

Control de velocidad en módulo didáctico para control de motor DC.

Amy Alexandra Noriega Quintero¹
 José Leonardo Monroy Hernández¹
 Diego Ricardo Páez Ardila¹

RESUMEN: En este artículo se presenta el diseño e implementación de un controlador de velocidad aplicado a un módulo didáctico para control de un motor DC (MCM) construido por estudiantes en el 2019 con el fin de realizar prácticas en asignaturas de control de la facultad de Ingeniería Mecatrónica. El procedimiento se desarrolló desde el modelado matemático hasta la prueba del controlador diseñado según los modelos obtenidos para corroborar parámetros de respuesta y especificaciones del control. Este desarrollo busca demostrar el alcance que tiene el MCM para implementarlo en las prácticas del plan de estudios de Ingeniería Mecatrónica en la universidad Santo Tomás.

PALABRAS CLAVE: Control, Velocidad, Motor DC, Didáctico, Modelado.

ABSTRACT: This article presents the design and implementation of a speed controller applied to a didactic DC motor control module (MCM) built by students in 2019 in order to carry out internships in control subjects of the faculty of Mechatronics Engineering. The procedure was developed from mathematical modeling to testing the controller designed according to the models obtained to corroborate response parameters and control specifications. This development seeks to demonstrate the scope of the MCM to implement it in the practices of the Mechatronics Engineering curriculum at Santo Tomás University.

KEYWORDS: Control, Speed, DC Motor, Didactic, Modeling.

I. INTRODUCCIÓN

El avance de la automatización ha tenido un impacto en el desarrollo de la industria en todo el mundo durante las últimas décadas, razón por la cual las grandes empresas han automatizado los procesos de desarrollo de productos. Estos desarrollos llevaron a la necesidad de sistemas de control de instrumentos en diversos procesos de producción, los más utilizados en la industria son los motores de corriente continua, ya que son más fáciles de mantener y proporcionan un control de velocidad superior al tiempo que eliminan los problemas causados por los efectos armónicos, también tienen un par de arranque más alto que los motores de AC [1]. Por esta razón resulta pertinente ejercer un adecuado control y estudio del comportamiento de un motor ante distintas condiciones.

Por otra parte, la carrera de ingeniería mecatrónica dentro de su plan de estudios estipula que las asignaturas deben tener un componente práctico sin embargo se limitan a montajes en protoboards y proyectos de aula que, aunque tienen un nivel de dificultad destacable,

normalmente no se trabajaran en un ambiente laboral. Por esta razón es de vital importancia que los estudiantes de mecatrónica y afines con énfasis en la automatización industrial, desarrollen las respectivas competencias según el concepto de Wagner [2]. En pocas palabras con prácticas apoyadas en módulos didácticos se abre la posibilidad de que los usuarios de las mismas apliquen todos sus conocimientos en asignaturas relacionadas o diseñar guías para que los estudiantes puedan aterrizar conceptos.

El MCM es un dispositivo encargado de gestionar las características relacionadas con el funcionamiento del motor y recoger la información de los distintos sensores que lo integran, lo que es necesario para verificar que el motor está funcionando como el usuario lo requiere[3]. El módulo construido por estudiantes de Ingeniería Mecatrónica se usó para el desarrollo de este artículo ya que es compacto y el diseño permite al usuario aplicar conocimientos adquiridos en las asignaturas del plan de estudio, desde modelarlo hasta implementar técnicas de control a un motor real, llegando más allá de la simulación.

II. METODOLOGÍA PROPUESTA

Para controlar la velocidad del MCM construido por los estudiantes de ingeniería mecatrónica en el año 2019, es necesario inicialmente recopilar la información sobre el módulo, su caracterización y correcta puesta en marcha, para ello se hará uso del manual de usuario suministrado por los estudiantes. Una vez se realicen pruebas de funcionamiento se procede a modelar la planta y diseñar un controlador para implementar directamente en el módulo a través de un Arduino Uno.

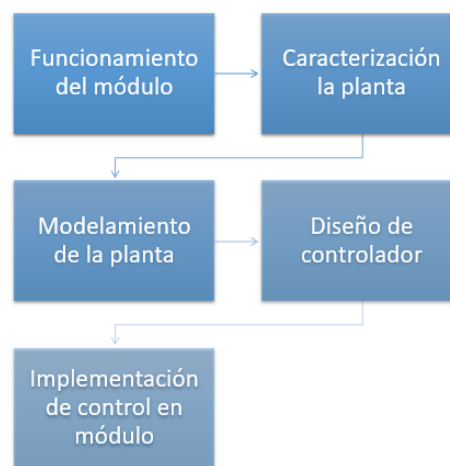


Figura 1. Metodología del Control de Velocidad para el MCM

El artículo se expondrá alrededor de los bloques anteriormente mencionados, en cada sección se hará una descripción de cómo se procedió y la información relevante encontrada.

¹ Facultad de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia. amy.noriega@ustabuca.edu.co; jose.monroy@ustabuca.edu.co; diego.paez@ustabuca.edu.co

III. MÓDULO DE CONTROL

El MCM es un dispositivo encargado de gestionar las características relacionadas con el funcionamiento del motor y recoger la información de los distintos sensores que lo integran, lo que es necesario para verificar que el motor está funcionando como el usuario lo requiere.[3]

Las características del dispositivo permiten al usuario visualizar datos y verificar, detectar y analizar fácilmente diversas variables del sistema y así tomar las acciones de control correspondientes, teniendo así una mejor experiencia en proyectos orientados al diseño, control y operación de procesos Mecatrónicos.[4]



Figura 2. MCM

El MCM que se implementó para el desarrollo de este artículo les permite a los usuarios controlar el motor bajo una metodología sencilla debido a las borneras presentes en la parte frontal del módulo. Además, el prototipo fue pensado para los estudiantes, de modo que este artículo permitirá demostrar las ventajas y alcances que tiene en la práctica.

A. Placa Electrónica

La tarjeta diseñada en base a un controlador AtMega328 es un componente fundamental del MCM. Esta se encarga de recibir la información que el usuario envía en las entradas (Velocidad por PWM y Ángulo de Giro) y enviarla al Driver Mini Moto Monster encargado del control. Así mismo, recibe las respectivas salidas de los encoder del motor y procesa para la información que se envía a la pantalla LCD. Además, cuenta con un conjunto de sensores de corriente encargados de proteger el sistema en caso de sobrecarga del motor. [4]



Figura 3. Placa electrónica de MCM

En el manual de usuario del módulo se pueden detallar mejor las secciones y pines de la placa junto con una descripción. Como se mencionó en el párrafo anterior la placa envía la información procesada a la LCD, internamente esta placa tiene programada la interpretación de la lectura del encoder que viene con el motor del módulo sin embargo en las bornera también podemos sacar esta

información del encoder y comparar la precisión del programa en la placa con los datos de un elemento patrón que es la primera etapa del artículo.

B. Actuador y sensores relacionados al control del módulo

Como actuador, el módulo cuenta con un Motor DCMetal GearMotor 19:1 el cual es un potente motor sin escobillas de 12 V con una relación de 18,75: 1 y un codificador cuádruple incorporado que proporciona una precisión de hasta 64 cuentas por revolución, es decir, 1200 cuentas por revolución de eje de la caja. [5]



Figura 4. Motor pololu "19:1 Metal Gearmotor 37Dx68L mm 12V". La imagen fue adaptada de [5], Copyright © 2001–2021 Pololu Corporation

Integrado al motor se encuentra un Encoder de efecto Hall (37Dmm con 64 CPR (con tapa removida como se muestra en la Figura 5)), tiene dos canales de efecto Hall, se utiliza para detectar la rotación del disco magnético en la proyección trasera del eje del motor. Este sensor requiere una entrada de tensión (Vcc) entre 3.5 y 20V con una toma de corriente de máximo 10mA. Las Salidas A y B son ondas cuadradas de 0V a Vcc con un desfase aproximado de 90°. La frecuencia de las transiciones permite obtener la velocidad del motor y el orden de los cambios permite obtener la dirección de rotación. [5]



Figura 5. Encoder de cuadratura con 64 CPR. La imagen fue adaptada de [5], Copyright © 2001–2021 Pololu Corporation

Es por esto que el encoder resulta de mucha utilidad ya que proporciona el ángulo de giro y la velocidad del motor. Por último, un Driver Mini Moto Monster, con una corriente hasta de 30A. También están reforzados los circuitos de soporte para que la placa sea capaz de conducir un par de motores de alta corriente.[6]



Figura 6. Driver Mini Moto Monster. La imagen fue adaptada de [6], Copyright © 2021 Robótica colombiana S.A.S. una empresa colombiana- tdrobotica.co™

C. Funcionamiento

En primer lugar, se debe conectar el módulo a una toma de 110 V, apenas esté enchufado se observará en la parte interior del módulo que enciende un led indicando que la fuente de poder esta energizada; una vez la fuente está funcionando se procede a cambiar el estado del switch en la parte posterior del módulo, ahora se encenderá la pantalla LCD con un mensaje de bienvenida para posteriormente anclarse en la presentación de las variables del módulo como se muestra en la siguiente Figura.



Figura 7. Display del MCM. La imagen fue adaptada de [4].

Al momento de arrancar el motor se debe tener conectadas 4 borneras: el PWM, señal que es recibida por el driver que finalmente entregará el voltaje al motor; las borneras de In A e In B, las cuales determinan el sentido de giro que se muestra en la LCD en la segunda fila mostrando H como sentido horario y AH como antihorario, cabe resaltar que deben ser valores digitales inversos o no girará en ningún sentido y finalmente el Ground de la señal pwm con el ground del Módulo.

El MCM cuenta con otras 4 borneras en la parte izquierda como se muestra en la Figura 8, correspondientes a los canales del encoder identificadas como En A y En B, una bornera de velocidad (Vel) que internamente en la placa se procesa y entrega en una escala de 0-5V en representación de 0-500 rpm y una bornera de ángulo (Ang) que para este artículo no será utilizada. Además, para este desarrollo no se tuvo en cuenta la perturbación magnética por ende no se activó el freno magnético que tiene ensamblado el MCM.

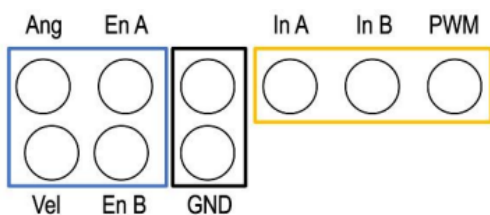


Figura 8. Etiqueta de las borneras del MCM. La imagen fue adaptada de [4].

IV. MODELADO DE LA PLANTA

En primera instancia se realizaron pruebas de arranque a diversas entradas PWM para caracterizar el rango de trabajo del MCM y se detectó que el motor no es capaz de romper la inercia a ciclos inferiores de 13.7% por ende, se decidió que el modulo solo se trabajará en valores entre 35-255 PWM.

A continuación, se estableció la señal de salida que representa el sensor de retroalimentación para ello bajo el patrón de un tacómetro se envió PWM dentro del rango de trabajo del MCM y se registraron los valores estables de las señales de salida, con ello se obtuvieron los resultados mostrados en la gráfica.

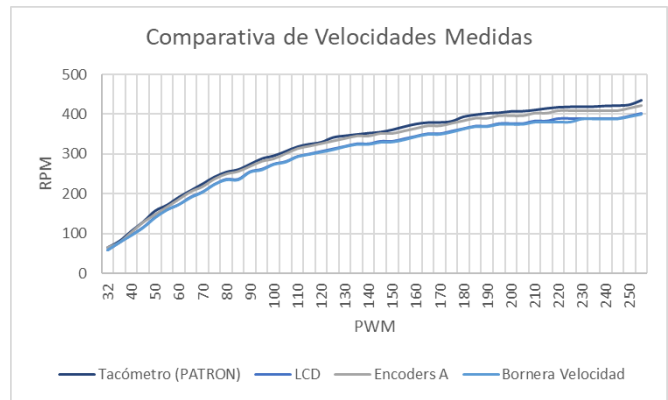


Figura 9. Mediciones de velocidad a distintas PWM de entrada

Como se puede observar, la salida que más se acerca a la medición patrón es la obtenida por el Encoder A. Otra forma de confirmar fue evaluando el error en cada medición para obtener la media del error obtenido en la prueba.

Media del Error		
	Bornera Velocidad	Encoder A
LCD	8%	3%

Tabla 1. Media del error en mediciones de Velocidad

Para el registro de la velocidad medida por medio de la lectura de los encoders fue necesario implementar un filtro pasa baja de un circuito RC para eliminar el ruido de la señal y así obtener una mejor calidad en la toma de datos.[7]

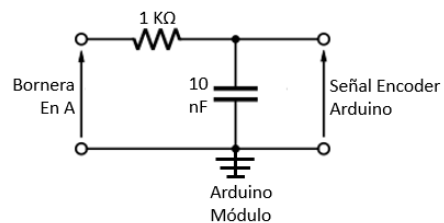


Figura 10. Filtro circuito RC

Con base en las especificaciones del encoder la ecuación para interpretar la velocidad instantánea del motor y así mismo del disco ensamblado según los flancos ascendentes que genera sería:

$$\omega = \left(\frac{1}{ppr} * \frac{60.0}{delta} \right) /relación = [rpm] \quad (1)$$

Donde ppr (pulsos por revolución) son 16 ya que el uso de un solo borde de un canal da como resultado 16 recuentos por revolución del eje del motor, delta es el tiempo transcurrido entre pulso en segundos, y finalmente la relación efectiva de la caja reductora que equivale a 18.75. Para este artículo se trabajó la salida del módulo en unidades de rad/s por lo que al resultado en RPM se le realiza la siguiente conversión

$$\frac{rad}{s} = RPM * \frac{2\pi}{1 rev} * \frac{1 min}{60 s} \quad (2)$$

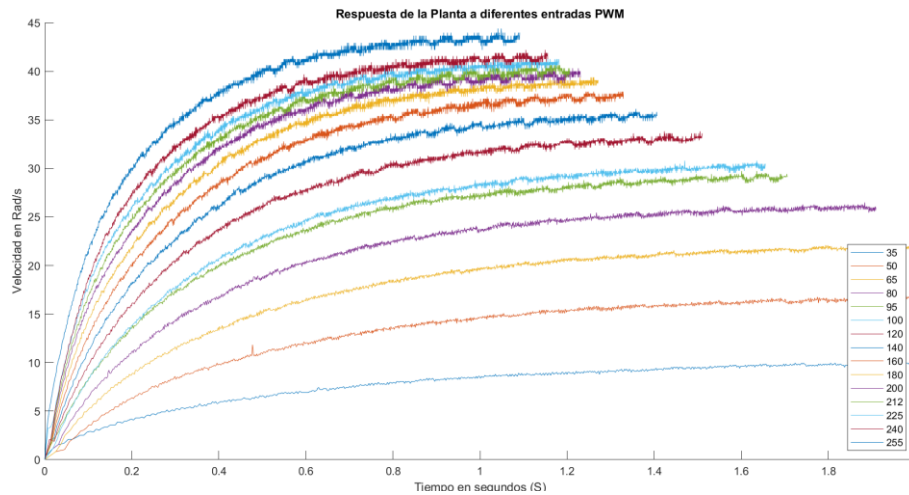


Figura 12. Respuesta de la Planta a diferentes entradas PWM

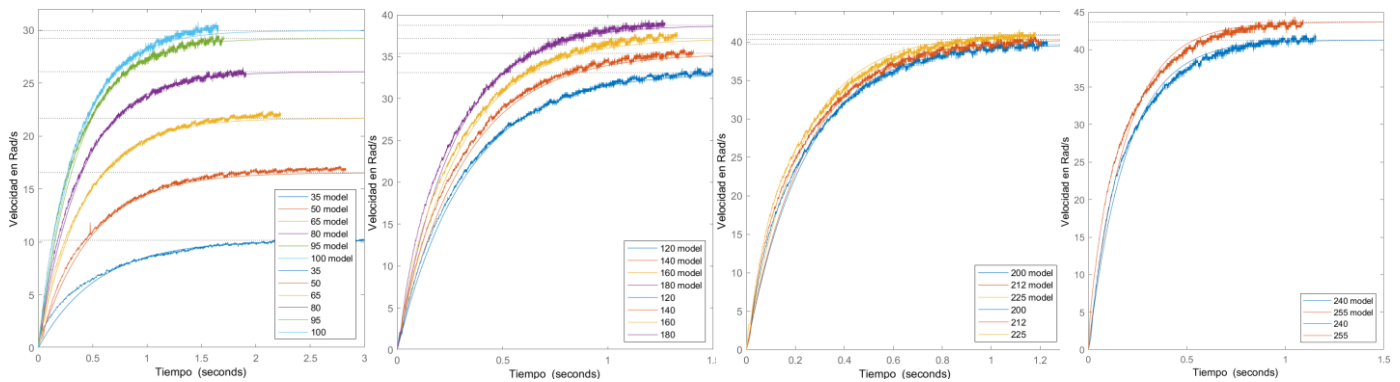


Figura 11. Respuesta vs Modelo estimado a distintas PWM

Función de transferencia de MCM								
PWM	K	0.283 K	0.632 K	T1	T2	τ	L	Kp
35	10	2.875	6.420	0.097	0.455	0.537	-0.082	0.290
50	17	4.682	10.457	0.132	0.452	0.480	-0.028	0.331
65	22	6.135	13.700	0.122	0.398	0.415	-0.017	0.333
80	26	7.379	16.480	0.114	0.380	0.400	-0.020	0.326
95	29	8.268	18.465	0.101	0.344	0.365	-0.021	0.308
100	30	8.476	18.928	0.101	0.339	0.356	-0.017	0.299
120	33	9.365	20.914	0.096	0.315	0.329	-0.014	0.276
140	35	10.017	22.370	0.085	0.294	0.313	-0.020	0.253
160	37	10.521	23.495	0.077	0.268	0.287	-0.019	0.232
180	39	10.965	24.488	0.070	0.246	0.263	-0.018	0.215
200	40	11.232	25.083	0.063	0.223	0.241	-0.018	0.198
212	40	11.410	25.480	0.059	0.217	0.237	-0.020	0.190
225	41	11.588	25.877	0.055	0.198	0.215	-0.017	0.182
240	41	11.676	26.076	0.055	0.183	0.193	-0.009	0.172
255	44	12.358	27.598	0.042	0.166	0.185	-0.019	0.171

Tabla 2. Constantes de las funciones de transferencias del MCM

Ahora, para obtener el modelo del MCM a partir de datos experimentales se propuso considerarlo como un sistema de caja negra ya que estos permiten conocer la función de transferencia sin la posibilidad de acceder a sus dinámicas internas de manera directa [8].

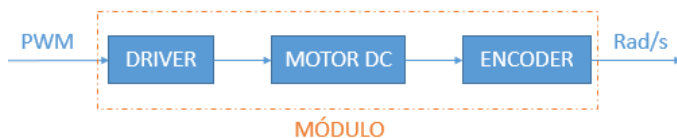


Figura 13. Lazo abierto del MCM

El experimento constó en partir del reposo y enviar PWM para observar el comportamiento de la planta en estado transitorio y su tiempo de establecimiento, la señal de salida fue la bornera del encoder A, de la cual se registraron 1900 datos de velocidades instantáneas medidas por cada pulso del encoder y se accionó el motor a 15 entradas PWM constantes, los datos obtenidos se muestran en la Figura 12.

A partir de la respuesta se estableció una función de transferencia que se adapta como ecuación del MCM; como se puede observar en la Figura 12 el módulo no presenta un comportamiento lineal por lo que se optó por establecer una serie de funciones de transferencia en el rango de entradas PWM. Para obtener el modelo se usó el método de

los 2 puntos o método de Smith, el cual realizando una curva de reacción aproxima el modelo a una función de primer orden con retardo y se estiman las variables a partir de condiciones propias del comportamiento.

$$G(s) = \frac{K_p}{\tau s + 1} * e^{-Ls} \quad (3)$$

Los instantes seleccionados por este autor fueron los tiempos requeridos para que la respuesta alcance el 28.3% (T1) y el 63.2% (T2) del valor final (K) [9], donde τ es 3/2 de la diferencia de los tiempos al 63.2% y 28.3% respectivamente, L la diferencia entre el t_2 y τ , y la K si el sistema tuviera una entrada escalón unitaria sería el valor de salida estable sin embargo como el sistema tiene entradas en rangos de PWM, se normaliza la K de modo que este en función de la entrada, es decir Y/U.

Como se puede observar en la Tabla 2, valores calculados para las constantes de las funciones de transferencia a PWM constantes, el valor del retardo es menor a -0.1 por lo tanto se decidió aproximar el retardo a 0. Así, la comparación del modelo estimado y la respuesta de la planta fue la mostrada en la Figura 13.

V. CONTROL A MODELO

Una vez verificado que el modelo calculado representa a la planta se comienza a diseñar el controlador. Para ello se acogieron dos consideraciones, primero la planta y el sensor de retroalimentación en el sistema de control representan el MCM debido a que la salida es la velocidad medida por el encoder; la segunda es la consistencia en las unidades trabajadas, el controlador tendrá como entrada el error sin embargo su salida se mantendrá en estas unidades por lo que es necesario aplicar un factor de escala a la señal de control.

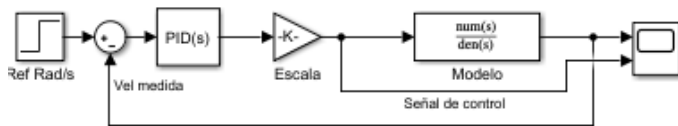


Figura 14. Sistema de control

Ya que se tiene el sistema de control en lazo cerrado siguiendo una referencia, se opta por diseñar el controlador bajo dos procedimientos distintos del método del lugar de las raíces (LGR). Como se tiene una planta no lineal y por cada entrada de PWM se tiene un modelo es necesario diseñar un controlador por cada una de ellas; con el fin de comparar y a su vez relacionar las constantes K_p , K_i y K_d en el procedimiento seleccionado, se consideran las mismas especificaciones de sobre pico y tiempo de establecimiento para los sistemas.

$$M_p = 0.05; t_s = 3.5 \text{ seg}; \quad (4)$$

Lo primero que se revisó fue la estabilidad de la planta, en este caso el modelo obtenido, en lazo cerrado con ayuda del *rlocus* de Matlab. Allí se observó la ubicación de los polos y los ceros de la función: si todos se encuentran al lado izquierdo del plano s el modelo es estable, pero si por lo menos uno de los polos o ceros está en el lado derecho lo vuelve inestable.[10]

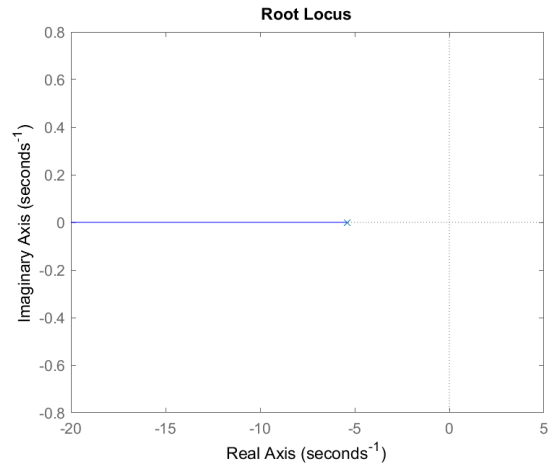


Figura 15. LGR del modelo 15 en lazo cerrado

Luego se estableció la función de transferencia que representa al Controlador PID que puede expresarse de las siguientes formas:

$$G_c(s) = K_p + K_d * s + \frac{K_i}{s} \quad (5)$$

$$G_c(s) = \frac{K_d * s^2 + K_p * s + K_i}{s} = \frac{K_c(s+a)(s+b)}{s} \quad (6)$$

$$K_d = K_c; K_p = (a + b) * K_c; K_i = a * b * K_c \quad (7)$$

Se rigió el diseño al cumplimiento de las condiciones de ángulo y magnitud en el primer procedimiento y para una mayor facilidad en los cálculos se trabajó con la ecuación 6 con ceros factorizados. Debido a que la función del controlador presenta 3 incógnitas, se colocó uno de los ceros cancelando el polo de la planta y de este modo quedaron dos ecuaciones con dos incógnitas. A partir de la condición de ángulo se halló el cero restante y de la condición de magnitud la ganancia del controlador. Para concluir, se operaron los valores según la ecuación 7 y se obtuvieron las siguientes constantes de controlador

Controlador PID						
Rad/s	Kc	a	b	Kd	Kp	Ki
10	0.237	1.863	3.006	0.237	1.153	1.326
17	0.174	2.085	3.228	0.174	0.925	1.171
22	0.133	2.409	3.551	0.133	0.795	1.141
26	0.124	2.503	3.645	0.124	0.760	1.128
29	0.112	2.740	3.883	0.112	0.739	1.187
30	0.112	2.809	3.952	0.112	0.759	1.246
33	0.102	3.043	4.186	0.102	0.737	1.299
35	0.103	3.193	4.336	0.103	0.772	1.420
37	0.094	3.482	4.625	0.094	0.764	1.517
39	0.088	3.797	4.940	0.088	0.764	1.641
40	0.080	4.149	5.291	0.080	0.754	1.754
40	0.080	4.211	5.354	0.080	0.768	1.810
41	0.071	4.646	5.789	0.071	0.736	1.896
41	0.059	5.187	6.330	0.059	0.682	1.944
44	0.055	5.403	6.546	0.055	0.662	1.960

Tabla 3. Constantes del controlador obtenidas con el primer procedimiento

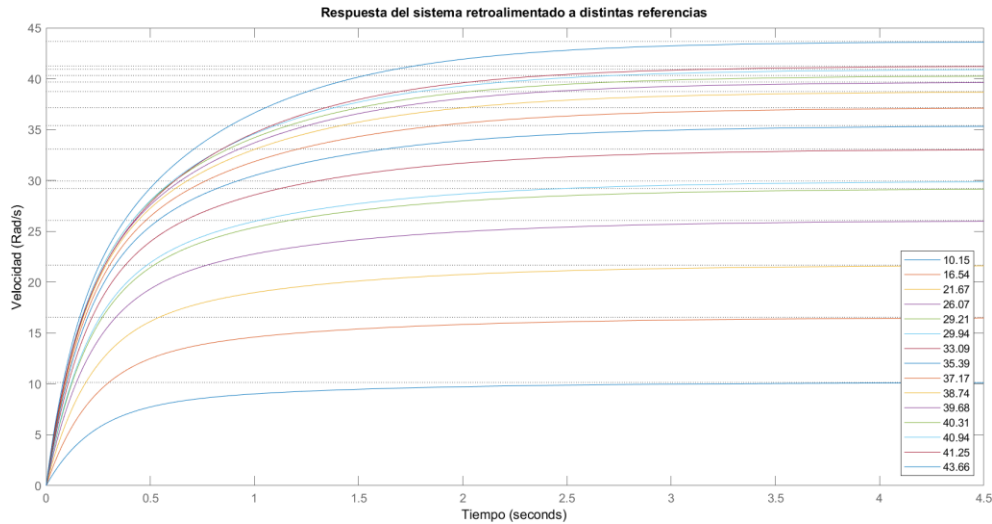


Figura 17. Respuesta del sistema retroalimentado (procedimiento 1)

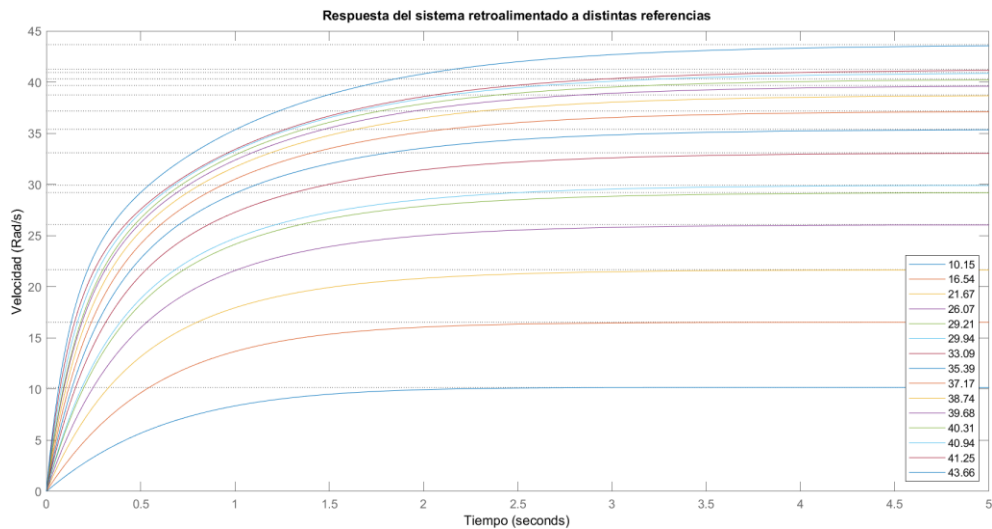


Figura 16. Respuesta del sistema retroalimentado (procedimiento 2)

Finalmente, se graficó el lugar geométrico de las raíces con el sistema de control como el de la Figura 14.

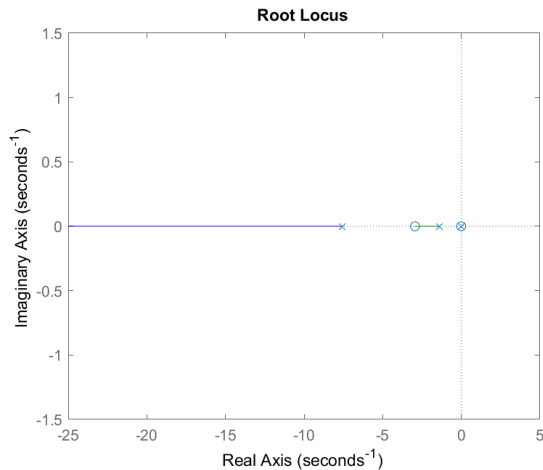


Figura 18. LGR del sistema 15 en lazo cerrado (procedimiento 1)

Igualmente, para observar mejor el comportamiento ante diferentes referencias de velocidad, se graficaron todos los sistemas retroalimentados, como se observa en la Figura 17.

Para el segundo procedimiento se igualaron una función de segundo orden (Ecuación 8) a la ecuación característica del sistema de control retroalimentado (Ecuación 9), para ello se calcula un bloque en lazo abierto equivalente usando algebra de bloques. Manteniendo las especificaciones del primer procedimiento y haciendo uso de la ecuación 6 en términos de las constantes para la operación, finalmente se obtuvo:

$$s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (8)$$

$$s^2(\tau + K * K_d) + s(K * K_p + 1) + K_i * K \quad (9)$$

$$\tau + K * K_d = 1; K * K_p + 1 = 2\delta\omega_n; K_i * K = \omega_n^2 \quad (10)$$

Por cada término se despejó una de las constantes del controlador y los resultados fueron los siguientes:

CONTROLADOR PID			
Rad/s	kp	ki	kd
10	0.489	1.036	0.273
17	0.437	0.925	0.274
22	0.433	0.916	0.305
26	0.430	0.911	0.312
29	0.458	0.970	0.351
30	0.482	1.021	0.375
33	0.508	1.076	0.412
35	0.559	1.184	0.463
37	0.604	1.280	0.520
39	0.662	1.402	0.588
40	0.717	1.518	0.656
40	0.741	1.569	0.682
41	0.786	1.665	0.744
41	0.818	1.733	0.797
44	0.829	1.755	0.815

Tabla 4. Constantes de controlador obtenidas con el segundo procedimiento

El LGR del sistema retroalimentado fue el de la Figura 18, al igual que la respuesta del sistema retroalimentado a distintas referencias en la Figura 19

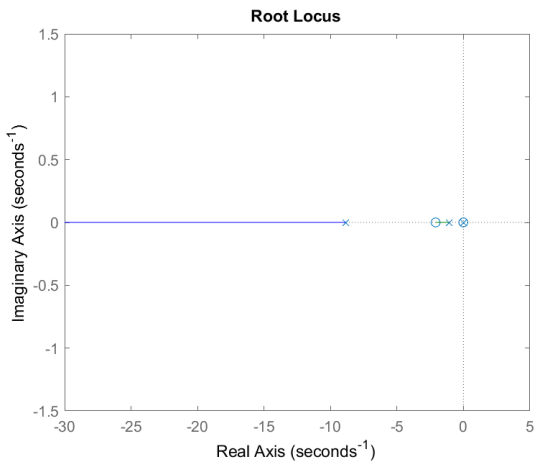


Figura 19. LGR del sistema 15 en lazo cerrado (procedimiento 2)

Aunque las respuestas con el primer procedimiento se estabilizan más rápido se debe considerar que las raíces obtenidas cancelan el polo del modelo, lo cual no es recomendable ya que se modifica la naturaleza del sistema; en cambio con el segundo se garantiza el cumplimiento de las especificaciones al igualar la ecuación característica con la ecuación 8.

VI. RESULTADO DE APLICACIÓN DEL CONTROLADOR

En esta sección se describe la implementación del controlador en un módulo didáctico. Como se mencionó al comienzo, se seleccionó un Arduino Uno como dispositivo para implementar el controlador, este también tuvo la labor de recibir el SetPoint (SP) y calcular el error con la velocidad medida.

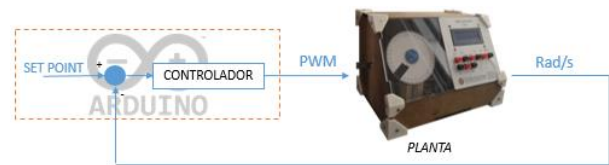


Figura 20. Esquema de Sistema de control

Siguiendo la idea de que se tienen tantas constantes de controlador por modelos existentes, se pudo linealizar estos valores de modo que el coeficiente de determinación[11] fue superior al 0.97 con funciones de tercer grado, las ecuaciones para cada constante junto con las gráficas de tendencia son las siguientes:

$$K_p = 1e^{-05}SP^3 - 0.0002SP^2 - 0.0099SP + 0.6 \quad (11)$$

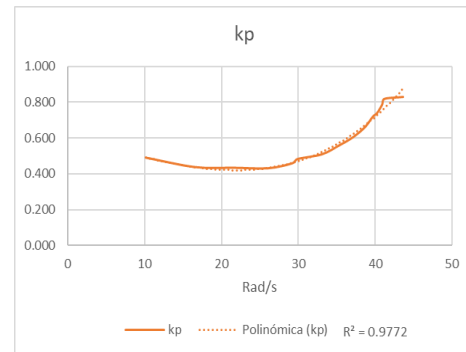


Figura 21. Tendencia de Kp del controlador

$$K_i = 3e^{-05}SP^3 - 0.0005SP^2 - 0.021SP + 1.2713 \quad (12)$$

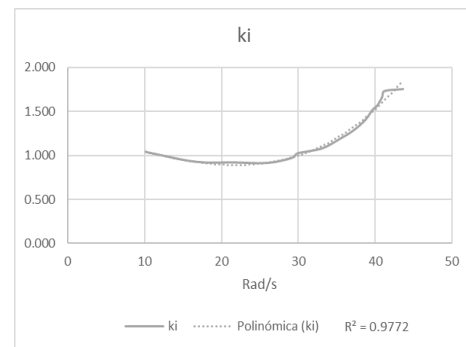


Figura 22. Tendencia de Ki del controlador

$$K_d = 3e^{-05}SP^3 - 0.0014SP^2 + 0.0234SP + 0.1484 \quad (13)$$

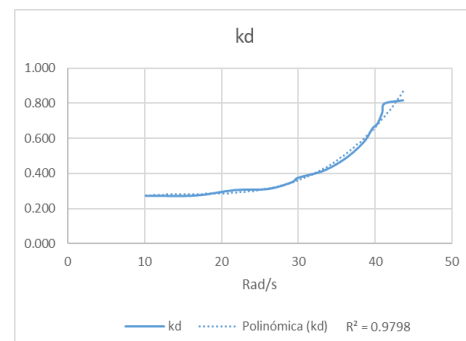


Figura 23. Tendencia de Kd del controlador

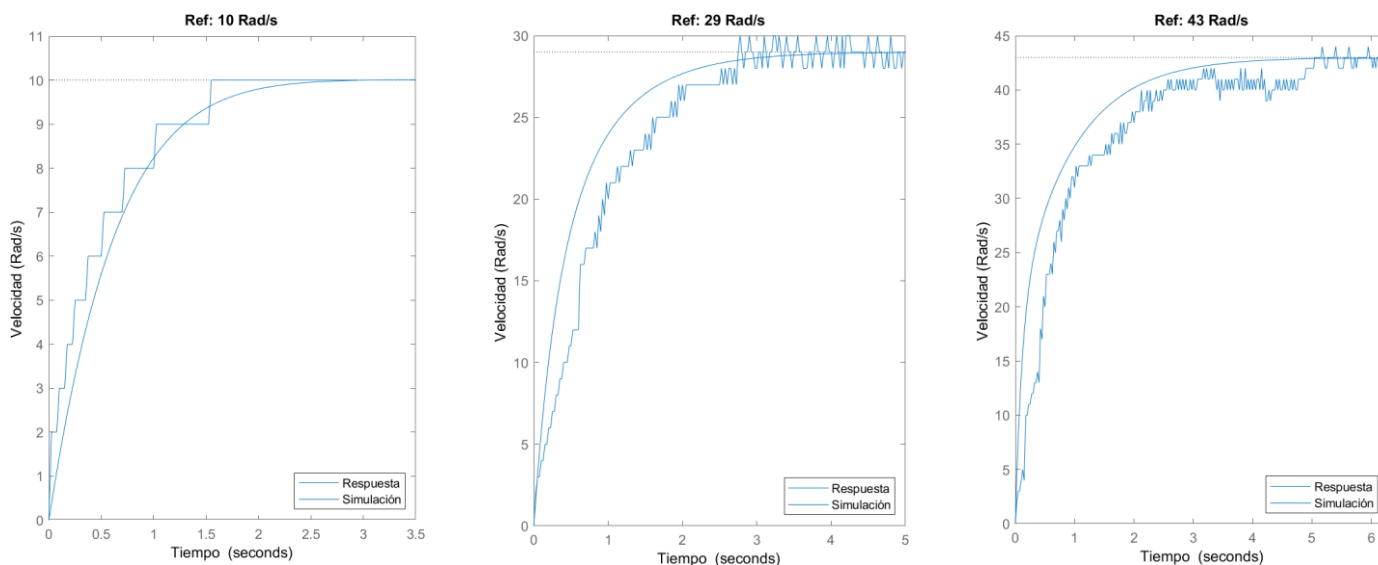


Figura 24. Comparación respuesta vs simulación

Por último, el controlador programado en el Arduino Uno es discreto, sin embargo, el tiempo de muestreo y control fue corto en función de las características y velocidad de respuesta del sistema lo que permitió aproximarlos a un controlador continuo. Debido a esto en la Figura 24 se pudo comparar la respuesta del sistema simulado con la del MCM bajo la acción de un controlador discreto.

VII. CONCLUSIONES

Un factor de gran importancia para el desarrollo del artículo fue la selección de la señal de salida del módulo, ya que de este dependían todos los cálculos al momento de realizar el control, si se hubiera trabajado con otra de las borneras se tendría un error estacionario mayor. Así mismo el contar con la señal directa del encoder permitió trabajar la lectura de la velocidad en Arduino para sus posteriores cálculos.

En relación al modelo del MCM el método empleado para estimarlo es una buena alternativa y más teniendo un sistema con comportamiento no lineal, las ventajas que ofreció fue calcular constantes de controlador adecuadas para cada intervalo de funcionamiento, donde al aplicarlas se pudo evidenciar las especificaciones seleccionadas. Así mismo, aunque se trabajó con 15 modelos a lo largo de todo el rango, finalmente el establecer las mismas especificaciones para el diseño de los controladores permitió linealizar las constantes y por ende ahorrando tiempo de cálculo y memoria del microcontrolador.

Como se mencionó en la sección V, cada que se trabaja con sistemas de control es vital tener presente las unidades para mantener la consistencia, por ejemplo, si se hubiera tomado la velocidad en RPM, al modelar la planta debíamos tener τ en minutos y los demás cálculos en las unidades correspondientes para que la práctica no presentará errores provenientes de esta razón.

Al implementar el controlador en el MCM se pudo observar que al llegar a la referencia empieza a oscilar la velocidad medida en una ventana de aproximadamente 3% sin embargo entre menor era la referencia esta ventana se reducía. Las razones a las que se les atribuye esta oscilación en estado estacionario son: el error en la señal de control debido al uso de escalas, derivadas e integrales aproximadas al

discretizar las señales, y el ensamblaje de la carga con el motor, ya que este a medida que aumenta la velocidad empieza a generar vibraciones y por ende perturbaciones en el sistema, a pesar de esto los controladores implementados tienen la capacidad de mantenerse alrededor de la referencia.

Por último, el MCM permitió poner en práctica algunos de los conceptos de la disciplina de control incluso algunas temáticas propias de instrumentación relacionadas a modelar los sistemas físicos y electrónicos. Debido al diseño del MCM fue sencillo obtener la información del comportamiento del motor y aparte de implementar el controlador con solo un Arduino Uno. Aunque no se hayan utilizado las borneras encargadas del giro o el freno magnético, la existencia de los mismo en el MCM permite ampliar el alcance de este dispositivo y a su vez el de las prácticas del plan de estudios de Ingeniería Mecatrónica que se apoyen en el mismo.

REFERENCIAS

- [1] M. R. Nichols, «Advantages of DC motors in industrial applications», *Advantages of DC motors in industrial applications*, ago. 14, 2019. <https://www.controlglobal.com/blogs/guest-blogs/advantages-of-dc-motors-in-industrial-applications/> (accedido dic. 01, 2021).
- [2] G. Lanza, S. Minges, J. Stoll, E. Moser, y B. Haefner, «Integrated and Modular Didactic and Methodological Concept for a Learning Factory», *Procedia CIRP*, vol. 54, pp. 136-140, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.06.107.
- [3] S. Vasquez, J. A. Alzate, A. Noriega, y D. R. Paez, «Desarrollo de Módulo Didáctico de Control de Motor DC». Bucaramanga, 2019.
- [4] S. Vasquez, J. A. Alzate, A. Noriega, y D. R. Paez, «Módulo de Control de Motor DC. Manual de Usuario». Bucaramanga, pp. 2-5, 2019.
- [5] Pololu Robotics & Electronics, «Pololu - 19:1 Metal Gearmotor 37Dx68L mm 12V with 64 CPR Encoder (Helical

- Pinion)», *19:1 Metal Gearmotor 37Dx68L mm 12V with 64 CPR Encoder (Helical Pinion)*.
<https://www.pololu.com/product/4751> (accedido dic. 01, 2021).
- [6] Tienda tdrobotica, «Driver Mini Moto Monster 30A». <https://tienda.tdrobotica.co/categoria/1021-driver-mini-moto-monster-30a.html> (accedido dic. 01, 2021).
- [7] J. & S. Johnson, Hilburn, *Análisis Básico de Circuitos Eléctricos*. 1996.
- [8] J. de Jesús Medel Juárez, M. Teresa Zagaceta Álvarez, R. Palma Orozco, C. S. Venus, y C. C. Nueva Industrial Vallejo P, «Identificación con estimación para sistemas tipo caja negra», *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, vol. 72, n.º 72, pp. 35-46, 2014, Accedido: dic. 09, 2021. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302014000300004&lng=en&nrm=iso&tlng=es.
- [9] Instituto Tecnológico Metropolitano, «IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS Y CURVA DE REACCIÓN», *IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS Y CURVA DE REACCIÓN*. Medellín, Accedido: dic. 08, 2021. [En línea]. Disponible en: https://tableroalparque.weebly.com/uploads/5/1/6/9/51696511/5_identificacion_de_procesos_y_curva_de_reaccion.pdf.
- [10] K. Ogata *et al.*, *Ingeniería de control moderna*. 2010.
- [11] R. E. Walpole y R. H. Myers, *Probabilidad y Estadística para Ingenieros, 6ta Edición*. 1999.