

SEGUIMIENTO DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DE CD EN UN SISTEMA PARALELO

SPEED TRACKING OF A DC MOTOR IN A PARALLEL SYSTEM

Guillermo Mejía Cisneros

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México
guillermo.mejia@uacj.mx

Israel Ulises Ponce Monárrez

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México
israel.ulises@uacj.mx

Adriana Salinas Ávila

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México
adriana.salinas@uacj.mx

Betania Sánchez Santamaria

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México
betania.sanchez@uacj.mx

Recepción: 5/octubre/2023

Aceptación: 23/diciembre/2023

Resumen

Los vehículos con propulsión híbrida, compuestos por un motor de combustión interna (MCI) y un motor eléctrico (ME) en su arquitectura paralela, requieren un control eficiente para mantener la velocidad del ME a la velocidad del MCI, esto, a fin de minimizar el esfuerzo del MCI, y reducir el consumo de gasolina. En este trabajo, se propone un control discreto que logre la regulación de velocidad del ME. Para probar el control propuesto, se desarrolla una plataforma experimental, donde el MCI es representado por un motor de corriente directa (CD) a fin de proporcionar una velocidad constante, la cual debe ser igualada por un ME, también representado por un motor de CD. El desempeño del sistema en lazo cerrado se comprueba en simulaciones desarrolladas en Simulink de Matlab. Posteriormente, el sistema de control es probado en la plataforma experimental, logrando obtener una respuesta satisfactoria a los cambios exigidos de variación de velocidad.

Palabras Clave: Control discreto, Motor CD, Regulación, Velocidad.

Abstract

Hybrid propulsion vehicles, composed of an internal combustion engine (ICE) and an electric motor (EM) in a parallel architecture, require efficient control to maintain the EM speed at the ICE speed, in order to minimize the effort of the ICE and reduce gasoline consumption. In this work, a discrete control system is proposed to achieve EM speed regulation. To test the proposed control, an experimental platform is developed, where the ICE is replaced by a DC motor to provide a constant speed, which must be matched by an EM, also represented by a DC motor. The performance of the closed-loop system is verified through simulations conducted in Matlab Simulink. Subsequently, the control system is tested on the experimental platform, successfully achieving a satisfactory response to the required speed variations.

Keywords: *DC motor, Discret control, Regulation, Velocity.*

1. Introducción

La industria del transporte enfrenta nuevos retos debido a las exigencias gubernamentales sobre la reducción de contaminantes. Los vehículos más utilizados en el mundo utilizan sistemas de potencia a base de la termodinámica, los cuales generan una gran cantidad de contaminantes. Lo anterior, ha propiciado que se presenten opciones generadoras de potencia más amigables con el medio ambiente, como son los vehículos eléctricos. Aunque esta tecnología es de reciente aplicación a gran escala en la industria automotriz, tiene ciertas desventajas contra la tecnología tradicional. Entre las desventajas destacan los altos costos de los vehículos eléctricos, la baja capacidad de recorrido por carga energética (autonomía), y los tiempos prolongados de recarga de las baterías [Cifuentes, 2022]. Esto, ha llevado a proponer una respuesta alterna que corresponde a la combinación de las tecnologías nuevas y actuales, dando por resultado los sistemas híbridos. Un sistema híbrido resulta de la combinación de potencias proporcionadas por el Motor de Combustión Interna (MCI) y por el Motor Eléctrico (ME), y tiene como objetivo lograr una disminución de costos, mejorar su autonomía y el tiempo de recarga [Yu, 2022], [Farhat, 2022].

Los sistemas híbridos se pueden clasificar de acuerdo con la forma en que combinan sus potencias en tres arquitecturas: paralelo, serie y serie-paralelo [Mejía, 2021]. Cada una de estas arquitecturas, presentan su propio beneficio, lo cual se explica a continuación.

Arquitectura en serie, donde el ME es el único en proporcionar potencia al freno, mientras el MCI solo se emplea para generar corriente eléctrica, más debido a esta situación, las condiciones de operación que corresponden a velocidad constante, y un solo régimen de velocidad nos permite diseñar un motor que opere a su máxima eficiencia a la velocidad deseada, generando un beneficio en consumo y contaminación [Emadi, 2014].

Arquitectura en paralelo, el ME agrega su potencia al momento en que el MCI está produciendo potencia para mover al vehículo, lo que resulta en que la potencia al freno es la suma de las dos fuentes de potencia, y en un momento dado, dependiendo de las necesidades, el MCI únicamente proporciona fuerza a la movilidad [Chan, 2007].

Arquitectura en serie-paralelo, esto corresponde a la combinación de las arquitecturas serie y paralelo. En este tipo de vehículos, el ME y el MCI pueden generar movilidad de manera independiente, o por la combinación de los dos. También se tiene que el MCI puede proporcionar potencia únicamente para impulsar un generador eléctrico, produciendo la corriente eléctrica necesaria que permita la recargar de la batería que suministra energía al ME [Ryohey, 2018].

Los vehículos a propulsión híbrida son una alternativa tecnológica para lograr un desempeño intermedio entre el proporcionado por los vehículos eléctricos y a gasolina, que aún en desarrollo, logran disminuir el consumo de gasolina, menor costo comparativo al eléctrico y una tecnología que interactúa ambas potencias acordes al diseño.

El diseño del tipo de motor eléctrico, tamaño de la batería y arquitectura, depende de los requerimientos específicos del automóvil, mientras que su desempeño depende sobre todo del sistema de control, el cual es clave para lograr el mejor rendimiento del vehículo. Dentro del sistema de control, es de suma importancia el algoritmo que recibe información, la procesa y entrega una señal conveniente para

los actuadores, de tal manera que se logre un buen comportamiento del vehículo. Esto lleva a un problema abierto para la arquitectura en paralelo, donde el motor eléctrico debe igualar su velocidad con la del MCI, y evitar así que se convierta en una carga adicional al MCI y como consecuencia mayor consumo de combustible [Xu, 2022].

Las técnicas de control de los sistemas híbridos permiten manipular las velocidades de los generadores de potencia, siendo esto muy importante en sistemas con arquitectura tipo paralelo o serie-paralelo, lo cual al momento se conoce que es parte de los sistemas bajo investigación del fabricante. De ahí que, el sistema de control de velocidad en arquitectura en paralelo requiere que la velocidad proporcionada por el ME a la llanta sea igual a la suministrada por el MCI [Xu, 2022]. Esto tiene como objetivo evitar que la velocidad del ME sea menor y se comporte de manera negativa a la potencia generada por el MCI, evitando un consumo adicional de gasolina. También, se debe tener en cuenta que la implementación del sistema de control debe mantener un bajo costo [Mejía, 2021].

Para el control de la velocidad del ME en los sistemas híbridos se han propuestos distintos controladores, donde destaca el control PI (Proporcional-Integral), el cual a pesar de su robustez y debido a las no linealidades del sistema y variaciones paramétricas, no logra un desempeño satisfactorio [Bosco, 2023]. Para mejorar, el desempeño en [Verma, 2012] se propone la combinación del control PI y control difuso, teniendo como resultado un control más complejo en su diseño e implementación. Por otro lado, en [Bosco, 2023] se utiliza un modelo de optimización en combinación con el control PI. En [Vu, 2021] y [Hu, 2020] se utiliza un control de modelo predictivo, donde su desempeño está en función del grado de coincidencia de las dinámicas del modelo utilizado y el sistema real. En [Mahadika, 2019] se utiliza un control óptimo a fin de hacer más eficiente el gasto de combustible, los resultados mostrados son a partir de simulaciones.

En este trabajo se aborda el problema de regulación de velocidad del ME para una arquitectura paralela de un sistema híbrido. El objetivo del sistema de control es que el ME alcance y mantenga la velocidad del MCI, para lo cual, se propone un control discreto. Este control discreto propuesto, es del tipo dinámico, que actualiza el nivel

de salida actual de acuerdo con el error anterior. Este control propuesto debe hacer frente a las perturbaciones dadas por las dinámicas no conocidas y por las variaciones paramétricas. A fin de probar el buen funcionamiento del control propuesto se desarrolla una plataforma experimental con dos motores de CD, donde, uno de los motores representa el MCI, el cual debe mantener una velocidad constante, y el otro de motor de CD representa el ME del sistema híbrido. El desempeño del sistema en lazo cerrado se comprueba primeramente en un ambiente de simulación en Simulink de Matlab.

2. Métodos

Metodología

Para llevar a cabo el control del sistema híbrido resulta útil el uso de un sistema embebido. Entre las funciones que realiza el sistema embebido, está la medición de velocidad, la cual se puede llevar a cabo por conteo de interrupciones o por el tiempo que tarda un ciclo completo de activación y desactivación de los sensores. La medición de velocidad resulta del tipo discreta, ya que se utiliza una rueda dentada con orificios para obstruir la luz, o bien, se utilizan ciertas marcas a ser detectadas. El sistema embebido también es el encargado de mostrar en una pantalla LCD las mediciones obtenidas, y de controlar las funciones con las que cuenta el sistema operacional de propulsión del vehículo. El sistema embebido también registra el desempeño del sistema utilizando un módulo de grabación con micro tarjeta de memoria digital segura (SD).

Para probar el control propuesto, se debe diseñar un prototipo de un sistema de propulsión híbrido con componentes asequibles de bajo costo que simulen la operación de un vehículo híbrido. El prototipo se debe construir de tal manera que represente el movimiento proporcionado por dos potencias, la del MCI y la del ME. Se requiere el uso de sensores que midan la velocidad, para luego, procesar la información y activar el ME en aceleración o desaceleración, a fin de igualar la velocidad del MCI. Este sistema debe ser transferible a un vehículo tubular tipo arenero (Baja) mono plaza como el mostrado en la figura 1, con propulsión híbrida en arquitectura serie-paralelo, comprendiendo un MCI de 150 CC a 5 velocidades,

y un ME tipo BLDC (MEBL) de 72 V. Este vehículo aún está en desarrollo en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, en la División Multidisciplinaria de Ciudad Universitaria, y el trabajo aquí propuesto es parte del proyecto de la reconversión del vehículo a uno híbrido.



Fuente: elaboración propia.

Figura 1 Vehículo tubular arenero tipo baja a controlar.

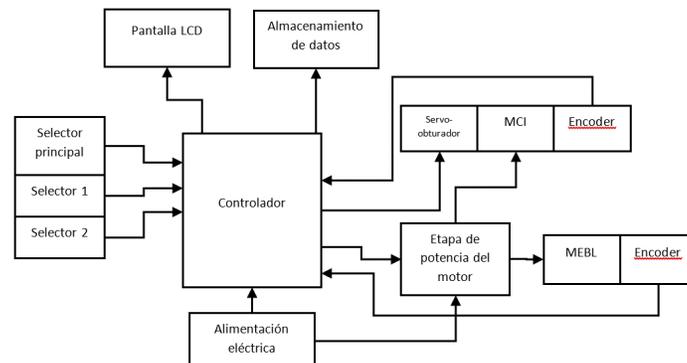
Para controlar el sistema de propulsión se desarrolla un algoritmo, que posteriormente es implementado en una plataforma de desarrollo Arduino. El control desarrollado debe manipular la velocidad del sistema que representa el MCI, y que, a través de valorar la información de los sensores, debe activar el sistema que simula al MEBL para regular su velocidad. La velocidad del sistema que representa el MEBL debe igualarse de manera paulatinamente con la actual del que representa el MCI procesada por el microcontrolador, respondiendo de manera rápida a los cambios de velocidad por las aceleraciones y desaceleraciones, de tal manera que se evite que el MEBL actúe como freno eléctrico o carga negativa sobre el MCI.

Después de diseñar el sistema de control, se deben seleccionar y adquirir los componentes que forman el prototipo de propulsión híbrido para la homologación de velocidad. El sistema desarrollado debe ser escalable al propulsor híbrido de un vehículo tubular arenero mono plaza, conocido como vehículo baja.

Para validar el sistema propuesto, se deben realizar pruebas de verificación de operación del prototipo y ajustar acorde al requerimiento. Así como mediante el prototipo de propulsión híbrido, desarrollar y valorar el algoritmo para igualar la velocidad, en rpm, del MEBL con la del MCI, realizando ajustes para que la igualación se realice de inmediato, sea para incremento de velocidad o decremento del propulsor a gasolina.

Prototipo de propulsión híbrido

Para la construcción del prototipo de propulsión se utiliza como base el diagrama a bloques mostrado en la figura 2. El controlador es el encargado de recibir la información de los encoders para determinar las velocidades de los motores que representan al MCI y al MEBL, así como también, recibe información del selector principal y los selectores secundarios 1 y 2, los cuales permiten cambiar los parámetros del sistema de control. La información recibida por el controlador es procesada, utilizando el algoritmo de control propuesto, dando como resultado las señales necesarias para el control de los motores, las cuales pasan por una la etapa de potencia. En el caso del motor que representa al MCI, el plato del Venturi del carburador es controlado por un servo obturador. Para realizar el monitoreo en tiempo real del sistema se utiliza una pantalla LCD, que muestra información actual, y además también es utilizada para observar y realizar los cambios de los parámetros de control. Por otro lado, la información del comportamiento del sistema es almacenada en una tarjeta de memoria. Y finalmente, la energía eléctrica para el buen funcionamiento del controlador y de la etapa de potencia es proporcionada por una fuente de alimentación.



Fuente: elaboración propia.

Figura 2 Diagrama del prototipo de propulsión híbrida.

La implementación de un prototipo de propulsión híbrida se realiza en base al diagrama de la figura 2. El controlador que se utiliza es una placa de Arduino Mega 2560, la cual resulta adecuada dados los requerimientos planteados. El MCI y el MEBL son representados por motores de CD de 5 V. Se adaptan encoders ópticos

a los motores de CD para medir la velocidad de manera indirecta. Los motores de CD se controlan utilizando un puente H con el dispositivo L293D. Para el selector principal se utiliza uno de tipo encoder, y para los selectores secundarios se utilizan potenciómetros. Se hace uso de una pantalla LCD de 20x4 caracteres y una micro tarjeta de almacenamiento de tipo SD. Finalmente, se utiliza una fuente de alimentación de 12 V para proporcionar energía a todo el circuito.

Existen varias maneras de medir la velocidad rotacional de un sistema en movimiento, para obtener la velocidad, en rpm, y con base al perímetro convertir a velocidad lineal. Una de estas formas de medir la velocidad es por conteo de interrupciones por unidad de tiempo, comparándolo contra las interrupciones que genera un disco en vuelta completa; y otra forma de medir la velocidad, es por determinación del tiempo en que un sensor fotosensible recibe y no recibe (obstrucción) luz infrarroja, es decir, el ciclo de estas dos actividades consecutivas correspondientes a la incidencia y no incidencia de luz en el sensor, y relacionar contra los ciclos que genera una vuelta completa de un disco conocido como codificador de obstrucciones.

Diseño del control

Para el diseño del control CD, se considera una dinámica, ecuación 1.

$$\dot{x} = -bx + u \quad (1)$$

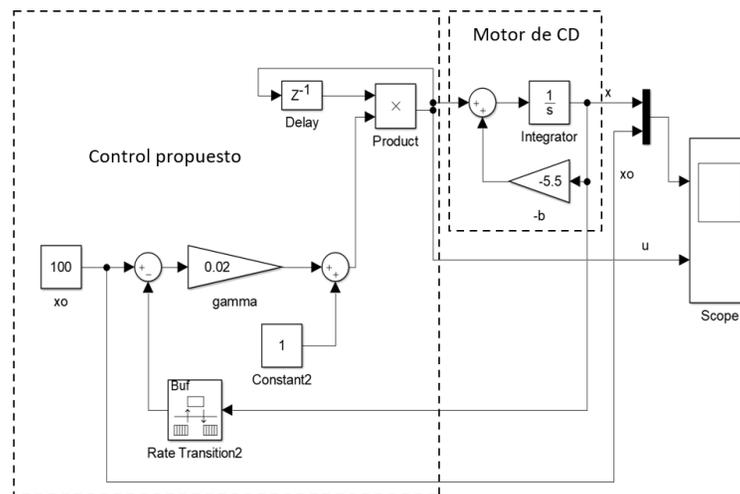
Donde $x \in \mathbb{R}$ representa la velocidad angular del motor, $b \in \mathbb{R}$ es el coeficiente de fricción viscosa, y $u \in \mathbb{R}$ es el torque de entrada, que bien se puede relacionar con el voltaje aplicado en el motor.

El objetivo del control es realizar regulación para llevar la velocidad actual del motor y mantenerla a una velocidad dada x_o . Ya que el control se realiza a través de un microcontrolador, se propone un control discreto dado por la ecuación 2.

$$u_n = u_{n-1}(1 + \gamma(x - x_o)) \quad (2)$$

Donde u_n es la entrada muestreada actual, u_{n-1} corresponde a la entrada muestreada anterior, γ es una ganancia dada. Se considera un tiempo de muestreo t_s y una entrada inicial $u_0 \neq 0$.

Para probar el funcionamiento del controlador se realizan algunas simulaciones en Simulink de Matlab. Se utiliza la versión de Matlab R2016a, y se diseña el diagrama de la figura 3. Las simulaciones se llevan a cabo con una configuración de paso fijo, utilizando el algoritmo ode4 (Runge-Kutta) con un tiempo de muestreo de simulación de 0.001. Para llevar a cabo la simulación se utiliza un parámetro de fricción viscosa de $5.5 \frac{Kg \cdot m}{s}$, el tiempo de muestreo para el control t_s se establece en 50 ms.



Fuente: elaboración propia.

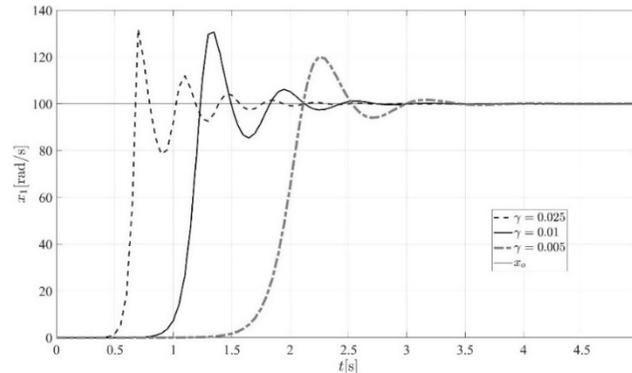
Figura 3 Sistema en lazo cerrado de un motor de CD.

Se realizan tres simulaciones utilizando valores de $\gamma = \{0.02, 0.01, 0.005\}$, considerando $u_0 = 0.0001 N \cdot m$.

El comportamiento de la salida se muestra en la figura 4, y el de la señal de entrada en la figura 5. Se observa que una γ más alta provoca un comportamiento más agresivo del sistema, que, si es demasiado alto, puede provocar que se vuelva inestable; mientras que un valor de γ menor lleva a un comportamiento menos agresivo, teniendo un tiempo de estabilización mayor.

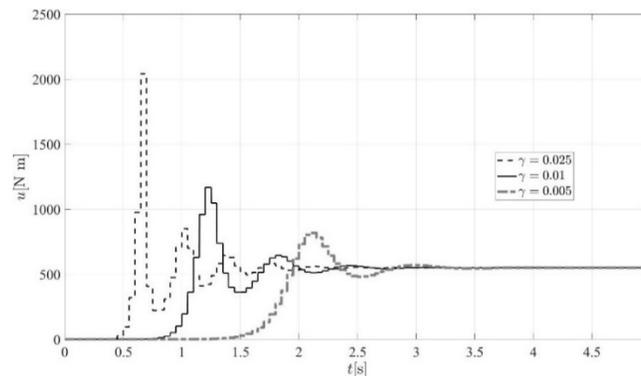
Como resultado de las simulaciones se propone que el valor de γ sea dinámico respecto al valor del error. Si la magnitud del error es grande, el valor de γ debe ser mayor que cuando el error tiene una magnitud menor. Para este trabajo se propone trabajar con 3 valores de γ , correspondientes a tres cotas del error $x - x_0$, dadas por $\{x_a, x_b, x_c \mid x_a > x_b > x_c > 0\}$, ecuación 3.

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_1 & \text{si } |x - x_o| > x_a \\ \gamma_2 & \text{si } x_b < |x - x_o| \leq x_a \\ \gamma_3 & \text{si } |x - x_o| < x_c \end{cases} \quad (3)$$



Fuente: elaboración propia.

Figura 4 Comportamiento de la velocidad del sistema en lazo cerrado.



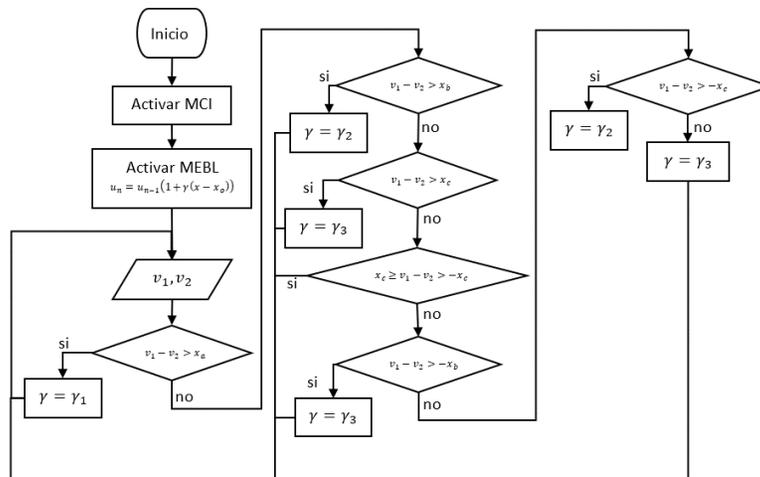
Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Comportamiento de la señal de entrada del sistema en lazo cerrado.

Lo anterior permitirá que el sistema responda con mayor fuerza cuando el error es grande y de una manera más suave cuando el error es menor.

Algoritmo de control

Para la aplicación del control propuesto se implementa el algoritmo de la figura 6. Los valores de las cotas del error x_a, x_b, x_c , así como los valores de $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ se deben seleccionar apropiadamente, para el buen funcionamiento del control de velocidad, esto se realizará de manera empírica, observando los valores para los cuales se tiene un buen comportamiento.



Fuente: elaboración propia.

Figura 6 Algoritmo a implementar para el control de velocidad del MEBL.

El algoritmo controla la parte electrónica del sistema propulsor híbrido de arquitectura paralela. Para la implementación del algoritmo se empleará una tarjeta electrónica programable tipo Arduino Mega 2560, que será la encargada de realizar el control del sistema de operación del vehículo híbrido que contempla lo que a continuación se describe:

- Sistema seguidor de velocidad tipo control discreto de dos fases para que la velocidad del motor de CD que representa el MEBL iguale o supere la velocidad del motor de CD que representa el MCI.
- Encoder de señal desfasada para elegir sistema generador de fuerza para impulso a las llantas tractoras del vehículo.
- Constantes para ajustar y eliminar diferencia, de velocidades: $K_a = 1.25$ (constante agresiva, γ_a), $K_m = 1.03$ (constante moderada, γ_b) y $K_f = 1.008$ (constante fina, γ_c).
- Pantalla LCD para mostrar sistema generador de fuerza elegido y la velocidad, en rpm, del medio impulsor.
- Servo actuador acelerador para cerrar-abrir el sistema de entrada de aire/gasolina en el carburador
- Selector de funciones: 1-Híbrido con seguidor de velocidad del MEBL; 2- Apagar sistema híbrido; 3-MCI; 4-Apagar sistema MCI; 5-MEBL; 6- Apagar sistema MEBL. De estas opciones, se utilizará únicamente la opción 1, y el

resto de las opciones serán utilizadas en futuras pruebas de la plataforma experimental.

- Puente H que mediante el microprocesador proporcione impulsos modulados de alto voltaje al motor de CD que representa el MEBL.
- Microprocesador Arduino Mega 2560, para control lazo cerrado de las funciones del sistema propulsor.
- Potenciómetros para incrementar o decrementar la velocidad del sistema propulsor elegido: La del MEBL al modificar el valor del PWM; la del MCI al modificar el ángulo del servo que modifica la entrada de aire al carburador; e Híbrido MEBL-MCI modificando el ángulo del servo que cierra o abre la entrada de aire al carburador.
- Sistema microSD para almacenar datos de desempeño del sistema impulsor: distancia recorrida, velocidad del vehículo, consumo de gasolina, consumo de corriente, voltaje proporcionado, porcentaje de arrastre del MC sobre el MCI.

3. Resultados

Prototipo de propulsión híbrido

La figura 7 muestra el prototipo de propulsión híbrido construido en base al diagrama de figura 2. Se observa que el control se lleva a cabo por la placa de desarrollo Arduino Mega 2560. El MEBL es representado por un motor eléctrico de corriente directa de 5 V, y tiene instalado un encoder óptico para la medición indirecta de la velocidad.

Para representar el comportamiento del MCI se utiliza también un motor de corriente directa de 5 V. Un servomotor representa al carburador del motor por donde entra el aire y gasolina manteniendo a diversas cantidades de aire la apropiada relación estequiométrica de 14 a 1 de gasolina, este sistema será transferido al vehículo real para activar al carburador de manera electrónica, en donde el servo moverá al papalote o plato que a través del grado de apertura, fluye más o menos aire a través del tubo de Venturi entrando por lo mismo, más o menos gasolina, este sistema reemplazará al tradicional que emplea chicote para mover al plato del carburador.



Fuente: elaboración propia.

Figura 7 Prototipo de propulsión híbrido MEBL-MCI.

La etapa de potencia que controla los motores de corriente directa está conformada principalmente por un puente H L293. Para visualizar la información actual del sistema y sus parámetros se utiliza una pantalla LCD de 20x4 caracteres, la cual se conecta al Arduino por medio del bus I2C. Para el cambio de los parámetros del sistema de control se utiliza un selector principal tipo encoder, y dos selectores secundarios utilizando potenciómetros de 10 k Ω . La información del sistema se almacena en una tarjeta de memoria a través de un adaptador SD conectado a través del puerto SPI a la placa de Arduino.

La placa de Arduino Mega se programa convenientemente para realizar lo que se describe en la metodología. En este trabajo es de interés la arquitectura en paralelo, y solo se centra en analizar los resultados para este caso. De ahí que se establece una velocidad en el MCI, correspondiente a x_o en la ecuación 2. Esta velocidad debe ser igualada por la velocidad del MEBL, la cual corresponde a x en la ecuación 2.

Aplicación del control de velocidad

De inicio, se realizaron pruebas para estimar los valores más adecuados para los valores de las cotas x_a, x_b, x_c , así como los valores de $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ descritos en la ecuación 3. Después de llevar a cabo pruebas preliminares se observó un buen comportamiento con las cotas $x_a = 250 \text{ rad/s}$, $x_b = 150 \text{ rad/s}$ y $x_c = 10 \text{ rad/s}$; mientras que para los valores de $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$, se tuvo un mejor comportamiento con $\gamma_1 = 0.25$, $\gamma_2 = 0.03$ y $\gamma_3 = 0.008$.

Para verificar el comportamiento del sistema en lazo cerrado, utilizando el algoritmo de control propuesto, se realizaron 9 experimentos con distintas condiciones de

aceleración y velocidad de referencia del motor que representa al MCI. La respuesta al cabo de 3 segundos del motor que representa al MEB, tabla 1.

Tabla 1 Resultados obtenidos.

Condición de aceleración	Velocidad (rpm)	
	MCI	MEBL
+	500	505
+	900	900
+	1450	1450
+	1650	1650
-	1770	1770
-	1630	1630
-	930	930
-	420	420

Fuente: elaboración propia.

La condición de aceleración se refiere a la diferencia de velocidades, si $x - x_o > 0$, la condición de aceleración será “+”, y por otro lado, si $x - x_o < 0$, la condición de aceleración será “-”. Los resultados obtenidos muestran un buen comportamiento del sistema, logrando obtener la velocidad deseada en la mayoría de los casos con exactitud. Con esto, se puede validar el buen funcionamiento del sistema.

4. Discusión

El trabajo mostrado en este documento tiene como objetivo proponer y justificar un controlador que funcione adecuadamente para el igualar la velocidad del MEBL con el del MCI, para ello se desarrolló un prototipo que utilizó dos motores de CD que representan los motores MEBL y MCI. En el prototipo se tuvo un buen funcionamiento logrando igualar la velocidad en un tiempo menor a 3 segundos, sin embargo, dado que no se conocen las distintas dinámicas que aparecen en el funcionamiento de los motores MEBL y MCI no se puede concluir un buen desempeño del sistema en lazo cerrado en estos motores, aunque se esperaría tener un buen funcionamiento, ya que el prototipo resulta ser escalable.

Los datos mostrados por la tabla 1, muestra que la velocidad medida en rpm del motor que representa al MCI se reproduce en el motor que representa al MEBL, esto, a pesar de los cambios de velocidad, que bien podrían ser causados por la aceleración y desaceleración dados por el sistema generador de potencia. Los

cambios de aceleración podrían representar las condiciones que se dan en una conducción normal de un vehículo. En los experimentos realizados, se pudo observar que la velocidad del motor que representa al MEBL se igualó rápidamente a la del motor que representa al MCI con una respuesta factible dentro de un marco de tiempo que permita una respuesta de apoyo al MCI. Así mismo, estos resultados en conjunto con los mostrados por las figuras 4 y 5, que representan el comportamiento de la expresión matemática representativa del algoritmo, permiten establecer que el control de velocidad discreto en un sistema híbrido con arquitectura en paralelo, dispuesta acorde a la figura 7, logra igualar la velocidad, en rpm, del MEBL a las del MCI.

El control propuesto en ecuación 2 y con la mejora al utilizar distintos valores de γ como se muestra en ecuación 3, de acuerdo con las cotas de error podría tener un mejor desempeño al incluir una mayor cantidad de valores de γ , o al encontrar una dependencia de γ respecto al error definida por alguna función continua.

El control propuesto se probó en simulación y de forma experimental, sin embargo, resulta necesario hacer una validación analítica del controlador para entender mejor su funcionamiento. Al probar en simulación y experimentalmente con distintos de γ en el control propuesto en ecuación 2 se observa que se debe tener cuidado con la selección de este parámetro, ya que una mala selección puede llevar a que el sistema se comporte de forma inestable.

5. Conclusiones

La aplicación del control propuesto para la igualación de velocidad del motor que representa al MEBL con el que representa al MCI en el prototipo de propulsión híbrida mostró un buen funcionamiento, logrando igualar la velocidad con exactitud en un tiempo menor de tres segundos. Se espera que este prototipo sea escalable para su aplicación en un vehículo tubular arenoso tipo baja, lo cual permitiría tener un desempeño eficiente en cuanto al consumo de combustible y en la carga de las baterías del sistema eléctrico.

El control propuesto debe ser analizado analíticamente para establecer su alcance y limitaciones, y de esta forma validar su correcta aplicación.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Bosco Raj, J. L., y Beno, M. M. Modeling and Control of Parallel Hybrid Electric Vehicle Using Sea-Lion Optimization. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 35(2), 2023.
- [2] Chan, C. C. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, No. 95, Vol. 4, 704-718, 2007.
- [3] Cifuentes-Faura, J. European Union policies and their role in combating climate change over the years. *Air Qual Atmos Health*, No. 15, Vol. 8, 1333-1340, 2022.
- [4] Emadi, A. *Advanced Electric Drive Vehicles*. CRC Press. Primera edición. Boca Ratón, EE. UU., 2014.
- [5] Farhat, O., Khaled, M, Faraj, J., Hachem, F. Taher, R. y Castelain, C. A short recent review on hybrid energy systems: Critical analysis and recommendations. *Energy Reports*, vol. 8, 792-802, 2022.
- [6] Hu, X., Zhang, X., Tang, X., y Lin, X. Model predictive control of hybrid electric vehicles for fuel economy, emission reductions, and inter-vehicle safety in car-following scenarios. *Energy*, vol. 196, 117101, 2020.
- [7] Mahadika, P. y Subiantoro, A. Design of optimal controller for parallel hybrid electric vehicle based on shortest path algorithm. In *2019 International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)*, 118-123, 2019.
- [8] Mejía Cisneros, G., Ordoñez Casanova, E., y Trejo Mandujano, H. Tecnologías en los sistemas de propulsión híbridos: revisión de literatura. *RIDE Revista Iberoamericana Para La Investigación y El Desarrollo Educativo*, No. 12, Vol. 23, 2021.
- [9] Verma, V., Harish, V., Bhardwaj, R. Hybrid PI speed controllers for permanent magnet brushless DC motor. In *2012 IEEE 5th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, 1-5, 2012.
- [10] Vu, T. M., Moezzi, R., Cyrus, J., Hlava, J. y Petru, M. Parallel hybrid electric vehicle modelling and model predictive control. *Applied Sciences*, 11(22), 10668, 2021.

- [11] Ryohey, T., Hiroyuki, F., Shinobu, K., Masato, K., Hidekazu, Y., Kenichiro, G., y Tomohiro, M. Patente MX 2017015642 A. Mexico. 2018.
- [12] Xu, X., Zhao, J., Zhao, J., Shi, K., Dong, P., Wang, S. y Liu, X. Comparative study on fuel saving potential of series-parallel hybrid transmission and series hybrid transmission. *Energy Conversion and Management*, 252, 114970, 2022.
- [13] Yu, P., Li, M., Wang, Y. y Chen, Z. Fuel cell hybrid electric vehicles: A review of topologies and energy management strategies. *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 13, No. 9, 172, 2022.