemas de control, la gran mayoría de estos están orientados a la fase de investigación en control y no a la de enseñanza básica, que es donde en realidad se puede motivar y crear interés en el estudiante. Adicionalmente, los equipos que están orientados a la enseñanza de conceptos básicos de control, como lo es el sistema del motor DC, tienen precios realmente elevados.

- Es ampliamente sabido que la experimentación es una de las formas más eficientes para fijar conocimientos.

Es así como en el laboratorio de los cursos de Control I (Control Clásico) y Control II (Control Digital), del Proyecto Curricular de Ingeniería Electrónica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, los estudiantes han venido implementando sistemas caseros de velocidad de un motor DC y temperatura, como el presentado por Ovalle y Cómbita (2014), con el fin de desarrollar prácticas en las que se puedan evidenciar los conceptos de los que se habla en la teoría. Sin embargo, las implementaciones caseras de los estudiantes tienen el problema de que, debido a la falta de tiempo y presupuesto, la parte física o la parte electrónica no funcionan como ellos las diseñaron, o no funcionan durante el tiempo necesario; lo cual genera pérdidas de dinero, tiempo y esfuerzo para mejorar el sistema implementado, con el cual se deben rehacer las prácticas orientadas a la consecución del modelo del sistema para poder hacer de manera adecuada el proceso de diseño.

Este artículo muestra los resultados parciales del proyecto de investigación mencionado previamente, donde se desarrolla un prototipo de sistema para la enseñanza de conceptos de control en ingeniería que consiste en un sistema para el control de la velocidad o posición de un motor DC. Inicialmente, se detallan en el artículo los requerimientos del prototipo de sistema de motor DC, necesarios para tomar decisiones respecto al diseño y posterior implementación del mismo. Posteriormente, se detallan cada una de las etapas de diseño electrónico del prototipo, así como el diseño de la parte física, la tarjeta de circuito impreso definitiva, así como la estructura esperada y la estructura real del prototipo. Luego del diseño, se implementa el prototipo y se verifica que su comportamiento esté de acuerdo con la dinámica que este tipo de sistemas tendría, a partir de un análisis eléctrico, mecánico y electromecánico. Una vez garantizamos que el prototipo tiene el comportamiento adecuado, se propone una serie de prácticas de laboratorio, cada una de ellas orientada a hacer énfasis en un tema en particular de la teoría de control clásica. Finalmente, se detallan algunas conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros relacionados.

I. REQUERIMIENTOS DEL PROTOTIPO

Dado que se busca construir un prototipo para la enseñanza de conceptos de control en ingeniería, se decidió que el prototipo debe tener una entrada de voltaje analógica y dos salidas de voltaje, también analógicas, una que proporcione información de la velocidad

del motor y la otra respecto a la posición angular del mismo. No es necesario que las dos salidas estén activadas simultáneamente, por lo que será recomendable que el sistema cuente con un selector que indique cuál de las salidas está activada. La razón por la cual la naturaleza de la entrada y salidas del sistema sean analógicas es permitir el trabajo tanto con controladores analógicos como digitales.

Para el trabajo con estos últimos solo hará falta la comunicación con el sistema a través de cualquier dispositivo digital programable y un acondicionamiento de señal. También se definió que el prototipo tendrá su propia fuente de alimentación que, al tratarse de un sistema que permita controlar la posición o la velocidad de un motor DC (variables que pueden tomar valores tanto positivos como negativos), será una fuente dual de $\pm 12V$. Lo cual limitará tanto la entrada como las salidas del sistema a un rango comprendido entre los $\pm 10V$, teniendo en cuenta los voltajes de saturación de los amplificadores operacionales que estarán inmersos en la implementación.

Como en cualquier sistema de control, pese a que lo que se quiere controlar es el comportamiento del motor DC (ya sea en cuanto a su posición o su velocidad), para esto es necesario construir dos etapas: por un lado, la etapa de potencia, la cual a partir de una fuente fija, que proporcione suficiente corriente para mover el motor, permita variar la velocidad del mismo, a partir de un voltaje proveniente de un elemento con baja corriente de salida (como el que tendríamos a la salida de un amplificador operacional); por otro lado, para poder controlar alguna de las variables es muy importante tener información de las mismas, por lo que es necesario diseñar una etapa de sensado, de forma que tengamos disponible información de la posición o velocidad del motor, que se podrá utilizar para el propósito de control, o simplemente para analizar el comportamiento del sistema en lazo abierto.

De manera adicional, dado que se busca implementar un prototipo que en el futuro se pueda replicar para que los estudiantes lo utilicen en sus prácticas de laboratorio, es indispensable construirle etapas de protección tanto en la entrada como en las salidas, para que no sea tan susceptible a daños por el uso fuerte por parte de los estudiantes. Así mismo, dado que todas las etapas deberán estar comunicadas entre sí y en algunos casos incluir cierta lógica para funcionar, el dispositivo encargado de que el funcionamiento del sistema sea el adecuado será un microcontrolador programado para tal efecto. Finalmente, el prototipo deberá estar presentado de forma adecuada para su propósito, de forma que los

estudiantes no tengan acceso a las partes electrónicas ni mecánicas, con el fin de que, por un lado, no les genere peligro su manipulación y, por el otro, que no sea fácil hacer alguna modificación de las características del mismo.

II. DISEÑO ELECTRONICO

A continuación, se detalla el diseño electrónico del prototipo, incluyendo la etapa de potencia, etapas de acondicionamiento de señal, el funcionamiento del sensor, la lógica de programación del microcontrolador que interpreta las señales del sensor y los circuitos de protección.

Diseño de la etapa de potencia

Para el diseño de esta etapa, se requiere cumplir con múltiples especificaciones tales como funcionamiento para niveles de voltaje bipolares en un rango de entre -10 V y $+10\text{ V}$, y una corriente constante para la alimentación del motor. Dadas estas condiciones se implementa una etapa de potencia push–pull, Savant et. al (1992), con un arreglo de transistores Darlington complementarios TIP 127 y TIP 122 en región activa, que soportan la corriente nominal del motor sin problema. Además, se utiliza una etapa de pre-amplificación de corriente también en configuración Darlington con transistores 2N3906 y 2N3904.

El punto de operación de la etapa push–pull está manejado por un circuito seguidor de voltaje implementado con un amplificador operacional LF353, y el voltaje de entrada del seguidor proviene de un atenuador resistivo que reduce el potencial de entrada de la planta a la mitad, el circuito implementado se muestra en la Figura . La etapa de pre-amplificación de corriente en configuración Darlington se implementa para asegurar la corriente de funcionamiento del motor que se encuentra entre 200 mA y 800 mA con una corriente de entrada muy baja suministrada por el LF353, típicamente entre 2 mA a 10 mA.

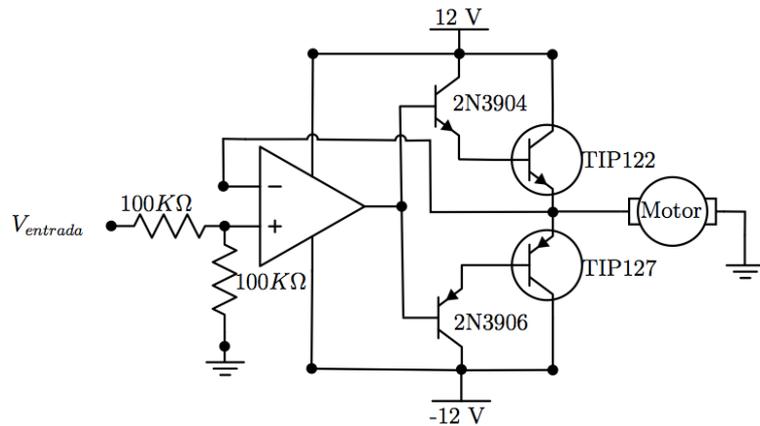


Figura 1. Circuito de Potencia.

Diseño de la etapa de acondicionamiento y lectura del encoder

Inicialmente, para el diseño de esta etapa se tienen en cuenta las características que el motor y el encoder manejan. El motor es marca Pittman, referencia 6214, a 12 V nominales, con una corriente pico máxima de 3 A, con voltaje y torque nominales, pero con una corriente de trabajo típica de entre 200 mA y 800 mA nominales, con una corriente pico máxima, el motor se muestra en la Figura 2, la conexión de pines al conector del motor se muestra en la Figura 3, y la distribución de pines del conector del motor se muestran en la Tabla 1.



Figura 2. Motor DC Pittman 6214 con encoder.

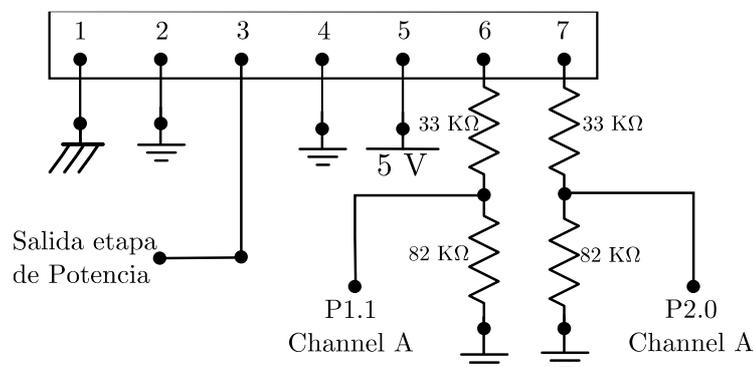


Figura 3. Diagrama de conexión al conector del motor.

Tabla 1. Diagrama de pines del conector del motor.

Pin 1 (café)	Pin 2	Pin 3	Pin 4	Pin 5	Pin 6	Pin 7
Tierra motor	Referencia motor (-)	Motor (+)	Referencia encoder	Vcc (5V)	Canal A	Canal B

Funcionamiento del encoder: El encoder del motor tiene dos canales de salida (Channel A y Channel B) en cuadratura (véase Figura 4), con una resolución de 256 pulsos por vuelta. Si se toman tanto flancos de subida como flancos de bajada, la resolución del encoder sería de 512 pulsos por vuelta, y si se toma así mismo el otro canal en cuadratura la resolución sería de 1024 para una vuelta, es decir el encoder utilizado de la mejor manera tendría una resolución de 0.35156° . El sentido de giro se puede conocer a partir de los flancos y las posiciones de ambos canales, a partir de las señales mostradas en la Figura 4, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Identificación de sentido de giro en el encoder.

Canal	Flanco	Canal	Nivel	Sentido de giro
A	Subida	B	Alto	Anti – Horario
A	Bajada	B	Alto	Horario
A	Subida	B	Bajo	Horario
A	Bajada	B	Bajo	Anti – Horario
B	Subida	A	Alto	Horario
B	Bajada	A	Alto	Anti – Horario
B	Subida	A	Bajo	Horario
B	Bajada	A	Bajo	Anti – Horario

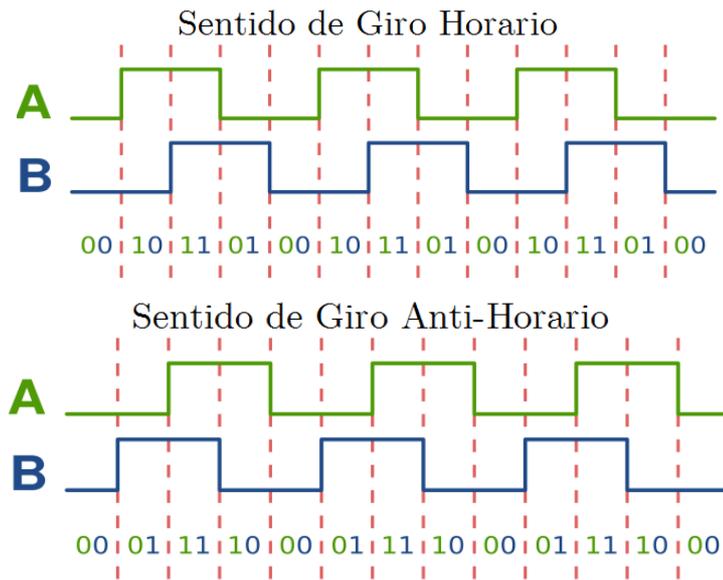


Figura 4. Señales del encoder.

Señal de posición a partir del encoder: La posición del motor se puede tomar del encoder, contando el número de flancos tanto de subida como de bajada de los Canales A y B, con una resolución de 0.35156° para 1024 posibles flancos entre los dos canales, para una vuelta completa del motor. Este conteo puede ser incremental o decremental, dependiendo de la dirección del motor. El problema principal al tratar de encontrar la posición a partir de un encoder incremental es que éste por sí solo no puede iniciar la posición de referencia, por lo cual no se puede tener una posición de referencia (0°).

Por esta razón, se implementó un circuito foto-transmisor y foto-receptor, que enviará una señal cada vez que el motor pasa por un punto de referencia fijo. Cada vez que se cambia entre el modo de funcionamiento entre velocidad y posición, el sistema tardará la duración de una vuelta del motor, que es lo que le toma establecer la referencia de posición, para dar información de la posición angular real del indicador de posición. El circuito se muestra en la Figura 5.

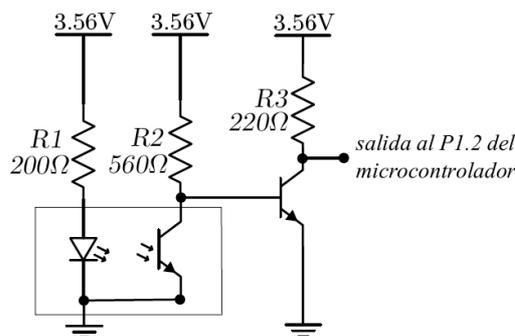


Figura 5. Circuito fotodiodo y fototransistor de detección de vuelta, para punto de referencia.

Señal de velocidad a partir del encoder: Para tomar la velocidad del motor a partir del encoder, se toma una información distinta del encoder de la que se requiere para la posición, esta información es la duración del ancho del pulso del encoder, este tiempo es inversamente proporcional a la velocidad del motor, ya que, para una señal de periodo muy pequeño, la velocidad será alta, y por el contrario para un periodo muy largo la velocidad será baja. Debido a que cuando el motor no se encuentra en movimiento no existe señal del encoder, el módulo timer del microcontrolador se encarga de desbordar dicho tiempo, tomando un valor muy grande, que para el cálculo de la velocidad es aproximadamente cero. Dado que nuestro encoder tiene 256 pulsos por vuelta, la duración de un pulso será equivalente al tiempo que toma el motor en dar 1/256 de vuelta, al multiplicar este tiempo por 256 se tendría el tiempo que toma en dar una vuelta y el inverso de ese tiempo sería la velocidad del motor en revoluciones por unidad de tiempo.

Diseño del programa del microcontrolador

Para la lectura del encoder y la obtención de las señales de velocidad y posición, se utiliza un microcontrolador MSP430G2452 de Texas Instruments, el cual recibe dos señales de entrada del encoder (Channel A y Channel B), la señal del sensor de vuelta para definir la referencia de la posición angular, una señal para selección de modo de operación para la variable de salida ya sea velocidad o posición, dos salidas que indican el sentido de giro del motor, y tres señales de salida para el conversor digital análogo de 10 bits, las conexiones entre el microcontrolador y los demás elementos se muestran en la Tabla 3 y el circuito implementado se puede observar en la Figura 6. Para la detección de la posición se toman tanto las señales del Channel A como las del Channel B, se realiza un conteo de flancos de subida y bajada, y la posición se calcula como el número de flancos por la resolución (360/1024); para el reinicio de este conteo se toma el pulso originado cada vez que el motor de una vuelta. Para la detección de la velocidad solamente se hace uso del Channel A y el Timer del microcontrolador para medir el ancho del pulso, y el Channel B para determinar únicamente la dirección del motor, el diagrama de flujo del programa principal y las interrupciones se muestran en las Figuras 7, 8 y 9.

Tabla 3. Conexión de Pines MSP430G2452.

Pin	(E/S)	Señal	Descripción
-----	-------	-------	-------------

P1.0	Entrada	Modo de Operación	Señal de selección 0 Posición 1 Velocidad
P1.1	Entrada	Channel A	Señal en cuadratura con el Channel B del encoder
P1.2	Entrada	Pulso Vuelta	Señal de reinicio de posición por vuelta
P1.3	Salida	Sentido Horario	Señal que indica si el motor giró en sentido horario
P1.4	Salida	Sentido Anti-Horario	Señal que indica si el motor giró en sentido Anti-Horario
P2.0	Entrada	Channel B	Señal en cuadratura con el Channel A del encoder
P2.1	Salida	Salida Serial DAC	Señal serial de 14 bits con carga útil de 10 bits
P2.2	Salida	Sincronismo DAC	Señal de sincronización para la transferencia de datos del DAC al microcontrolador
P2.3	Salida	Habilitación DAC	Pulso que permite que en el DAC los datos de entrada se conviertan y se vean en a la salida

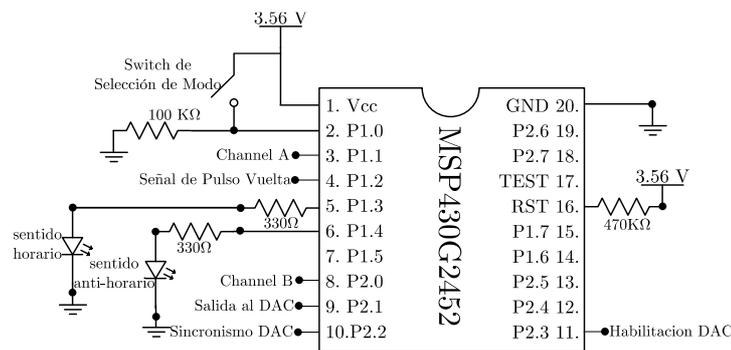


Figura 6. Diagrama de conexiones del microcontrolador.

Diseño de la etapa de conversión digital a analógica

Para la implementación de la etapa de conversión digital analógica, se utilizó un integrado TLC5615, el cual es un circuito integrado DAC serial de 10 bits de resolución, este circuito integrado cuenta con una polarización sencilla de 0V a 5V, el cual también determina su rango de salida, el principio de funcionamiento del convertor se basa en el envío de bits seriales, a través del pin de entrada serial, para que el DAC reciba un bit, este debe estar en la entrada serial y por acción de un flanco de subida en la señal de sincronismo el bit es almacenado en el registro de desplazamiento del convertor, vale la pena mencionar que el convertor recibe 12 bits de entrada, de los cuales 10 bits son carga útil, y los 2 bits restantes son de relleno.

El programa inicialmente envía la carga útil, empezando por el bit más significativo del dato de salida en orden hasta el bit menos significativo, posteriormente se envían 2 bits cualquiera, para completar los 12 bits necesarios. Una vez se completa la transferencia, se coloca en alto la señal de habilitación, lo cual permite enviar los datos almacenados de forma serial al convertor y finalmente a la salida del DAC, el cual proporcionará una salida máxima de 5V para un dato de entrada equivalente a 1023.

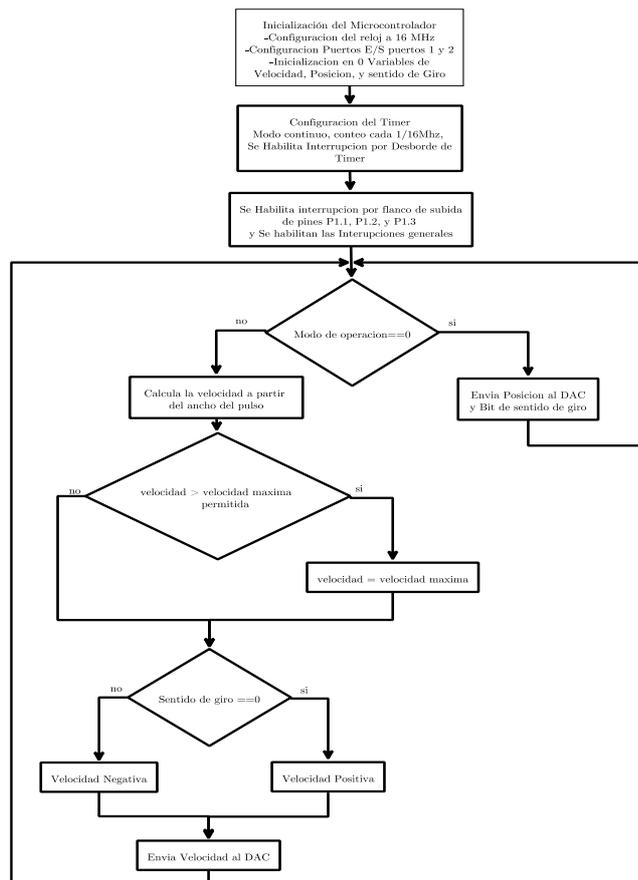


Figura 7. Diagrama de flujo principal.

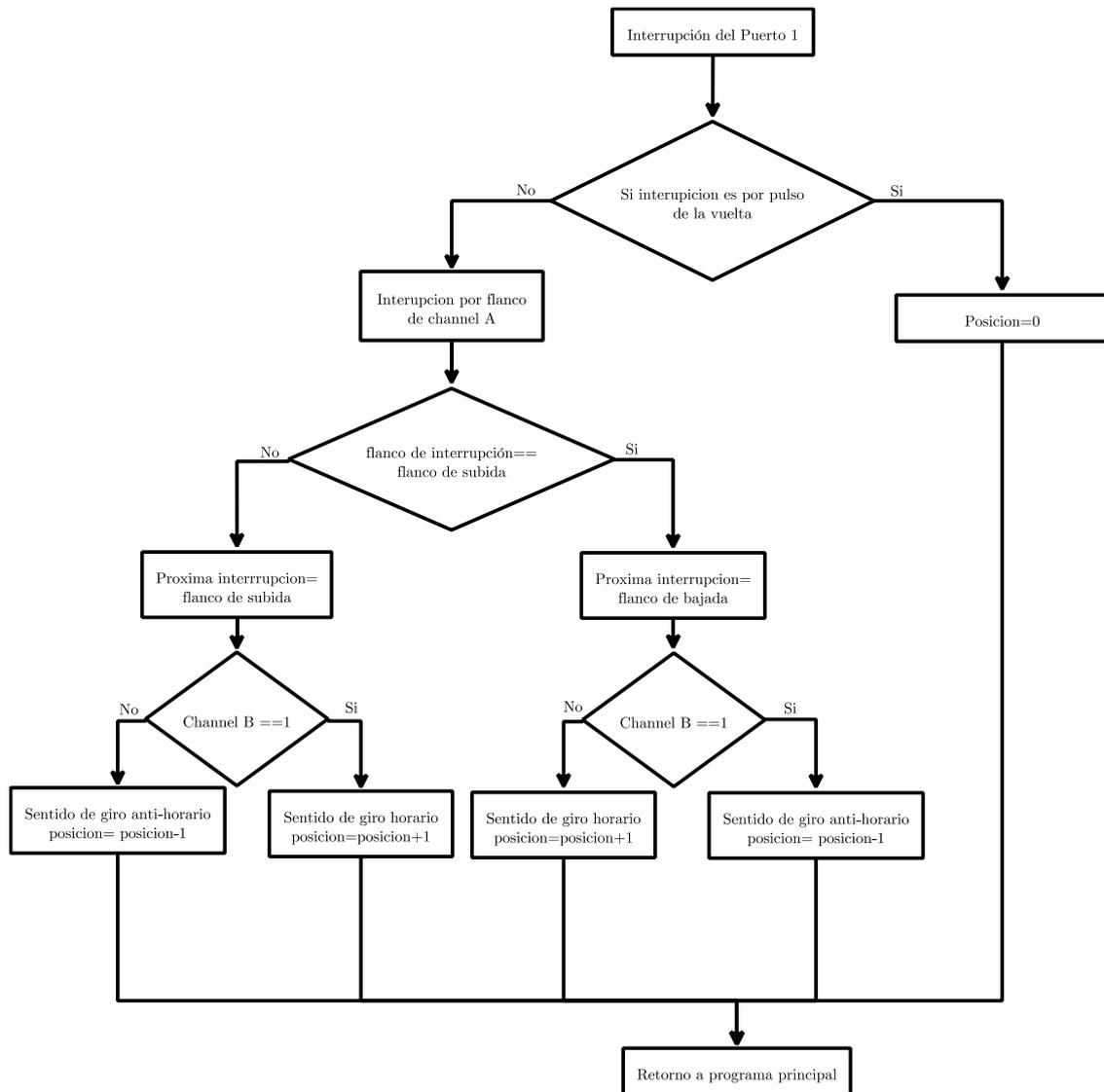


Figura 8. Diagrama de flujo para el puerto 1.

Diseño de la etapa de acondicionamiento de la señal de salida

Debido a que el convertor analógico digital tiene una salida en un rango de entre 0 V y 5 V, se requiere que el rango de la señal de salida sea entre -10 V y 10 V, la conversión está dada por la ecuación $V_o = 4V_i - 10V$, donde V_o es el voltaje de salida del acondicionamiento y V_i el voltaje de salida del DAC. Para implementar este acondicionamiento de señal se utiliza un amplificador operacional LF353 en configuración multientrada como se muestra en la Figura 10.

Diseño de Circuitos de protección

Para lograr un correcto funcionamiento del sistema y evitar el daño del circuito por errores humanos al momento de la conexión externa, ya sea por corto-circuitos o al exceder los rangos de voltaje o corriente permitidos, tanto a la entrada como a las salidas. Fue necesario implementar circuitos de protección para evitar el daño del sistema.

Circuito de Protección para la entrada al sistema: El único problema existente para la entrada del sistema, es que la señal se exceda los rangos de voltaje permitidos, para solucionar este problema, se requiere atenuar la señal de entrada de tal manera que para rangos de entre $-30V$ y $+30V$ puedan ser detectadas por un microcontrolador, que activará un relevo a través de un driver ULN2003 que aislará al circuito interno, si el usuario excede la entrada más allá de un rango de valores entre $-12V$ y $+12V$, si el valor de entrada es mayor que $+30 V$ o menor a $-30 V$ el microcontrolador podría dañarse y sería necesario su cambio. El circuito de protección se muestra en la Figura 11

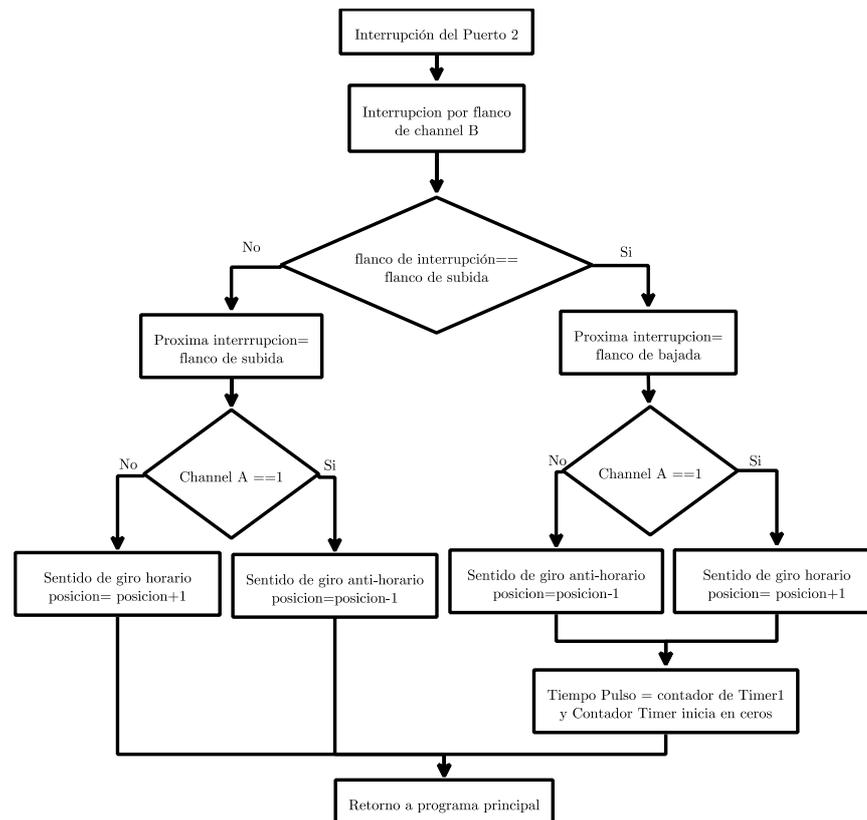


Figura 9. Diagrama de flujo para el puerto 2.

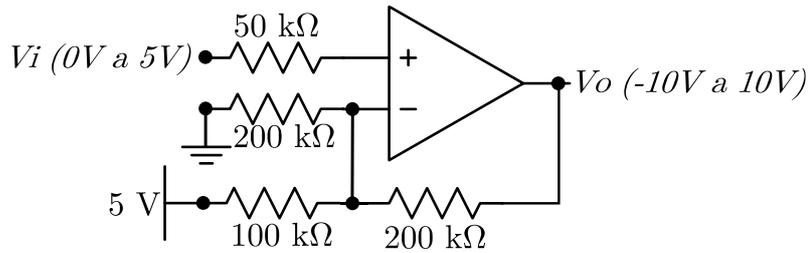


Figura 10. Circuito de acondicionamiento para la señal de salida.

Circuito de Protección para la salida del sistema: El sistema debe tener la capacidad de no sufrir problemas cuando el usuario coloque en corto alguna salida, es por ello que debe tener un circuito de protección que evite los daños originados por este tipo de errores. Para este circuito se cuenta inicialmente con un seguidor de potencia, en configuración push-pull, como el utilizado en la etapa de potencia del motor, este circuito evita que la corriente de salida del sistema sea entregada por un amplificador operacional, si no por un transistores TIP122 y TIP127, luego de esta etapa se encuentra el circuito basado en relevos con lógica de enclavamiento, que permite aislar la salida del circuito interno, de manera que si existe un corto entre las terminales de salida, ninguno de los componentes sufrirá daño. Para devolver el circuito a su estado anterior, es necesario que el usuario haga uso de un pulsador normalmente cerrado que devolverá al circuito a su estado anterior. El circuito de protección se muestra en la Figura 12.

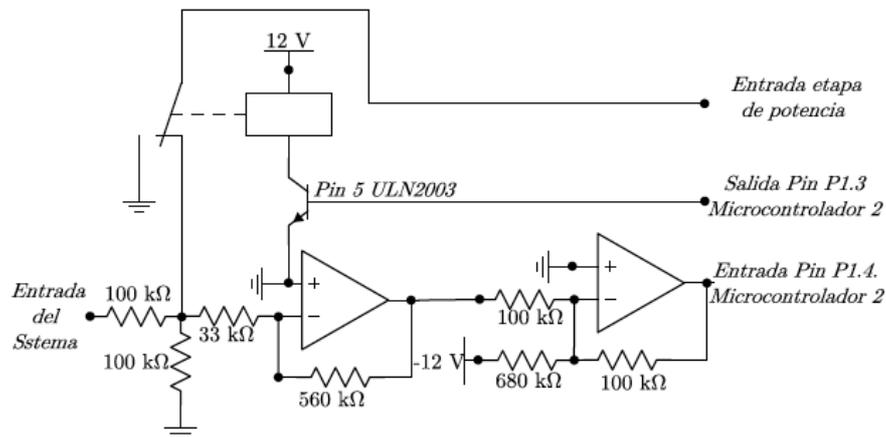


Figura 11. Circuito de protección en la entrada del sistema.

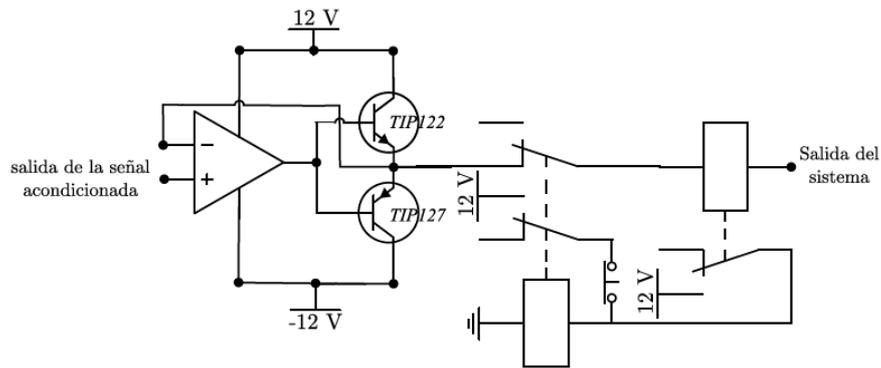


Figura 12. Circuito de protección en la salida del sistema.

III. PROTOTIPO IMPLEMENTADO

Luego de asegurarse de que todas las etapas funcionaran correctamente, se procedió a diseñar la tarjeta de circuito impreso (PCB, del inglés Printed Circuit Board) para la implementación definitiva, en la elaboración de este circuito impreso se utilizó el software Proteus. La PCB fue diseñada a doble capa con dimensiones de 13.3 cm x 8.8 cm, se utilizó antisolder azul, y tecnología through-hole para conectar caminos entre la capa inferior y la capa superior, el diseño de la PCB en su capa superior se muestra en la Figura 13.

Se diseñó una estructura en acrílico para que en su interior contuviera el motor DC sujetado a cierta posición, las fuentes de alimentación, la tarjeta de circuito impreso, los botones de encendido – apagado, selección de operación velocidad – posición, terminales de entrada y salida, y los diferentes indicadores de funcionamiento. El diseño de la estructura y la disposición de sus elementos internos se muestran en la Figura en el lado de la izquierda, mientras el sistema implementado se muestra en el lado de la derecha.

IV. VERIFICACION DEL FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

El modelo dinámico de un motor DC es ampliamente conocido y presentado en muchos libros de texto de Control, como en Ogata (2001). Para la función de transferencia entre la velocidad del motor, $\Omega(s)$, y el voltaje que se le aplica al mismo, $E_a(s)$, se tiene

$$\frac{\Omega(s)}{E_a(s)} = \frac{k_a}{(L_a s + R_a)(Js + B_m) + k_a k_b}, \quad (1)$$

donde k_a es la constante de torque del motor, k_b es la constante de la tensión contraelectromotriz inducida, R_a es la resistencia del circuito de armadura del motor, L_a

es la inductancia del circuito de armadura del motor, J es la inercia del motor, y B_m es la constante de fricción. De forma similar, la función de transferencia entre la posición del motor, $\theta(s)$, y el voltaje que se le aplica al mismo, sería igual a (1), pero adicionando un integrador, dado que la posición es la integral de la velocidad.

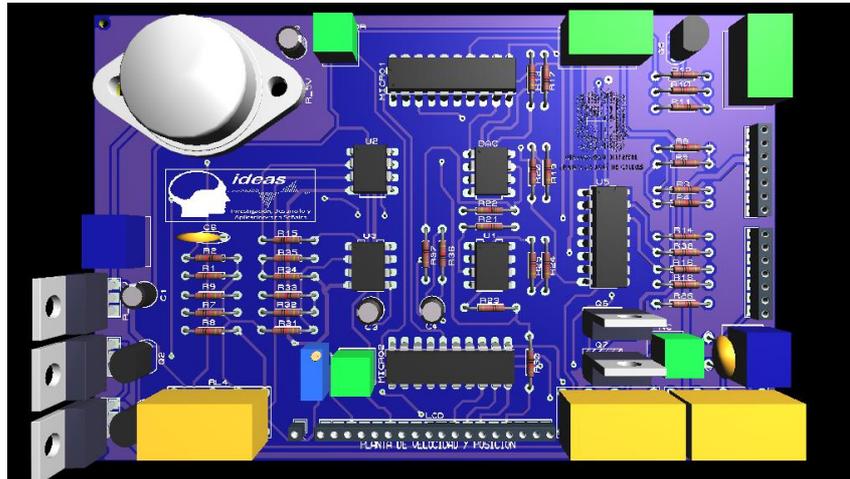


Figura 13. PCB diseñada para el sistema.

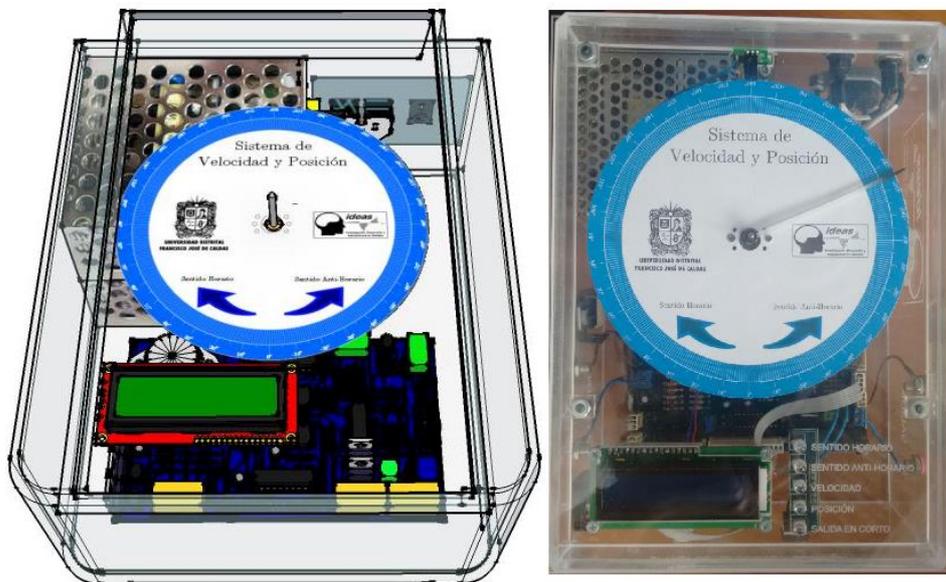


Figura 14. Sistema diseñado (izquierda) e implementado (derecha).

De acuerdo a lo anterior, para verificar el comportamiento del sistema, respecto a su salida de velocidad, se tendrá un comportamiento de segundo orden sobreamortiguado o de primer orden, en caso de que la dinámica de la parte eléctrica sea mucho más rápida que la mecánica, Chen (1993). Respecto a la salida de posición, el efecto dominante será el del integrador, por lo que se tendrá, que para una entrada constante la salida tenderá a ser una rampa, cuando el tiempo tiende a infinito. Estos comportamientos se evidencian en la Figura . Los resultados de la izquierda corresponden al comportamiento del sistema considerando la salida de velocidad y aplicando a los cero segundos un escalón de la amplitud que indica la leyenda, desde 0V. Los resultados de la derecha corresponden al comportamiento del sistema considerando la salida de posición y aplicando a los 25 ms un escalón de la amplitud que muestra la leyenda, desde 0V; allí es claro que luego de que el escalón es aplicado, hay un pequeño transitorio posterior al cual la señal tiende a ser una rampa cuya pendiente varía respecto al voltaje del escalón de entrada, las diferencias entre los puntos de inicio se deben a que el experimento se hizo para diferentes posiciones iniciales del motor, lo cual no modifica la dinámica del sistema. Efectivamente, el comportamiento del prototipo está acorde con lo que nos sugiere la teoría, por lo que se pueden sugerir algunas prácticas de laboratorio con el prototipo para afianzar algunos conceptos de control en ingeniería.

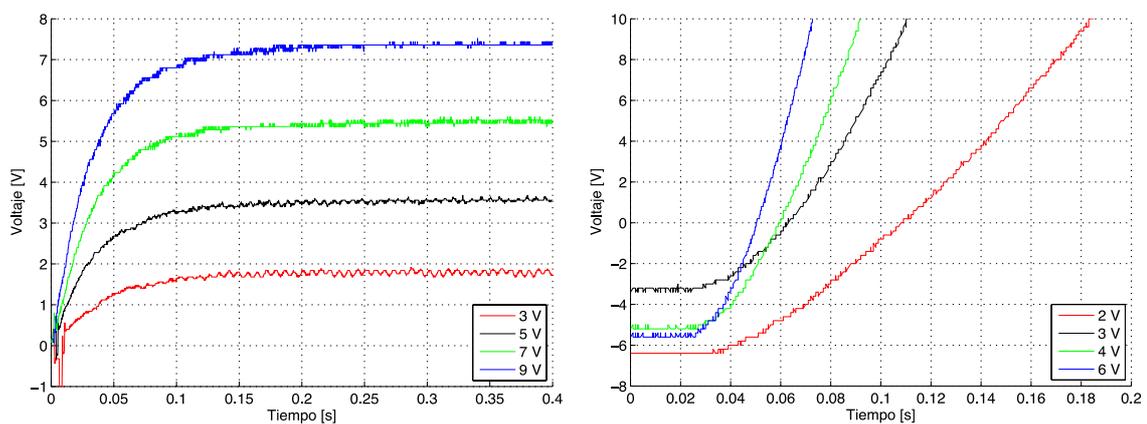


Figura 15. Respuesta del prototipo tomando la salida de velocidad (izquierda) y la salida de posición (derecha).

V. PRÁCTICAS DE LABORATORIO PROPUESTAS

Dado que el comportamiento dinámico del prototipo para velocidad y posición es bastante diferente, se puede abarcar una amplia gama de prácticas de laboratorio explotando las naturalezas dinámicas diferentes del sistema en cada salida. Se proponen las siguientes prácticas, aunque el trabajo con el prototipo no está limitado a estas específicamente:

1. Identificación del sistema utilizando la respuesta al escalón y la respuesta en frecuencia.

Para la salida del sistema de velocidad se puede explorar el proceso de identificación del sistema en lazo abierto, alimentando el sistema con una señal cuadrada de diferentes amplitudes con el fin de visualizar la dinámica del sistema, tal y como se observa en la Figura 15 (izquierda). A partir de ese tipo resultados se deben medir tanto la ganancia K como la constante de tiempo del sistema τ , donde el modelo del sistema de primer orden tiene la forma

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}. \quad (2)$$

En cuanto al proceso de identificación a través de la respuesta en frecuencia, lo que se busca es la construcción experimental del diagrama de Bode, con el fin de refinar el modelo del sistema. En este caso, tomando la salida de velocidad del sistema, es muy probable obtener un modelo ya no de primer orden como en (2), sino un modelo de segundo orden, que correspondería a la versión de (1). Lo anterior, debido a que al indagar por el comportamiento en frecuencia del sistema, se evidenciarán todas las dinámicas del mismo, sean lentas o rápidas.

El proceso de la construcción experimental de la respuesta en frecuencia simplemente consiste en alimentar el sistema con una señal sinusoidal y modificar su frecuencia. Sin embargo, dado que el sistema posee una zona muerta, la señal sinusoidal debe estar montada sobre un nivel DC, ojalá equivalente a la del punto de operación al cual se desea obtener el modelo del sistema. Suponiendo que se quiere hallar el modelo para un voltaje de entrada de alrededor de los 7V, se alimenta el sistema con una señal sinusoidal de amplitud 1 sobre 7VDC y frecuencia variable. Lo que se debe medir para la construcción

del diagrama de Bode es la frecuencia de la señal de entrada, la ganancia del sistema y el desfase de la salida respecto a la entrada, aumentando la frecuencia hasta que la ganancia disminuya y alcance un valor de aproximadamente 0.1 (-20dB).

2. *Control ON-OFF.*

El control ON-OFF es la primera aproximación al control de lazo cerrado. Su implementación se hace a través de un restador y un disparador de Schmitt, Coughlin, R. y Driscoll, F. (1994). El restador tendrá como entrada en la terminal positiva la señal de referencia del sistema y en la negativa la salida del sistema (sea en velocidad o posición), la salida del restador será lo que se conoce como la señal de error, que indica qué tan lejos o cerca se encuentra la salida del sistema respecto al valor deseado. El disparador de Schmitt es diseñado de forma tal que el sistema esté encendido mientras la señal de error sea mayor que V_{OL} y que se apague mientras la señal de error sea menor que $V_{OH} = -V_{OL}$. De esta forma, el ancho de la ventana de histéresis del disparador de Schmitt será de $2V_{OH}$ y deberá estar centrada en $0V$, lo que genera que la señal de salida del sistema será, hasta la primera conmutación del sistema de encendido a apagado, una señal típica de primer orden y posteriormente evidenciará un comportamiento similar al de descarga y carga de condensador con una señal que oscilará alrededor del voltaje de referencia.

3. *Control proporcional y construcción experimental del lugar geométrico de las raíces para valores de la acción proporcional.*

El control proporcional es la primera estrategia de control lineal que el estudiante explorará, que se aplica para un sistema de realimentación unitaria, en el cual se construye la señal de error como en el caso del control ON – OFF, con un restador. En un sistema de primer orden, cuando se considera la salida de velocidad, el estudiante debe evidenciar que al aumentar el valor de la acción de control proporcional se disminuyen tanto el tiempo de establecimiento como el error en estado estacionario del sistema, dado que el único polo de lazo cerrado se hace más grande conforme se aumenta la acción de control proporcional.

En el caso de sistemas de segundo orden, comportamiento del sistema cuando se considera su salida de posición, el estudiante debe evidenciar para valores pequeños de la acción proporcional el sistema se comporta como un sistema sobreamortiguado, pero con error de posición distinto de cero debido a la zona muerta del motor. A medida que se aumenta la acción proporcional se aumenta el sobrepaso máximo del sistema. Pero el

tiempo de establecimiento no sufre muchas alteraciones para valores de ganancia para los cuales el sobrepaso máximo de la señal de salida sea mayor al 10%.

La construcción del lugar geométrico de las raíces para cada sistema consiste en encontrar un modelo que aproxime la respuesta del mismo a diferentes valores de la acción proporcional y graficar en el plano complejo la ubicación de los polos del modelo para cada valor de K .

4. *Control integral.*

La acción de control integral evidenciará la propiedad fundamental de eliminar el error de posición en el sistema para ambas salidas del sistema. En el caso de la salida de velocidad, el estudiante podrá evidenciar que a medida que se aumenta la magnitud de la acción integral se empezará a observar y aumentar el sobrepaso máximo en la salida. En el caso de tomar la salida de posición del sistema, el usar una acción de control integral no tendrá ningún sentido, ya que esta junto con la zona muerta del motor hacen que el sistema sea siempre inestable.

5) *Diseño e implementación de controladores por el método del lugar geométrico de las raíces.*

Para controlar la velocidad del prototipo se puede diseñar fácilmente un PI o un PID, mientras que para controlar la posición se puede utilizar un PD o PID, en ambos casos siguiendo la metodología descrita en Ogata (2001) o Nise (2011). Se deben definir claramente los requerimientos para el sistema controlado.

6) *Diseño e implementación de controladores por el método de la respuesta en frecuencia.*

El procedimiento de diseño en el dominio de la frecuencia recomendado es el detallado en Chen (1993). Sin embargo, es muy difícil tener claro cuáles son las implicaciones temporales del diseño en el dominio de la frecuencia, dado que estamos interesados en el comportamiento del sistema controlado a una entrada escalón. En ese sentido, se pueden definir criterios como error de posición, tiempo de establecimiento y máximo sobrepaso, utilizando la equivalencia entre criterios del tiempo y la frecuencia

presentados en Nise (2011). De manera adicional, se puede intentar el diseño de controladores PI, PD y PID como se propone en Phillips (1999).

VI. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se desarrolló un prototipo para el control de posición o velocidad de un motor DC, cuyas características facilitan la enseñanza de conceptos básicos de sistemas de control en ingeniería. Los criterios de diseño y las especificaciones finales del prototipo son presentados, detallando la etapa de potencia, los acondicionamientos de señal, los circuitos de protección y la lógica de programación del microcontrolador. A partir de dicho prototipo se proponen un conjunto de prácticas de laboratorio que apoyan el proceso de aprendizaje de algunos conceptos básicos de la teoría de sistemas de control, haciendo énfasis en los comportamientos que debe encontrar el estudiante con el fin de lograr los objetivos de cada práctica.

Aunque en este trabajo se hizo énfasis en los conceptos de control de tiempo continuo que se pueden reforzar haciendo uso del prototipo, éste puede ser utilizado para el desarrollo de un conjunto de prácticas que ayuden en el afianzamiento de conceptos básicos de los sistemas de control de tiempo discreto, como son la discretización de controladores analógicos, el efecto del periodo de muestreo en dicha discretización y el diseño e implementación de controladores digitales.

Note que cualquier persona puede tomar los circuitos aquí presentados e implementarlos, para tener su propio sistema de velocidad y posición de motor DC. Si se desean bajar los costos, se puede obviar el paso de hacer la PCB, e incluso, a riesgo propio, no utilizar los circuitos de protección. Las lógicas de programación que se presentan en las Figuras 8, 9 y 10, pueden ser replicadas en el dispositivo digital de la elección de quien quiera replicar el sistema, sin mayores inconvenientes.

VII. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Comisión de Estudios No. 015 de 2014 de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y por la Convocatoria 08-2013 del Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

VIII. BIBLIOGRAFIA

- Astrom, K. y Lundh, M. (1992). Lund control program combines theory with hands-on experience. *IEEE Control Systems Magazine*, 12(3):22–30.
- Balchen, J., Hylykken, M., y Tysson, A. (1981). The need for better laboratory experiments in control engineering education. *IFAC Proceedings Volumes*, 14(2):3363–3368. 8th IFAC World Congress on Control Science y Technology for the Progress of Society, Kyoto, Japan, 24-28 August 1981.
- Barbosa, D. I., Castillo, J. S., y Combita, L. F. (2011). Rotary inverted pendulum with real time control. *IX Latin American Robotics Symposium y IEEE Colombian Conference on Automatic Control*, 2011 IEEE, pages 1–6.
- Bhatta, B., Salim, G., Borra, V., y Li, F. X. (2023). Low-cost dc motor control system experiments for engineering students. *2023 ASEE Annual Conference & Exposition*, Maryland, USA.
- Cabré, T. P., Vela, A. S., Ribes, M. T., Blanc, J. M., Pablo, J. R., y Sancho, F. C. (2021). Didactic platform for dc motor speed y position control in z-plane. *ISA Transactions*, 118:116–132.
- Camacho, K. M., Burgos, J. A., y Combita, L. F. (2012). Construction y modeling of a two-degree-of-freedom helicopter. *2012 Brazilian Robotics Symposium y Latin American Robotics Symposium*, pages 150–155.
- Chen, C. (1993). *Analog y Digital Control System Design: Transfer-function, State-space, y Algebraic Methods*. Holt, Rinehart y Winston Series in Electrical Engineering. Saunders College Pub.
- Cook, J. A. y Samad, T. (2009). Controls curriculum survey. *IEEE Control Systems Society Outreach Task Force Report*.
- Coughlin, R. y Driscoll, F. (1994). *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
- Cuero Ortega, J. D. (2018). Prototipo para modelar y controlar un motor dc. *Visión electrónica*, 12(1):65–72.

- Diaz, D. C., Garcia, J. E., y Ovalle, D. M. (2019). Classic continuous-time control methods applied to the ball y beam system. *2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, pages 1–6.
- Duquino Sánchez, A. P. (2015). *Diseño e implementación de un sistema de péndulo invertido para la enseñanza de conceptos de control en ingeniería, a través del método de variables de estado* [Tesis de Pregrado]. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”.
- Feliachi, A. (1991). Control systems curriculum national survey. *1991 American Control Conference*, pages 298–303.
- Hagan et al. (1984) Hagan, M., Hernyez, C., Yeung, W.-C., y Hozhabri, M. (1984). A control systems laboratory with microcomputer supervision. *IEEE Control Systems Magazine*, 4(1):15–19.
- Hypiusová, M., Minár, M., y Rosinová, D. (2022). Basic control course with dc motor. *2022 Cybernetics Informatics (KI)*, pages 1–6.
- Ma, J. y Nickerson, J. V. (2006). Hands-on, simulated, y remote laboratories: A comparative literature review. *ACM Comput. Surv.*, 38(3):7–es.
- Morales, G. Y., Plazas, S. A., y Combita, L. F. (2012). Implementation y closed loop identification of a two wheeled inverted pendulum mobile robot. *2012 Brazilian Robotics Symposium y Latin American Robotics Symposium*, pages 97–102.
- Mountain, J. R. y Hibbeler, L. C. (2006). Hys-on process control experiences: A curriculum integration experiment. *Proceedings. Frontiers in Education. 36th Annual Conference*, pages 7–12.
- Nise, N. (2011). *Control Systems Engineering* (6th ed.). John Wiley & Sons, Incorporated.
- Ogata, K. (2001). *Modern Control Engineering* (4th ed.). Prentice Hall PTR.
- Ovalle M, D. M. y Combita A., L. F. (2014). Teaching basic control concepts with a home-made thermal system. *2014 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, pages 739–744.
- Ovalle, D. M. y Combita, L. F. (2019). Engaging control systems students with a pneumatic levitator project. *2019 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, pages 1093–1099.

- Ovalle M., D. M. y Combita A., L. F. (2021). On the implementation of low-cost home-made aeropendulum prototypes for improving understanding of dynamical systems concepts. *2021 IEEE 5th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, pages 297–302.
- Phillips, C. L. y Harbor, R. D. (1999). *Feedback control systems* (4th ed.). Prentice-Hall, Inc.
- Reyes Ortiz, Juan Felipe Ochoa Polanía, D. (2016). *Diseño e Implementación de un Sistema de Balanceo de una Bola Sobre un Plano* [Tesis de Pregrado]. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”.
- Rossiter, J., Zakova, K., Huba, M., Serbezov, A., y Visioli, A. (2019). A first course in feedback, dynamics y control: findings from an online pilot survey for the ifac community. *IFAC-PapersOnLine*, 52(9):298–305. 12th IFAC Symposium on Advances in Control Education ACE 2019.
- Rossiter, A., Serbezov, A., Visioli, A., Záková, K., y Huba, M. (2020). A survey of international views on a first course in systems y control for engineering undergraduates. *IFAC Journal of Systems y Control*, 13:100092.
- Savant, C., Roden, M., Carpenter, G., Sánchez, G., and Téllez, J. (1992). *Diseño electrónico: circuitos y sistemas*. Addison Wesley Logman.
- Vargas, H., Heradio, R., Farias, G., Lei, Z., and Torre, L. d. l. (2024). A pragmatic framework for assessing learning outcomes in competency-based courses. *IEEE Transactions on Education*, pages 1–10.

Publicación Facultad de Ingeniería y Red de Investigaciones de Tecnología Avanzada –
RITA

REVISTA

TIA