

# Control Predictivo para Motores Síncronos de Imanes Permanentes en Sistemas de Electromovilidad

ELIZABETH DELGADILLO PEREZ<sup>1\*</sup>, FRANCISCO BELTRAN-CARBAJAL<sup>1</sup>, HUGO YAÑEZ-BADILLO<sup>2</sup>, DAVID SOTELO<sup>3</sup>, CARLOS SOTELO<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Ciudad de México, México.

<sup>2</sup>Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, Edo. de México, México.

<sup>3</sup>Tecnológico de Monterrey, Monterrey, México.

\*Autor de correspondencia: al2232800361@azc.uam.mx

**RESUMEN** El concepto de electromovilidad, que implica el uso de técnicas de propulsión eléctrica en lugar de combustibles fósiles, es crucial para reducir la contaminación, mitigar el cambio climático y disminuir los riesgos a la salud. Este estudio presenta un esquema de control predictivo basado en modelo para optimizar la velocidad de motores síncronos de imanes permanentes, mejorando así la eficiencia operativa y aumentando la autonomía energética de los vehículos eléctricos. A través de simulaciones numéricas, se valida el seguimiento de dos perfiles diferentes de referencia de velocidad, empleando interpolaciones lineales y polinomios de Bézier para planificar el movimiento entre puntos de operación. Los resultados muestran que el esquema de control propuesto permite al sistema seguir las trayectorias de referencia establecidas, reduciendo los esfuerzos de control y contribuyendo significativamente a la sostenibilidad y eficiencia de los vehículos eléctricos. Este trabajo destaca el potencial del control predictivo como una herramienta eficiente en los sistemas de electromovilidad.

**PALABRAS CLAVE**— Electromovilidad, vehículos eléctricos, motor síncrono de imanes permanentes, control predictivo.

## I. INTRODUCCIÓN

En México, el sector del transporte representa el mayor consumo energético (42.8%) [1], siendo el autotransporte responsable del 90% de este consumo, principalmente a través del uso de gasolinas y naftas (75.3%). En este contexto, es imperativo transitar hacia un modelo de movilidad justo y sostenible. En términos de emisiones de gases de efecto invernadero, el sector del transporte contribuyó con el 24.5% del total nacional en 2015 [2].

En México, es crucial abordar múltiples frentes para promover la electromovilidad. Entre ellos, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero emerge como prioritaria, requiriendo intervenciones que abarquen aspectos económico-administrativos, culturales, desarrollo tecnológico e innovación urbana y rural [3]. La electromovilidad se refiere al uso de vehículos que funcionan con energía eléctrica en lugar de combustibles fósiles como gasolina o diésel. Esta tendencia incluye una variedad de tecnologías y modos de transporte, como vehículos eléctricos de batería, bicicletas y autobuses eléctricos, entre otros [4].

Como componente clave en los esfuerzos globales para crear un sistema de transporte más sostenible y eficiente, la electromovilidad se centra en vehículos eléctricos, definidos como aquellos propulsados por uno o más motores eléctricos.

A diferencia de los vehículos tradicionales de combustión interna, que dependen de hidrocarburos como la gasolina y el diésel, los vehículos eléctricos son principalmente de dos tipos: híbridos, que pueden funcionar con energía eléctrica y combustibles fósiles, y totalmente eléctricos, que dependen exclusivamente de la electricidad.

Para lograr un avance significativo en la electromovilidad, es esencial enfocarse en los vehículos totalmente eléctricos, ya que estos evitan la generación de gases de efecto invernadero y contribuyen a reducir los índices de contaminación. Uno de los desafíos más destacados de la electromovilidad es la autonomía limitada. En este contexto, es crucial identificar los sistemas que consumen más energía y contribuyen a este problema, como es el caso del motor eléctrico del vehículo.

Los vehículos eléctricos requieren un motor eléctrico eficiente, que es el corazón del vehículo, responsable de su propulsión y movimiento. Por lo tanto, es necesario utilizar motores eficientes e implementar un control eficiente que mejore su rendimiento, satisfaga mejor las demandas del usuario y mejore su autonomía energética, es por ello sé que han implementado varios esquemas de control buscando mejorar el rendimiento de los motores eléctricos y minimizar las pérdidas [5, 6].

En el ámbito de la movilidad eléctrica, optimizar el control de los Motores Síncronos de Imanes Permanentes, es clave para mejorar su eficiencia y respuesta dinámica [7]. Investigaciones recientes han introducido técnicas innovadoras como el control de velocidad “Maximum Torque Per Ampere” mediante voltaje directo [8], que simplifica el sistema de control al eliminar lazos de corriente. Además, la planitud diferencial en Motor Síncrono de Reluctancia Asistido por Imanes Permanentes [9] y la lógica difusa tipo 2 adaptativa se destacan por su capacidad para adaptarse a variaciones y manejar incertidumbres sin sensores eléctricos [10], respectivamente, lo que optimiza el consumo energético y aumenta la robustez del sistema. Estos avances representan pasos significativos hacia sistemas de propulsión más eficientes y adaptativos para vehículos eléctricos.

Dentro de las ventajas de los motores eléctricos se encuentra que tienen menos partes móviles que los motores de combustión interna, lo que reduce el desgaste y, por lo tanto, el costo y la frecuencia del mantenimiento. No requieren cambios de aceite, filtros de aire ni bujías. También proporcionan torque instantáneo desde el momento en que se aplica energía, lo que resulta en una aceleración rápida y suave. Esto es especialmente útil para el rendimiento de los vehículos en situaciones de arranque y parada frecuente. Además, permite que otros sistemas, como el de la transmisión, sean más simples, reduciendo costos y mantenimientos en general. Por todo esto, para este caso de estudio se propone un motor síncrono de imanes permanentes, ya que presenta ventajas sobre otros tipos de motores.

El motor síncrono de imanes permanentes (PMSM) se utiliza ampliamente en aplicaciones industriales y automotrices debido a su eficiencia y densidad de potencia. Dentro de los vehículos eléctricos es considerablemente usado ya que frente a otros motores como el motor de inducción posee un mejor rendimiento y es posible una regulación de velocidad más precisa, otra cualidad es que tiene una gama de velocidades más amplia que la del motor de inducción y las pérdidas del motor síncrono de imanes permanentes son aproximadamente 15-20 % menores que las del motor de inducción [11].

El control preciso de la velocidad en estos motores es crucial para asegurar un rendimiento óptimo y respuestas rápidas ante cambios en las condiciones de operación [12]. No obstante, el diseño de controladores capaces de cumplir con estos requisitos presenta desafíos significativos, incluyendo la necesidad de seguimiento efectivo de trayectorias de referencia. El Control Predictivo Basado en Modelo (MPC) ha surgido como una estrategia prometedora para abordar estos desafíos. A diferencia de los métodos tradicionales, el MPC puede predecir el comportamiento del sistema y tener un óptimo seguimiento de la referencia.

En este trabajo, se desarrolla un esquema avanzado de control de velocidad basado en el control predictivo por modelo (MPC) para motores síncronos de imanes permanentes (PMSM). Se obtiene el modelo no lineal del sistema y se utiliza la linealización alrededor de un punto de equilibrio, para la implementación de la teoría MPC en el diseño de control de velocidad del motor. Los resultados de simulaciones numéricas, presentados en la Sección IV, validan la efectividad del esquema propuesto, mostrando mejoras significativas en el seguimiento de la referencia de velocidad y en la gestión de transiciones operativas.

## II. MODELO DEL SISTEMA

### A. MOTOR SINCRONO DE IMANES PERMANENTES

Los motores síncronos de imanes permanentes (PMSM) destacan por su eficiencia operativa y diseño innovador. Equipados con imanes permanentes en el rotor y electroimanes en el estator, estos motores generan un campo magnético giratorio que permite una rotación sincronizada del rotor con el campo del estator, optimizando así el uso energético. Son notables por su alta eficiencia, reduciendo las pérdidas energéticas en comparación con otros motores, lo que los hace ideales para vehículos eléctricos debido a su economía de energía y mejor desempeño. Además, su capacidad para controlar precisamente la velocidad y el torque mejora la experiencia de conducción, proporcionando un manejo más suave y seguro. Los PMSM son también más compactos y ligeros debido a su diseño simplificado y el uso de un rotor más pequeño, lo que reduce la inercia y permite respuestas rápidas a cambios dinámicos, crucial en condiciones de conducción exigentes. Finalmente, requieren menos mantenimiento que los motores convencionales, gracias a la ausencia de piezas como escobillas que se desgastan, extendiendo su vida útil y reduciendo los costos operativos [13].

### B. DINÁMICA DEL MOTOR SINCRONO DE IMANES PERMANENTES NO LINEAL

Se considera la dinámica en espacio de estados del modelo no lineal del motor síncrono de imanes permanentes, descrito en el marco  $d - q$  fijo en el rotor [14], como se representa en la Fig. 1. Este enfoque permite analizar detalladamente las interacciones dinámicas y las respuestas del sistema bajo diversas condiciones operativas, facilitando así la optimización del diseño y el control del motor.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \tau_L) \quad (1)$$

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \quad (2)$$

$$\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3 \quad (3)$$

Donde  $\mathbf{x} = [i_d, i_q, \omega] \in \mathbb{R}^3$  es el vector de estados y  $\mathbf{u} = [u_d, u_q] \in \mathbb{R}^2$  es el vector de entradas. La función vectorial  $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \tau_L)$  que describe la dinámica del sistema, está definida por:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \tau_L) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{L_q n_p}{L_d} i_q \omega + \frac{1}{L_d} u_d \\ -\frac{R_s}{L_q} i_q - \frac{L_d n_p}{L_q} i_d \omega - \frac{n_p \lambda_m}{L_q} \omega + \frac{1}{L_q} u_q \\ \frac{3n_p \lambda_m}{2J} i_q + \frac{3n_p (L_d - L_q)}{2J} i_d i_q - \frac{b}{J} \omega - \frac{1}{J} \tau_L \end{bmatrix} \quad (4)$$

Los parámetros se pueden observar en la [Tabla I](#).

Es crucial considerar que, en este sistema, los parámetros son constantes y conocidos, se desprecia la no linealidad magnética y los devanados están distribuidos de forma sinusoidal. La disposición sinusoidal de los devanados, como se describe en [15], se refiere a la forma en que las bobinas del estator están distribuidas espacialmente para generar un campo magnético que varía de manera sinusoidal en el espacio. En la práctica, en lugar de utilizar una sola bobina por polo, se emplean múltiples bobinas distribuidas en ranuras adyacentes, formando grupos de fases diseñados para aproximar una forma sinusoidal del flujo magnético. Esta configuración, fundamentada en [15], mejora el desempeño del motor al reducir las fluctuaciones de torque y las vibraciones, resultando en una operación más estable y silenciosa. Además, esta disposición minimiza el ruido acústico y mecánico, prolonga la vida útil de los componentes, y proporciona un torque constante y controlado, esencial para asegurar una respuesta y maniobrabilidad óptimas del vehículo en condiciones operativas variables.

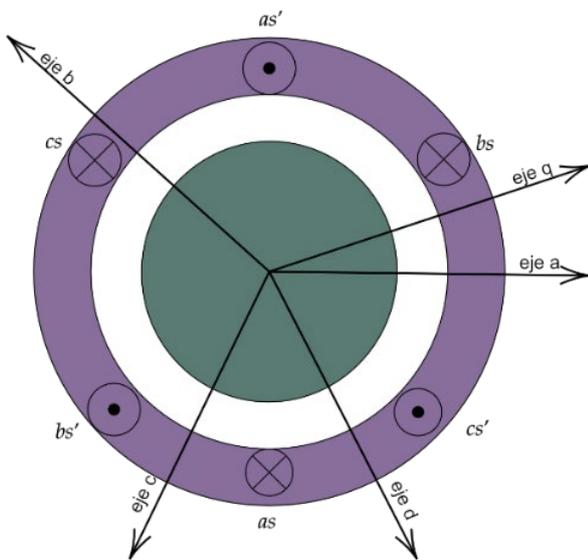


Fig. 1. PMSM en el marco de referencia del rotor.

TABLA I. PARÁMETROS DEL SISTEMA.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Velocidad angular	$\omega$	188.496	rad/s
Corriente en el eje directo	$i_d$	0	A
Corriente en el eje de cuadratura	$i_q$	15	A
Momento de inercia	$J$	0.1	kg · m <sup>2</sup>
Coefficiente de fricción	$b$	0.001	$\frac{\text{Nm}}{\text{rad/s}}$
Resistencia del estator	$R_s$	0.651	$\Omega$
Inductancia del eje directo	$L_d$	$22.1 \times 10^{-3}$	H
Inductancia del eje de cuadratura	$L_q$	$91.1 \times 10^{-3}$	H
Encadenamiento de flujo magnético del imán permanente	$\lambda_m$	0.6709	Wb
Número de polos	-	4	2 pares

### C. DINÁMICA DEL MOTOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES LINEAL

Considerando la aproximación lineal local de la dinámica no lineal del motor [Ec. \(1\)](#) en la vecindad del punto de equilibrio [Ec. \(5\)](#), se analiza el sistema en el espacio de estados [Ec. \(6\)](#) y [Ec. \(7\)](#) del motor síncrono de imanes permanentes descrito en el sistema de referencia  $dq$  fijado en el rotor como se puede apreciar en la [Fig. 1](#) [16].

$$\bar{\mathbf{x}} = [\bar{i}_d, \bar{i}_q, \bar{\omega}]^T \quad (5)$$

Con la matriz Jacobiana se obtiene la linealización del sistema. En el contexto del motor síncrono de imanes permanentes, esta matriz es una herramienta matemática esencial para transformar las ecuaciones de estado no lineales a una forma lineal cerca de un punto de equilibrio. La matriz Jacobiana se construye a partir de las derivadas parciales de las funciones del sistema con respecto a cada variable de estado, lo que permite representar la dinámica local del sistema de manera lineal. Este enfoque facilita el análisis y el diseño de controladores al proporcionar una aproximación lineal que captura las interacciones entre las variables de estado cerca del punto de equilibrio.

En particular, para el motor PMSM descrito en el sistema de referencia  $d - q$ , la matriz Jacobiana se obtiene evaluando las derivadas parciales de las ecuaciones de estado con respecto a las corrientes  $i_d$  y  $i_q$ , así como con respecto a la velocidad angular  $\omega$ . Este proceso resulta en un conjunto de ecuaciones lineales que aproximan el comportamiento del motor cerca del punto de equilibrio, como se muestra en la [Ec. \(5\)](#). Este modelo linealizado, descrito en las [Ecs. \(6\)](#) y [\(7\)](#) es crucial para el diseño de estrategias de control avanzadas, como el Control Predictivo Basado en Modelo (MPC), que requieren modelos lineales o linealizados del sistema para predecir y optimizar su comportamiento.

$$A = \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{L_q n_p}{L_d} \bar{\omega} & \frac{L_q n_p}{L_d} \bar{i}_q \\ -\frac{L_d n_p}{L_q} \bar{\omega} & -\frac{R_s}{L_q} & \alpha \\ \beta & \gamma & -\frac{b}{J} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$B = \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_d} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Donde:

$$\alpha = -\frac{n_p \lambda_m}{q} - \frac{L_d n_p}{L_q} \bar{i}_d$$

$$\beta = \frac{3}{2J} n_p (L_d - L_q) \bar{i}_q$$

$$\gamma = \frac{3}{2J} n_p \lambda_m + \frac{3}{2J} n_p (L_d - L_q) \bar{i}_d$$

### III. DISEÑO DE CONTROL

#### A. CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO

El Control Predictivo Basado en Modelo (MPC) es una clase de algoritmo de control que calcula un horizonte de predicción, es decir, una secuencia de perfiles de variables manipuladas utilizando un modelo lineal o no lineal de la planta para optimizar un criterio, generalmente cuadrático, sujeto a perturbaciones lineales o no lineales [17,18]. Se caracteriza por tener cuatro pilares importantes que son: el modelo, el horizonte de predicción, la optimización y el control, que ayudan a formar una metodología para implementar el MPC.

#### B. METODOLOGÍA DEL MPC

- Se toma un instante de decisión  $k$ , en el cual medimos el estado de nuestro sistema.
- Se calcula las secuencias de acción futura que minimicen las acciones de control.
- Solo se aplica la primera acción de control que se llamara “acción de control óptima” durante el periodo  $[k, k + 1]$ .
- Después del instante  $k$ , se mide el estado y se repite el proceso.

Todo esto es necesario para predecir el resultado, en la función de costo evaluada de cada posible secuencia de futuras acciones y de escoger la mejor de ellas.

#### C. HORIZONTE DE PREDICCIÓN

La predicción del comportamiento del sistema en el futuro puede ser hecho uno o múltiples pasos hacia el futuro como se expresa en la Ec. (8).

$$\mathbf{x}(k + 1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) \quad (8)$$

Donde:

- $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$  es el vector de estados.
- $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^{n_u}$  es el vector de la entrada de control.

Para diseñar el horizonte de predicción, se debe contar con el vector de acciones de control futuras  $\tilde{\mathbf{u}}(k)$ , dado que se trata de un sistema de múltiples entradas según el modelo del motor PMSM, descrito en las Ecs. (6) y (7), entonces el vector de entradas puede presentarse como:

$$\tilde{\mathbf{u}}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{u}(k) \\ \mathbf{u}(k + 1) \\ \vdots \\ \mathbf{u}(k + 1 - N) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N-n_u} \quad (9)$$

Al ser un sistema multivariable se hace una concatenación de vectores entre acciones de control futuras y las entradas, como se muestra en la Ec. (10).

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{n_u} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Una vez obtenido el vector de acciones futuras se establece la trayectoria de estados que está representada por la Ec. (11) y depende de la Ec. (12), es importante resaltar que esto es el resultado de  $\tilde{\mathbf{x}}(k)$  [19].

$$\tilde{\mathbf{x}}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k + 1) \\ \mathbf{x}(k + 2) \\ \vdots \\ \mathbf{u}(k + N) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N-m} \quad (11)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

Entonces se puede definir que toda la trayectoria de estado  $\tilde{\mathbf{x}}(k)$  depende de:

$$\tilde{\mathbf{x}}(k|\tilde{\mathbf{u}}) = \mathbf{x}(\mathbf{x}(k), \tilde{\mathbf{u}}, \tau, N) \quad (13)$$

El modelo dinámico del sistema expresado en tiempo discreto, se describe mediante la Ec. (14) y Ec. (15):

$$\mathbf{x}(k + 1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \quad (14)$$



$$Q_u = \beta \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros de sintonización.

#### IV. RESULTADOS

Para evaluar la capacidad del enfoque de control propuesto, se realizaron simulaciones numéricas de dos casos de estudio, donde se emplearon perfiles distintos de velocidad de referencia. En el primero, se obtuvo la respuesta del sistema empleando un perfil trapezoidal para realizar la transición entre dos puntos de operación.

Aquí, se utilizó una interpolación lineal definida por dos puntos de operación  $q_0$  y  $q_1$  como se muestra en la Fig. 3 considerando la siguiente relación:

$$q(t) = a_0 + a_1 t \quad (28)$$

por lo tanto, al considerar los puntos  $q_0$  y  $q_f$  y el tiempo inicial  $t_0$  y tiempo final  $t_f$ , se tiene:

$$q_0(t) = a_0 + a_1 t_0 \quad (29)$$

$$q_f(t) = a_0 + a_1 t_f \quad (30)$$

que puede expresarse de manera matricial como,

$$M \mathbf{a} = \mathbf{q} \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & t_0 \\ 1 & t_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_f \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\mathbf{a} = M^{-1} \mathbf{q} \quad (33)$$

Entonces, se propone la primera transición entre dos condiciones operativas definidas bajo el siguiente esquema:  $q_0(t) = 0$  rad/s,  $q_f(t) = 188.5$  rad/s,  $t_0 = 2$  s y  $t_f = 10$  s. Por su parte, la segunda transición está definida por:  $q_0(t) = 188.5$  rad/s,  $q_f(t) = 0$  rad/s,  $t_0 = 22$  s y  $t_f = 32$  s, permaneciendo 12 segundos en el punto de operación  $\omega^* = 188.5$  rad/s entre ambas transiciones, como se observa en la Fig. 4. En esta figura,  $\omega^*$  es la velocidad angular deseada o de referencia que se espera alcanzar y mantener durante el intervalo, mientras que  $\omega$  corresponde a la velocidad angular real del motor. La gráfica muestra cómo  $\omega$  sigue de cerca a  $\omega^*$ , lo que refleja el desempeño del controlador al minimizar el error de seguimiento.

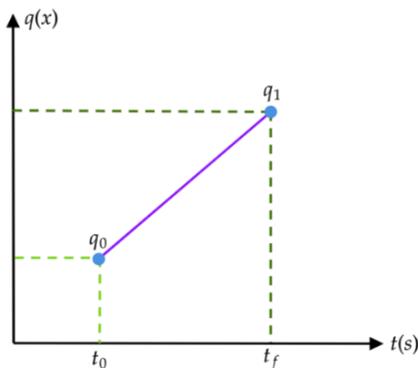


Fig. 3. Esquema de interpolación.

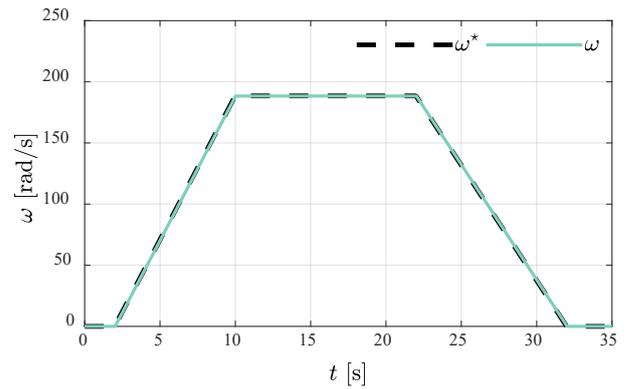


Fig. 4. Regulación de la velocidad del motor PMSM, caso 1.

En las Figs. 5 y 6. se presentan los voltajes en el eje de cuadratura ( $u_q$ ) y en el eje directo ( $u_d$ ), respectivamente. Estos voltajes son generados por el controlador MPC para regular la velocidad del motor. Observe cómo el controlador ajusta los valores de ( $u_q$ ) y ( $u_d$ ), en respuesta a las demandas del sistema, garantizando que la velocidad del motor siga de manera precisa la referencia establecida. Este comportamiento demuestra que el controlador MPC propuesto permite realizar el control de velocidad de manera satisfactoria, minimizando el error de seguimiento y manteniendo la estabilidad del sistema.

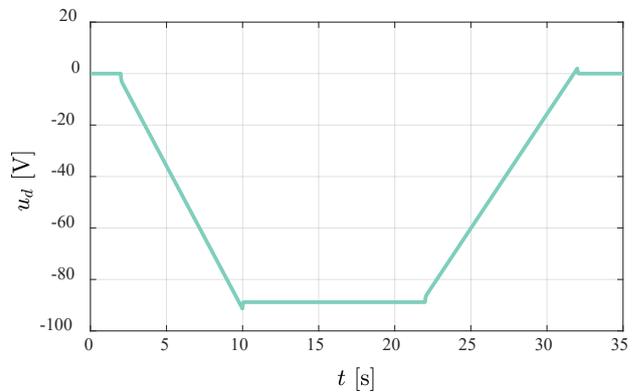


Fig. 5. Entrada de voltaje en el eje directo, caso 1.

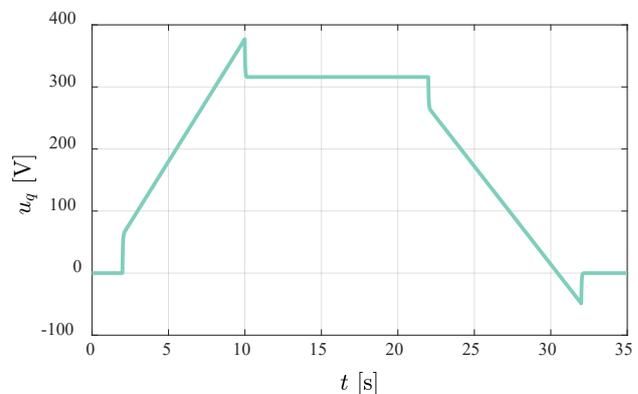


Fig. 6. Entrada de voltaje en el eje de cuadratura, caso 1.

Para el segundo caso de estudio, se emplearon interpolaciones utilizando polinomios de Bézier, que están definidos de la siguiente manera:

$$\omega^* = \begin{cases} \Gamma_0 & 0 \leq t < T_1 \\ \Gamma_0 + (\Gamma_f - \Gamma_0)B_z(t, T_1, T_2) & T_1 \leq t \leq T_2 \\ \Gamma_f & t > T_2 \end{cases} \quad (34)$$

donde  $\Gamma_0$  es el valor inicial y  $\Gamma_f$  el valor final de la velocidad angular del PMSM. Por otro lado,  $T_1$  es el tiempo en segundos cuando inicia la transición y  $T_2$  es el tiempo en segundos cuando finaliza la transición. Se tiene entonces,

$$B_z = (t, T_1, T_2) = \sum_{k=0}^n b_k \left( \frac{t-T_1}{T_2-T_1} \right)^k \quad (35)$$

Con  $b_1 = 252$ ,  $b_2 = 1050$ ,  $b_3 = 1800$ ,  $b_4 = 1575$ ,  $b_5 = 700$  y  $b_6 = 126$ .

Para realizar la primera transición se definieron los parámetros de la siguiente forma:  $\Gamma_0 = 0$  rad/s,  $\Gamma_f = 188.5$  rad/s,  $T_1 = 2$ s y  $T_2 = 10$ s. Mientras tanto para la segunda operación se consideró lo siguiente:  $\Gamma_0 = 188.5$  rad/s,  $\Gamma_f = 0$  rad/s,  $T_1 = 22$ s y  $T_2 = 32$ s. Cabe destacar, que al igual que en el primer caso, el sistema fue permaneció 12 segundos en el punto de operación  $\omega^* = 188.5$  rad/s entre ambas transiciones, como se observa en la Fig. 7.

En la Fig. 7, se muestra la respuesta del sistema utilizando el esquema de control propuesto, nótese que el sistema realiza un seguimiento aceptable de la referencia de velocidad, lo cual beneficiaría de manera implícita al desplazamiento que el sistema de electromovilidad requiera realizar.

En las Figs. 8 y 9, se observan las entradas de voltaje en los ejes de transformación. Nótese, que, en ambos casos de estudio, el sistema tiene un desempeño aceptable a pesar de que se sometió a transiciones diferentes. Sin embargo, en el segundo caso de estudio se visualiza un mejor desempeño, en cuanto a la magnitud de las entradas de control, ya que son menos abruptas en contraste con el primer caso de estudio, lo que beneficiaría un movimiento suave para el sistema de electromovilidad.

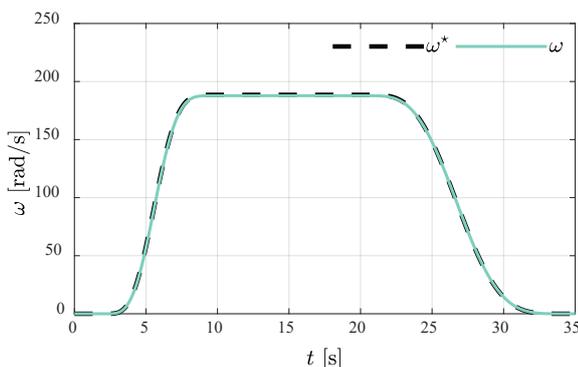


Fig. 7. Regulación de la velocidad del motor PMSM, caso 2.

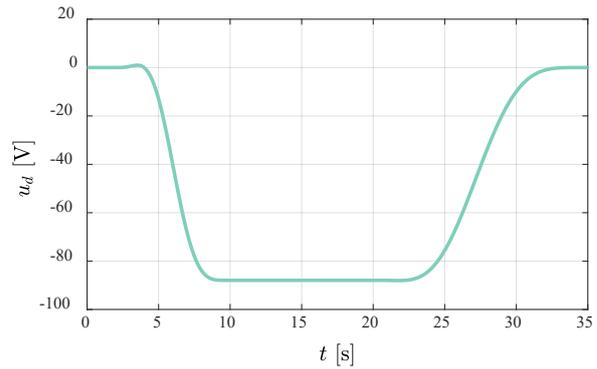


Fig. 8. Entrada de voltaje en el eje directo, caso 2.

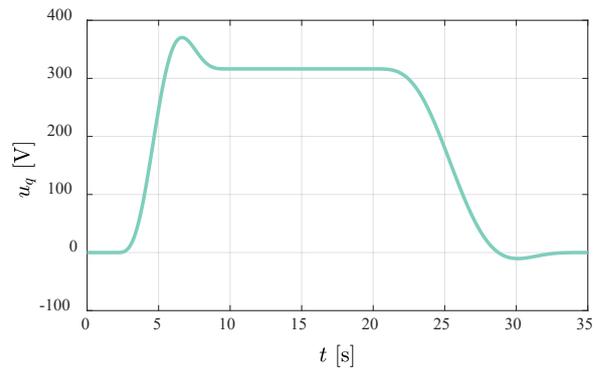


Fig. 9. Entrada de voltaje en el eje de cuadratura, caso 2.

## V. DISCUSIÓN/ CONCLUSIÓN

La electromovilidad se ha consolidado como una tendencia clave para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y avanzar hacia un futuro sostenible. En este trabajo, se propuso un esquema de control predictivo por modelo para regular la velocidad de un motor síncrono de imanes permanentes, optimizando su rendimiento en aplicaciones de electromovilidad. Los resultados de las simulaciones numéricas demuestran la capacidad del sistema para seguir de manera precisa la referencia de velocidad, utilizando técnicas de suavización como interpolaciones lineales y polinomios de Bézier. Este enfoque no solo mejora la autonomía energética del vehículo, sino que también garantiza un desempeño más seguro y eficiente. Las directrices del trabajo de investigación están alineadas con el control predictivo por modelo utilizando el modelo no lineal, así como la incorporación de algoritmos inteligentes como las redes neuronales y los algoritmos de optimización bioinspirados, para potencializar el desempeño del sistema.

## REFERENCIAS

- [1] Secretaría de Energía, Subsecretaría de Planeación y Transición Energética, Dirección General de Planeación e Información Energéticas. (2020). Balance Nacional de Energía 2019. Gobierno de México. 16/07/2024 Available: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/618408/20210218\\_BNE.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/618408/20210218_BNE.pdf)
- [2] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2018). Informe de indicadores: Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (2018a). Gobierno de México. 17/07/2024. [Online] Available: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>

- [3] Dirección de Programas Nacionales Estratégicos en Energía y Cambio Climático, Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías. Movilidad Sustentable. 17/07/2024. Available: <https://conahcyt.mx/category/pronoces-energia-y-cambio-climatico/>
- [4] Fournier, G. (2017). The New Mobility Paradigm. Transformation of Value Chain and Value Proposition Through Innovations. In: Attias, D. (eds) The Automobile Revolution. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-45838-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45838-0_3)
- [5] H. Yañez-Badillo, F. Beltran-Carbal, I. Rivas-Camero. A. Favela-Contreras, J. Arroyo-Núñez y J. Balderas-Gutiérrez, "Enhanced Output Tracking Control for Direct Current Electric Motor Systems Using Bio-Inspired Optimization," *Machines*, vol. 11, no. 1006, pp. 1-27, Nov. 2023. Consultado en: Octubre, 10, 2024, DOI: 10.3390/machines11111006.
- [6] F. Beltran-Carbajal, R. Tapia-Olvera, I. Lopez-García, A. Valderrabano-Gonzalez, J. Rosas-Caro y J. Hernandez-Avila "Extended PI Feedback Tracking Control for Synchronous Motors," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 17, no. 6, pp. 1346-1358, 2019. Consultado en: Octubre, 10, 2024, DOI: 10.1007/s12555-018-0312-6.
- [7] F. Beltran-Carbajal, R. Tapia-Olvera, A. Valderrabano-Gonzalez, H. Yañez-Badillo, J. Rosas-Caro y J. Mayo-Maldonado "Closed-loop online harmonic vibration estimation in DC electric motor systems," *Elsevier*, vol. 9, no. 6, pp. 123, Jun. 2021. Consultado en: Octubre, 10, 2024, DOI: 10.3390/machines9061023.
- [8] M. Alzayed y H. Chaoui, "Direct Voltage MTPA Speed Control of IPMSM-Based Electric Vehicles," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 33858-33871, Abr. 2023. Consultado en: Oct., 9, 2024, DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3263815.
- [9] S. Sriprang, N. Poonnoy, D. Guilbert, B. Nahid-Mobarakeh, N. Takorabet, N. Bizon, y P. Thounthong, "Design, Modeling, and Differential Flatness Based Control of Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor for e-Vehicle Applications," *Sustainability*, vol. 13, no. 17, pp. 9502, Ago. 2021. Consultado en: Oct., 9, 2024, DOI: 10.3390/su13179502.
- [10] H. Chaoui, M. Khayamy, y A. A. Aljarboua, "Adaptive Interval Type-2 Fuzzy Logic Control for PMSM Drives with a Modified Reference Frame," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, aceptado para publicación, DOI: 10.1109/TIE.2017.2650858.
- [11] J. Trashorras, "Elementos básicos", en *Vehículos eléctricos*. Madrid, España: Paraninfo, 2019, ch 1, pp 14. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=FMqWdWAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- [12] F. Beltran-Carbajal, H. Yañez-Badillo, D. Galvan-Perez, I. Rivas-Camero, D. Sotelo y C. Sotelo "B-Spline Artificial Neural Networks in Robust Induction Motor Control," *IEEE Access*, vol. 2024, July 2024. Consultado en: Octubre, 10, 2024, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3430323.
- [13] J. Carreño-Hernandez, "Comparativa de motores AC implementados sobre un vehículo eléctrico de batería," Tesis de Maestría, Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Universidad Politécnica de Valencia., Valencia, España, 2022.
- [14] P. Kraus, O. Wasynczuk, S. Sudhoff y S. Pekarek, "Permanent-Magnet AC Machines," en *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, Tercera edición. Hoboken, New Jersey, USA.: John Wiley & Sons, 2013, #4, pagina 121.
- [15] T. Wildi, "Diseño de Máquinas Eléctricas," en *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*, 6ta ed. Naucalpan de Juárez, México: Pearson Educación de México, 2007, capítulo 13, sección 1, páginas 347-374.
- [16] F. Beltran-Carbajal, A. Favela-Contreras, J. L. Hernandez-Avila, O. Olvera-Tapia, D. Sotelo y C. Sotelo, "Dynamic output feedback control for desired motion tracking on synchronous motors" *Int Trans ElectrEnerg Syst*, 2020;30:e12260. Consultado en: 07, 18, 2024, DOI: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12260>.
- [17] E. Camacho y C. Bordons, "Model Predictive Controllers," en *Model Predictive Control*, Segunda edición. Londres, UK. : Springer-Verlag, 2003, #2, 423 paginas.
- [18] L. Wang, "Discrete-time MPC for Beginners," en *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®*, Primera edición. Natick, USA: Springer-Verlag, 2009, #2, 403 páginas.
- [19] D. Sotelo, A. Favela, V. Kalashnikov y C. Sotelo, "Model Predictive Control with a Relaxed Cost Function for Constrained Linear Systems," *Hindawi*, 2020, Artículo ID 7485865, 10 paginas, Mar, 2020. Consultado en: 08, 05, 2024, DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/7485865>, [Online].

## BIOGRAFÍAS



ELIZABETH DELGADILLO PEREZ Ingeniera Mecatrónica por el TecNM: Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco (2022). Actualmente se encuentra realizando sus estudios de posgrado en la Maestría de Ciencias de la Ingeniería Electromagnética en la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco. Sus líneas de interés son la optimización de sistemas mecatrónicos y el control de máquinas eléctricas con aplicación en sistemas de electromovilidad.



FRANCISCO BELTRAN CARBAJAL Ingeniero Electromecánico por el Instituto Tecnológico de Zacatepec (1993) y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en la especialidad de Mecatrónica por el CINVESTAV-IPN (2004). Actualmente es Profesor-Investigador Titular C por Tiempo Indeterminado en el Departamento de Energía de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Sus principales áreas de interés en investigación, innovación y desarrollo tecnológico son: Control de Vibraciones, Identificación de Sistemas, Maquinaria Rotatoria, Mecatrónica y Control de Sistemas de Conversión de Energía.



HUGO YAÑEZ BADILLO Ingeniero en Robótica (2012), Maestro en Ingeniería con especialidad en Automatización y Control (2015) y Doctor en Optomecatrónica (2020) por la Universidad Politécnica de Tulancingo. Actualmente es profesor investigador en el TecNM: Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco. Dentro de las áreas de interés en investigación y desarrollo tecnológico destacan el diseño e implementación experimental y mediante simulación de controladores automáticos, sistemas embebidos para sistemas mecatrónicos. etc.



DAVID SOTELO Recibió el título de Ingeniero en Mecatrónica del Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, México, en 2010; el título de Maestría en Sistemas, Control e I&T de la Université Joseph Fourier, Grenoble, Francia, en 2014; y el título de Maestría en Ingeniería de Automatización y Control, así como el de Doctorado, del Tecnológico de Monterrey, en 2015 y 2019, respectivamente. Actualmente, está adscrito al Grupo de Investigación en Robótica del Tecnológico de Monterrey.



CARLOS SOTELO Recibió el título de Ingeniero en Mecatrónica del Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, México, en 2010; el título de Maestría en Sistemas, Control e I&T de la Université Joseph Fourier, Grenoble, Francia, en 2014; y el título de Maestría en Ingeniería de Automatización y Control, así como el de Doctorado, del Tecnológico de Monterrey, en 2015 y 2019, respectivamente. Actualmente, está adscrito al Grupo de Investigación en Robótica del Tecnológico de Monterrey.