

DESEMPEÑO DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO EN SIMULACIÓN SOFTWARE-IN-THE-LOOP CON EL CICLO DE CONDUCCIÓN US06

*PERFORMANCE OF AN ELECTRIC VEHICLE IN SOFTWARE-IN-
THE-LOOP SIMULATION WITH THE US06 DRIVING CYCLE*

Nike Alan López Navarrete

Instituto Politécnico Nacional, México
nlopezn1800@alumno.ipn.mx

Jaime José Rodríguez Rivas

Instituto Politécnico Nacional, México
jjrodriguezr@ipn.mx

Oscar Carranza Castillo

Instituto Politécnico Nacional, México
ocarranzac@ipn.mx

Fidel Pérez Carmona

Instituto Politécnico Nacional, México
fperezc1501@alumno.ipn.mx

Rubén Ortega González

Instituto Politécnico Nacional, México
rortegag@ipn.mx

Nelson Leonardo Díaz Aldana

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
nldiaza@udistrital.edu.co

César Leonardo Trujillo Rodríguez

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
cltrujillo@udistrital.edu.co

Recepción: 22/enero/2026

Aceptación: 30/abril /2026

Resumen

El creciente interés por los vehículos eléctricos demanda herramientas eficientes para el desarrollo y validación de sistemas de control. En este trabajo se presenta la implementación de una simulación Software-in-the-Loop (SIL) en tiempo real, desarrollada e integrada como un banco de pruebas para un sistema de tracción de

vehículo eléctrico basado en un motor síncrono de imanes permanentes (MSIP). El ciclo de conducción US06 se emplea como escenario de prueba con el fin de evaluar el desempeño del control de velocidad y par electromagnético bajo condiciones de aceleración y cargas variables. La metodología incluye el modelado matemático del sistema de tracción, su integración en un entorno SIL en tiempo real y la ejecución del ciclo US06 para analizar su respuesta dinámica. Los resultados muestran un seguimiento preciso de la velocidad de referencia, con un error absoluto medio (MAE) de 4.77 RPM, confirmando la estabilidad y fidelidad del sistema simulado.

Palabras Clave: Simulación en tiempo real, sistema de tracción, Software-in-the-Loop, vehículo eléctrico.

Abstract

The growing interest in electric vehicles demands efficient tools for the development and validation of control systems. This work presents the implementation of a real-time Software-in-the-Loop (SIL) simulation, developed and integrated as a test bench for an electric vehicle traction system based on a permanent magnet synchronous motor (PMSM). The US06 driving cycle is employed as a test scenario to evaluate the performance of speed and electromagnetic torque control under acceleration and variable load conditions. The methodology includes the mathematical modeling of the traction system, its integration into a real-time SIL environment, and the execution of the US06 cycle to analyze its dynamic response. The results show an accurate tracking of the reference speed, with a mean absolute error (MAE) of 4.77 RPM, confirming the stability and fidelity of the simulated system.

Keywords: *Electric vehicle, real-time simulation, Software-in-the-Loop, traction system.*

1. Introducción

El incremento en la demanda de vehículos eléctricos y de motores de alto rendimiento, junto con la necesidad de industrias más eficientes y los avances en energías renovables, ha impulsado el desarrollo de sistemas de control cada vez

más complejos basados en electrónica de potencia. Uno de los principales desafíos para los ingenieros que diseñan estos sistemas es garantizar que los controladores funcionen correctamente cuando se implementen en la planta o en el sistema físico. Esto es esencial para introducir el producto al mercado en el menor tiempo posible. Implementar un controlador en un sistema físico para evaluar su funcionamiento y respuesta ante diferentes estímulos resulta costoso y demanda mucho tiempo. Por esta razón, se han desarrollado nuevas técnicas que permiten diseñar y probar controladores sin necesidad de implementarlos directamente en el sistema real. A partir de esta necesidad surgen las simulaciones en tiempo real.

Las simulaciones en tiempo real permiten reducir los costos asociados al desarrollo y validación de sistemas de control. Esto se debe a diversos factores, entre ellos la disminución de horas hombre para la creación de prototipos físicos, la reducción del riesgo de daño en la planta o en los elementos de potencia, y la posibilidad de realizar pruebas en un entorno seguro y controlado. Además, estas simulaciones posibilitan ejecutar escenarios de validación sin requerir el hardware físico, lo que resulta especialmente útil en entornos industriales donde detener la producción no es viable. También permiten replicar condiciones extremas o fallas que serían peligrosas o costosas de generar en un sistema real, contribuyendo así a un proceso de diseño más robusto y seguro [Vasiliu, 2012].

Las simulaciones en tiempo real son técnicas ya establecidas que permiten diseñar y evaluar diversos sistemas de control en diversos campos de la ingeniería. A diferencia de una simulación puramente computacional basada únicamente en modelos matemáticos, estas simulaciones pueden o no incorporar componentes físicos reales como microcontroladores, actuadores o relevadores de protección que interactúan directamente con un modelo virtual de la planta ejecutado en un simulador en tiempo real. Esto con el fin de obtener resultados más realistas del comportamiento del sistema en condiciones reales de operación.

Hace aproximadamente 40 años, una de las primeras aplicaciones de las simulaciones en tiempo real fue en sistemas de guía de misiles. Poco después, la NASA comenzó a implementarlas en el desarrollo de tecnología aeronáutica, utilizándolas para estudiar conceptos como vuelo por cable y estabilidad estática

reducida. En tiempos recientes, este tipo de simulaciones ha ganado popularidad en diversos ámbitos. En la industria automotriz, por ejemplo, se utilizan para el control de sistemas de tracción, frenos ABS, sistemas de suspensión y otros subsistemas de vehículos. Además, las simulaciones en tiempo real se aplican de manera importante en robótica y en sistemas de potencia.

En la literatura reciente se han reportado avances importantes en la aplicación de entornos SIL y HIL para el análisis de sistemas de tracción eléctrica. Por ejemplo, Kasr et al. [2024] presentan un esquema de validación en tiempo real de un motor síncrono de imanes permanentes, combinando técnicas de control robusto con un entorno HIL. Sajnani [2024] propuso una plataforma SIL para estandarizar y virtualizar el tren motriz eléctrico, mientras que Li et al. [2022] desarrollaron un marco de simulación basado en “digital twins” para analizar el desempeño de trenes motrices con múltiples controladores. De manera complementaria, Soni [2023] describió un entorno SIL enfocado en la validación de controladores de motor en vehículos virtuales.

Si bien estos trabajos muestran avances significativos, aún presentan limitaciones: algunos se enfocan en configuraciones parciales del tren motriz, otros no consideran ciclos de conducción estandarizados como el US06, y varios no integran el modelo de motor síncrono de imanes permanentes en un entorno SIL en tiempo real.

Existen diversas estrategias de simulación en tiempo real que pueden aplicarse según los objetivos de las pruebas y la etapa de desarrollo del sistema de control. Entre las más utilizadas se encuentran Software-In-the-Loop (SIL), Rapid Control Prototyping (RCP) y Hardware-In-the-Loop (HIL). Cada una de ellas permite validar diferentes aspectos del sistema, desde el nivel puramente algorítmico hasta la interacción con componentes físicos de potencia.

La simulación Software-In-the-Loop (SIL) es la primera etapa de validación del sistema de control. En esta configuración, tanto el modelo del controlador como el de la planta se ejecutan en un mismo entorno de simulación. Su principal objetivo es verificar la correcta implementación del algoritmo de control, asegurando que las ecuaciones, estructuras de decisión y parámetros funcionen según lo esperado antes de emplear hardware físico. Además, permite analizar el rendimiento del

sistema de control, detectar errores lógicos y comparar distintas estrategias de control bajo condiciones idénticas de simulación, sin riesgo de dañar equipos.

La estrategia Rapid Control Prototyping (RCP) se aplica en las etapas intermedias del desarrollo del sistema de control, cuando el algoritmo ya ha sido validado en simulación, pero aún no se ha implementado en el hardware definitivo. En este enfoque, el controlador se ejecuta en un simulador en tiempo real, el cual se conecta físicamente a la planta real mediante canales de señales analógicas y digitales. Esto permite evaluar el comportamiento del algoritmo de control en condiciones reales de operación, analizando aspectos como la respuesta dinámica, los retardos de comunicación y la robustez frente a perturbaciones externas. La principal ventaja de la RCP es que permite realizar ajustes en los parámetros del controlador de forma rápida, antes de su implementación en el dispositivo final, reduciendo significativamente el tiempo y el riesgo asociados al desarrollo de sistemas embebidos de control.

La técnica Hardware-In-the-Loop (HIL) representa un paso más avanzado, ya que incorpora el controlador final o su versión definitiva en hardware, conectado a un simulador en tiempo real que ejecuta el modelo dinámico de la planta. En este esquema, el simulador genera señales analógicas y digitales que imitan el comportamiento del sistema físico, mientras que el controlador responde como lo haría en una implementación real. De esta forma, se pueden realizar pruebas exhaustivas bajo diferentes condiciones operativas (incluyendo fallas o variaciones abruptas) sin poner en riesgo los equipos reales. La simulación HIL es especialmente útil para validar la lógica de control, probar interfaces de comunicación y verificar la robustez del sistema antes de su implementación final.

Una simulación es una representación del funcionamiento, operación o las características de un sistema mediante el uso de otro sistema. Para este propósito, los elementos de un sistema deben ser modelados adecuadamente para que a través de un software de simulación digital pueda ser representado el sistema.

Existen dos tipos de simulación digital, el primero denominado simulación fuera de línea (Offline Simulation) y el segundo es la simulación en tiempo real (Real Time Simulation). Para la simulación en tiempo real generalmente se ocupan

simulaciones en tiempo discreto y con un paso de integración constante, comúnmente conocidas como simulación de paso de tiempo fijo (fixed time-step simulation).

En una simulación en tiempo discreto, el tiempo de cómputo necesario para calcular todas las variables del sistema puede ser más largo o corto que la duración del paso de integración de la simulación. En ambos casos se trata de una simulación fuera de línea, ya que el tiempo de cómputo no es relevante. La velocidad en que se resuelve un sistema depende del poder computacional que el simulador digital tenga disponible y de la complejidad del modelo matemático del sistema. Típicamente el objetivo de una simulación fuera de línea es obtener el resultado lo más rápido posible.

Un “overrun” ocurre cuando el simulador en tiempo real no es capaz de resolver todas las operaciones para obtener las variables del sistema en el paso de integración indicado y se considera que la simulación en tiempo real es errónea [Strasser, 2015].

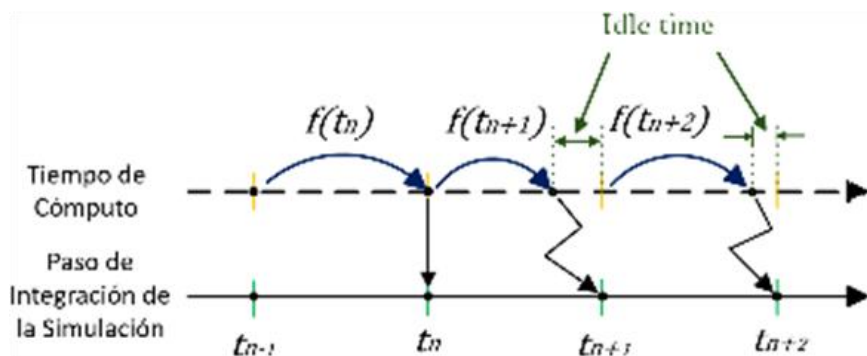
Por el contrario, en una simulación en tiempo real, los resultados de las variables del sistema deben calcularse y estar disponibles en el mismo tiempo que lo haría su homólogo físico. Es decir, el modelo debe replicar no solo el comportamiento del sistema, sino también su temporalidad, garantizando que cada paso de simulación se ejecute en sincronía con el tiempo real [Argüello, 2016; Bélanger, 2010].

En la Figura 1 se muestran los tiempos de una simulación en tiempo real, se observa que a pesar de que los resultados se calculan más rápido, se añade un tiempo muerto para que los resultados estén sincronizados con el paso de integración de la simulación. Esto le permite al simulador interactuar con sistemas físicos (como microcontroladores o relevadores de protección), a través de sus entradas y salidas en una configuración Hardware-In-the-Loop. Por lo tanto, se puede decir que una simulación es en tiempo real si los resultados son precisos, es decir, casi idénticos al sistema físico real, están sincronizados con el paso de integración de la simulación y no generan overruns.

En una simulación en tiempo real del tipo Software-In-the-Loop (SIL) tanto el sistema de control como la planta son simulados dentro del simulador y pueden

comunicarse entre sí a través de señales dentro de la propia simulación o a través de señales física analógicas y digitales a través de los canales del simulador, esta última configuración es particularmente útil para analizar problemas que puedan existir en la comunicación y envío de información entre estos sistemas. Se utiliza el tipo de simulación SIL principalmente para realizar pruebas, detectar y corregir errores en el sistema de control en sus primeras etapas de desarrollo, también se utiliza con la finalidad de desarrollar el mejor software posible antes de que sea integrado en el hardware [Han, 2011].

En la Figura 2 se muestra la configuración de una simulación SIL, conformada por una estación de trabajo y el simulador en tiempo real. A través de la estación de trabajo se carga el modelo hacia el simulador, también a través de ella se pueden modificar variables mientras se está ejecutando la simulación en tiempo real.



Fuente: [Strasser, 2015].

Figura 1 Simulación en tiempo real.



Fuente: elaboración propia.

Figura 2 Configuración de una simulación SIL.

2. Métodos

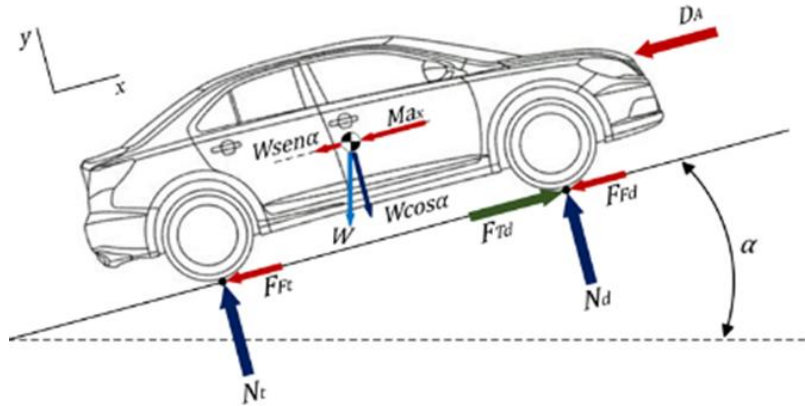
En este artículo se implementa una simulación SIL para evaluar el desempeño de un sistema de control para un sistema de tracción de un vehículo eléctrico en sus fases iniciales de desarrollo. Para evaluar el desempeño del sistema de control se implementa el ciclo de conducción US06, el cual es un ciclo de conducción estándar con varias pendientes de aceleración, desaceleración y momentos en donde el vehículo permanece estático. Se analiza la graficas de velocidad desarrollada y la gráfica del par electromagnético desarrollado por la máquina de tracción.

Para determinar la potencia y el par electromagnético que debe desarrollar el motor de un vehículo eléctrico, se realiza un análisis de todas las fuerzas que intervienen en su movimiento. La fuerza que transmite la potencia hacia el suelo a través de los neumáticos se conoce como fuerza de tracción total; esta fuerza debe ser mayor a las fuerzas que se oponen al movimiento del vehículo, además el sistema de propulsión que está a bordo debe ser capaz de generar la potencia necesaria para vencer la resistencia al movimiento del vehículo. Haciendo un análisis de estas fuerzas se obtiene el modelo matemático de la dinámica del vehículo, y con ello se calcula la fuerza de tracción necesaria para alcanzar una cierta velocidad. Esta fuerza de tracción debe ser referida al eje del motor para realizar de manera adecuada el control del motor que está integrado en el vehículo.

Con ayuda del diagrama de cuerpo libre de un vehículo eléctrico (Figura 3) se realiza un análisis de las fuerzas que se contemplan en la dinámica de tracción del vehículo. De la Figura 3, N_d y N_t son las fuerzas normales del eje delantero y trasero, respectivamente. F_{Fd} y F_{Ft} son las fuerzas de resistencia a la rodadura del eje delantero y trasero, respectivamente, D_A es la fuerza de arrastre aerodinámico, Ma_x es la fuerza inercial; W es el peso del vehículo y de él se derivan $Wsen\alpha$ y $Wcos\alpha$ que son las componentes en x y y del peso del vehículo respectivamente, donde α es el ángulo de la pendiente del camino. Por último, F_{Td} es la fuerza de tracción delantera del vehículo [Fadul, 2018; Gao, 2007; Sharma, 2021].

Analizando solo las fuerzas en el eje x de la Figura 3, se observa que existen 5 vectores de fuerza que se oponen al movimiento del vehículo, los cuales tienen que ser contrarrestados por el vector de la fuerza de tracción delantera del vehículo

(F_{Td}). Cabe aclarar que para este caso de estudio se analiza un vehículo de tracción delantera.



Fuente: [Pérez, 2025].

Figura 3 Diagrama de cuerpo libre de un vehículo eléctrico.

Aplicando la segunda ley de Newton sobre el eje x del diagrama y considerando que $a_x = dv/dt$, se obtiene la Ecuación 1; al despejar F_{Td} se obtiene la Ecuación 2.

$$M \frac{dv}{dt} = F_{Td} - (F_{Fd} + F_{Ft} + D_A + W \sen \alpha) \quad (1)$$

$$F_{Td} = M \frac{dv}{dt} + F_{Fd} + F_{Ft} + D_A + W \sen \alpha \quad (2)$$

La Ecuación 2 expresa la fuerza de tracción necesaria para mover al vehículo eléctrico. A través de todo un análisis matemático en donde se contempla la transmisión mecánica y la dinámica del eje del motor se llega a la Ecuación 3, donde se muestra el par de la dinámica del vehículo referido al eje de la MSIP [Pérez, 2025]. La primera sección de la Ecuación 3 integra los elementos que generan una resistencia al movimiento cuando existe una aceleración, mientras que la segunda sección integra los elementos que generan resistencia cuando el vehículo va a velocidad constante.

$$T_c = \left(J_m + \frac{J_r}{i_g^2 i_0^2 \eta_t} + \frac{M r_d^2}{i_g^2 i_0^2 \eta_t} \right) \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{r_d}{i_g i_0 \eta_t} \left(M g f_r \cos \alpha + \frac{\rho C_D A r_d^2}{2 i_g^2 i_0^2} \omega_m^2 + M g \sen \alpha \right) \quad (3)$$

Donde:

T_c : Par de carga debido a la dinámica del vehículo.

J_m : Momento de inercia referido al eje del motor.

J_r : Momento de inercia de la rueda motriz.

i_g : Relación de transmisión.

i_0 : Relación de engranajes finales.

η_t : Eficiencia de la transmisión.

M : Masa total del vehículo.

r_d : Radio de la rueda.

ω_m : Velocidad angular de la máquina de tracción.

g : Aceleración de la gravedad.

f_r : Coeficiente de resistencia a la rodadura.

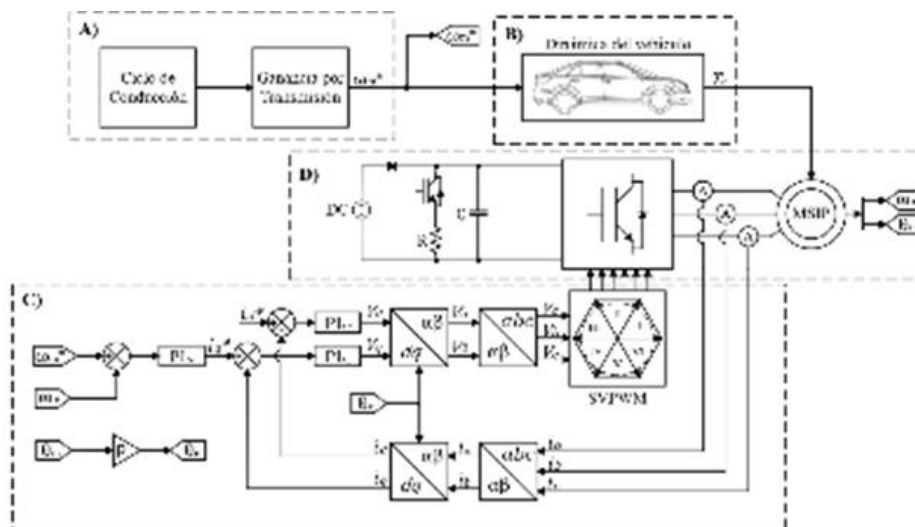
ρ : Densidad del aire.

C_D : Coeficiente de arrastre.

A : Área frontal del vehículo.

En la Figura 4 se muestra el esquema general del sistema propuesto, este sistema está formado principalmente por 4 elementos, los cuales son:

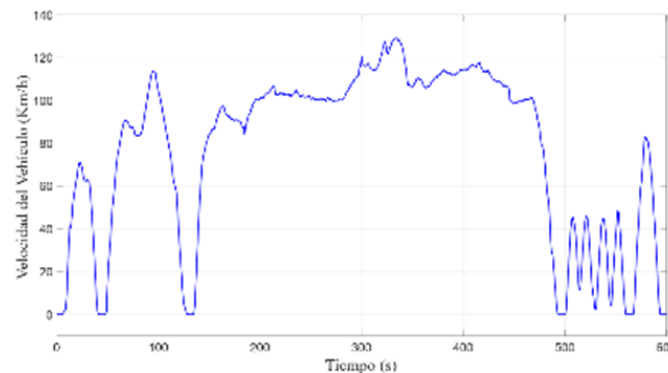
- La velocidad de referencia de la MSIP.
- La dinámica del vehículo.
- El sistema de control.
- La etapa de potencia.



Fuente: elaboración propia.

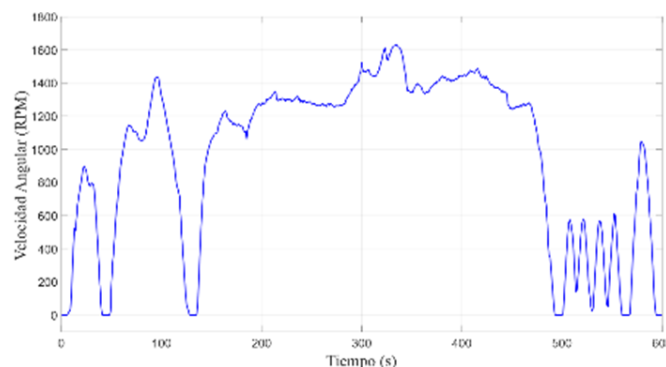
Figura 4 Diagrama general del sistema propuesto.

La velocidad de referencia de la MSIP está determinada por ciclo de conducción considerado (US06), el cual se muestra en la Figura 5. Este perfil de manejo estandarizado fue desarrollado por la Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos para evaluar el desempeño de los vehículos bajo condiciones de conducción agresivas. Se caracteriza por aceleraciones rápidas, velocidades elevadas y cambios frecuentes de velocidad. Tiene una duración de 600 s y representa escenarios suburbanos exigentes, lo que lo convierte en una prueba adecuada para validar sistemas de control en condiciones dinámicas y realistas. El cumplimiento de este ciclo es importante para fabricantes de vehículos que buscan certificaciones de emisiones y eficiencia energética, ya que permite comparar el rendimiento de distintos vehículos bajo un estándar reconocido internacionalmente. En la Figura 6 se muestra la velocidad de referencia de la MSIP en *RPM*, la cual se obtiene aplicando una ganancia por transmisión al ciclo de conducción US06.



Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Ciclo de conducción US06.



Fuente: elaboración propia.

Figura 6 Velocidad de referencia de la MSIP del ciclo de conducción US06.

La dinámica del vehículo está determinada por la Ecuación 3, en donde a partir de la velocidad angular de la máquina de tracción se calcula el par de carga, debido a la dinámica del vehículo, por ende, es el par que se le suministra a la flecha de la MSIP.

El sistema de control que se le aplica a la MSIP se lleva a cabo mediante la técnica de control vectorial, también conocida como control por campo orientado (FOC, por sus siglas en inglés: Field-Oriented Control). Esta técnica permite controlar de manera independiente el flujo magnético y el par electromagnético desarrollado por la máquina. Para poder aplicarlo, se deben transformar las variables trifásicas (abc), al marco de referencia síncrono (dq) utilizando las transformadas de Clarke y Park. En este marco de referencia, el control se aplica de manera más sencilla y eficiente. La componente de corriente en el eje d se ajusta para controlar el flujo magnético de la máquina; sin embargo, en el caso de una MSIP esta corriente generalmente se mantiene en cero, ya que el flujo del rotor es generado por los imanes permanentes. Por otro lado, el par electromagnético de la MSIP es proporcional a la componente de corriente en el eje q , por lo que esta corriente se emplea para controlar el par que desarrolla la máquina [Santini, 2014].

Los parámetros de los controladores de corriente en el eje d y q y los parámetros del controlador de velocidad que fueron implementados en este trabajo son mostrados en la Tabla 1 y la Tabla 2, respectivamente.

Tabla 1 Parámetros de los controladores de corriente.

Parámetro	Valor
Frecuencia de cruce	1,000 Hz
Margen de fase	70°
Ganancia proporcional	15.048
Ganancia integral	3.802×10^4

Fuente: elaboración propia

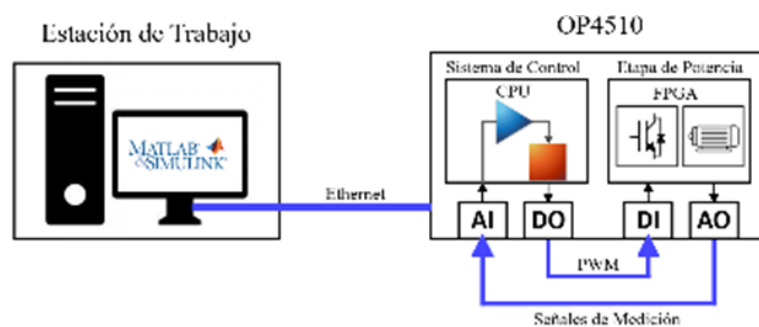
Tabla 2 Parámetros del controlador de velocidad.

Parámetro	Valor
Frecuencia de cruce	30 Hz
Margen de fase	75°
Ganancia proporcional	0.228
Ganancia integral	11.392

Fuente: elaboración propia

La etapa de potencia del sistema de tracción del vehículo eléctrico está conformada por una fuente de corriente directa que representa la batería del vehículo. El freno dinámico está compuesto por un IGBT con un diodo en antiparalelo y una resistencia en serie, a través de la cual se disipa el excedente de energía cuando la MSIP opera en modo generador. El inversor utilizado corresponde a una configuración trifásica de dos niveles tipo VSI (Voltage Source Inverter), implementado mediante seis interruptores IGBT con sus respectivos diodos en antiparalelo conectados en puente completo trifásico. Este inversor es accionado mediante modulación por ancho de pulso por vector espacial (SVPWM, Space Vector Pulse Width Modulation), técnica que permite un mejor aprovechamiento del voltaje del bus de continua. Su función es suministrar los voltajes adecuados a la MSIP, encargada de proporcionar la potencia mecánica necesaria para el sistema de tracción del vehículo eléctrico.

En la Figura 7 se presenta el esquema general de simulación Software-In-the-Loop (SIL) implementada en este trabajo. El sistema se compone de dos secciones principales: la estación de trabajo y el simulador OP4510, los cuales se comunican entre sí mediante una conexión Ethernet.



Fuente: elaboración propia.

Figura 7 Esquema de simulación SIL aplicada en el OP4510.

La estación de trabajo está conformada por una computadora personal integrada con el software RT-LAB. Este entorno permite el desarrollo de los modelos en Matlab/Simulink, así como, su supervisión y control cuando están siendo ejecutados. También se encarga de compilar, cargar y ejecutar los modelos en el simulador en tiempo real, al igual que a través de este software se configuran las entradas y salidas del simulador.

Por otra parte, se cuenta con un simulador en tiempo real OP4510, el cual está integrado con procesadores multinúcleo Intel de alta gama, así como, con una FPGA Xilinx Kintex 7, lo que permite realizar simulaciones con alta capacidad de procesamiento utilizando pasos de integración del orden de microsegundos e incluso nanosegundos. Esto lo convierte en una herramienta ideal para maximizar la precisión en aplicaciones de sistemas electrónicos de potencia. En el simulador es donde se ejecutan los modelos desarrollados en Matlab/Simulink. En el caso de la simulación SIL, el sistema de control se ejecuta en la CPU del simulador, utilizando un paso de integración de $50\ \mu s$. La etapa de potencia, por otro lado, se ejecuta en la FPGA del simulador, con un paso de integración de $225\ ns$, debido a que se requieren pasos de integración muy pequeños para representar de manera precisa la dinámica del sistema de potencia.

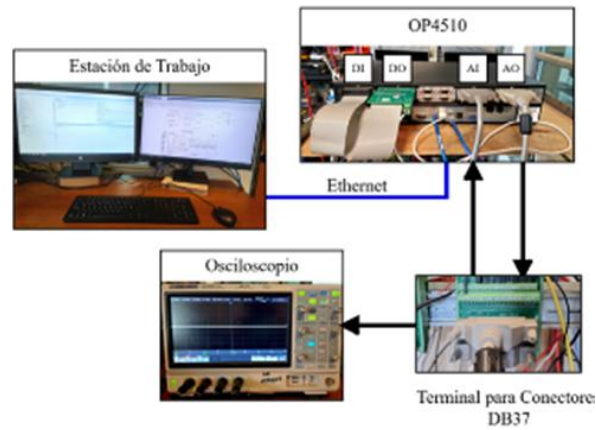
Estos dos subsistemas, el control y la etapa de potencia, se comunican entre sí a través de los canales de entrada y salida, tanto analógicas como digitales. Esto se hace con la finalidad de representar de forma realista la comunicación entre el control y la etapa de potencia. Por una parte, el sistema de control genera señales PWM para accionar el inversor, y se miden las variables necesarias en la etapa de potencia, para aplicar el control.

En la Figura 8 se muestra un esquema de la plataforma experimental que se implementó para el desarrollo de la simulación en tiempo real SIL. Esta plataforma experimental está conformada por la estación de trabajo, el simulador en tiempo real OP4510, una terminal para conectores DB37 y un osciloscopio.

La estación de trabajo consta de una computadora personal integrada con el software RT-LAB, en donde se crean, se configuran y se cargan los proyectos en el simulador.

La planta se modela en el simulador en tiempo real OP4510, mientras que la etapa de potencia mencionada anteriormente se modela mediante la herramienta eHS. Asimismo, en el mismo simulador se modela el sistema de control a través de bloques de Matlab/Simulink junto con bloques adicionales que permiten la comunicación y configuración del simulador. Ambos sistemas se comunican a través de señales analógicas y digitales. La terminal de conectores DB37 tiene como

objetivo permitir que las señales analógicas de salida generadas por el simulador (como velocidad de la MSIP y par electromagnético de la MSIP) puedan ser retroalimentadas al propio simulador y visualizadas en un osciloscopio.



Fuente: elaboración propia.

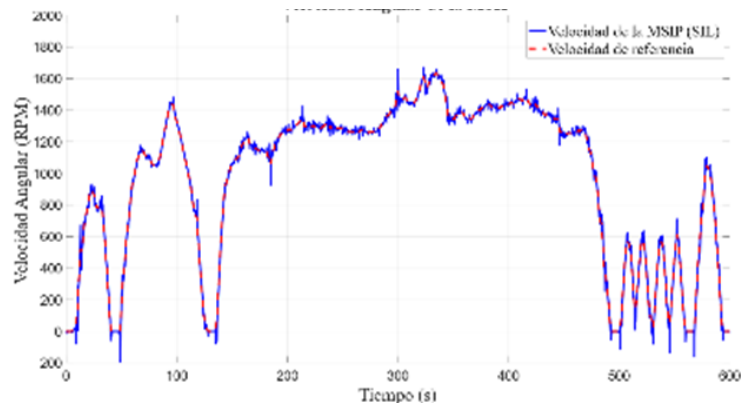
Figura 8 Plataforma experimental de la simulación SIL.

3. Resultados

Una vez implementada la simulación SIL se obtuvieron las gráficas de velocidad desarrollada y el par electromagnético desarrollado por la máquina síncrona de imanes permanentes (MSIP). En la Figura 9 se muestra la curva de la velocidad desarrollada por la MSIP durante el ciclo de conducción US06. La curva en azul representa la velocidad de la MSIP, mientras que la curva discontinua en rojo corresponde a la velocidad de referencia derivada del ciclo de conducción. Se observa que la velocidad de la MSIP sigue adecuadamente la referencia a lo largo de todo el ciclo de conducción. Se presentan ligeros sobreimpulsos en los instantes donde ocurren cambios bruscos en la velocidad y el par de carga debido a la dinámica del vehículo eléctrico. No obstante, el sistema de control logra estabilizar la velocidad de la máquina tras cada perturbación, recuperando con precisión el seguimiento de la referencia.

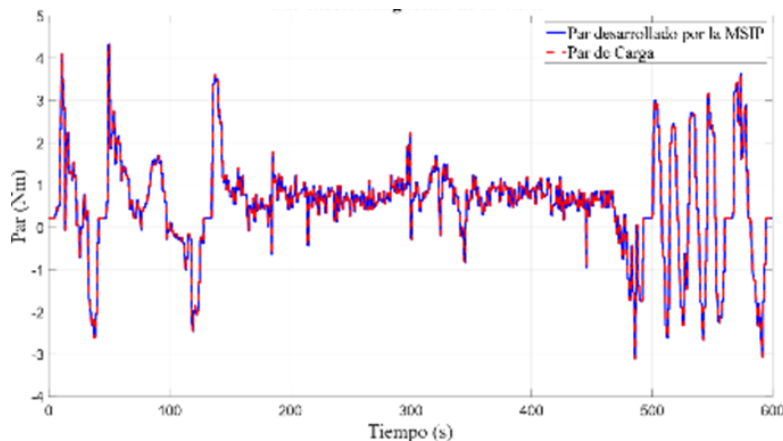
En la Figura 10 se muestra el par electromagnético desarrollados por la MSIP a lo largo del ciclo de conducción. La curva azul representa el par desarrollado por la MSIP, mientras que la curva discontinua en rojo corresponde con el par de carga impuesto por la dinámica del vehículo eléctrico.

Se observan variaciones abruptas del par debido a las exigencias de aceleración y frenado propias del perfil US06, reflejadas en picos de par tanto positivos como negativos. A pesar de estas condiciones dinámicas, el par desarrollado por la máquina logra seguir con precisión al par de carga, lo cual demuestra una respuesta transitoria eficaz del sistema de control.



Fuente: elaboración propia.

Figura 9 Velocidad angular de la MSIP durante el ciclo de conducción US06.



Fuente: elaboración propia.

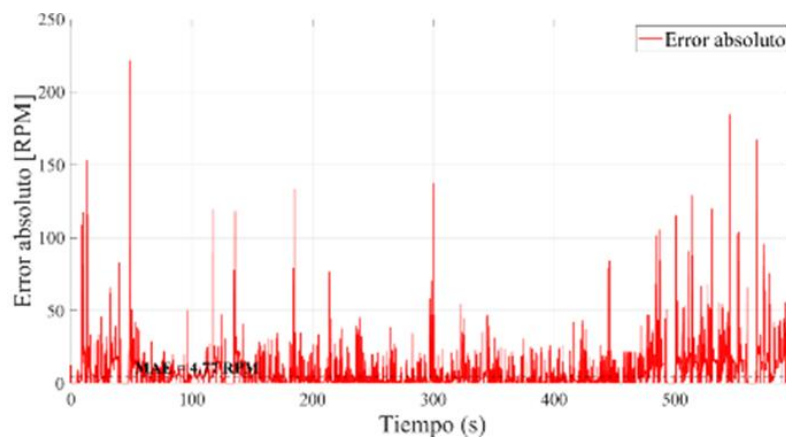
Figura 10 Par electromagnético de la MSIP durante el ciclo de conducción US06.

4. Discusión

Los resultados obtenidos evidencian un desempeño satisfactorio del sistema de control implementado en la simulación Software-In-the-Loop (SIL). La velocidad angular de la máquina sigue de forma precisa la velocidad de referencia a lo largo de los 600 *segundos* del ciclo de conducción. En las secciones con aceleración

constante, ambas señales prácticamente se superponen, lo que indica un error de seguimiento cercano a cero. Durante las transiciones rápidas como el arranque desde el reposo o los incrementos bruscos de velocidad del vehículo (aproximadamente en 50 s, 130 s y 500 s) se observan sobreimpulsos transitorios con magnitudes entre 50 *RPM* y 200 *RPM*. Estos picos se atenúan rápidamente, lo que demuestra un tiempo de establecimiento corto y una adecuada capacidad de rechazo ante perturbaciones. En conjunto, el comportamiento dinámico observado confirma que el controlador implementado es robusto y mantiene un seguimiento de referencia preciso, incluso bajo condiciones de aceleración variable.

En la Figura 11 se presenta el error absoluto de velocidad de la MSIP, junto con el valor del MAE, el cual fue de 4.77 *RPM*, corroborando la precisión del control en todo el ciclo de conducción.



Fuente: elaboración propia

Figura 11 Error absoluto de la velocidad de la MSIP durante el ciclo de conducción US06.

5. Conclusiones

La implementación de la simulación Software-in-the-Loop (SIL) para el sistema de tracción de un vehículo eléctrico demostró ser una herramienta eficaz para evaluar el desempeño de estrategias de control bajo condiciones de aceleración y carga variables, representadas mediante el ciclo de conducción US06. El sistema de control mantuvo un seguimiento preciso de la velocidad de referencia durante los 600 s de la prueba, con un error absoluto medio (MAE) de 4.77 *RPM* y errores estacionarios prácticamente nulos. Los sobreimpulsos transitorios observados

durante los cambios abruptos de aceleración presentaron magnitudes entre 50 *RPM* y 200 *RPM*, y se atenuaron rápidamente, evidenciando un tiempo de establecimiento corto y una alta capacidad de rechazo ante perturbaciones.

Esta metodología permite identificar y caracterizar el comportamiento dinámico del sistema antes de su implementación física, lo que contribuye a reducir riesgos, tiempos y costos asociados a pruebas experimentales. En conjunto, los resultados obtenidos confirman la robustez, precisión y viabilidad de la técnica SIL como etapa previa para el desarrollo, validación y optimización de sistemas de control aplicados a vehículos eléctricos.

6. Referencias y Bibliografía

- [1] Argüello, G., Cepeda, J., Echeverría, D., Falcones, S., Layana, J., Desafíos en la implementación de un laboratorio de simulación digital en tiempo real de sistemas eléctricos de potencia. *Revista Técnica energía*, No. 1, Vol. 12, pp. 239-250, Quito, enero 2016.
- [2] Bélanger, J., Venne, P., Paquin, J. N., The What, Where and Why of Real-Time Simulation, *Planet RT*, Vol. 1, No. 1, pp. 25-29, Enero 2010.
- [3] Fadul, S., Aris, I., Misron, N., Halin, I., Iqbal, A., Modelling and Simulation of Powertrain System for Electric Car, *Journal of the Society of Automotive Engineers Malaysia*, Vol. 2, No. 1, pp. 23-34, 2018.
- [4] Gao, D., Mi, C., Emadi, A., Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 95, No. 4, pp. 729-745, Abril 2007.
- [5] Han, S., Choi, S., Kwon, W., Real-Time Software-in-the-Loop Simulation for Control Education, *International Journal of Innovative Computing*, Vol. 7, No. 11, pp. 6369-6382, Noviembre 2011.
- [6] Kasri, A., Ouari, K., Belkhier, Y., Bajaj, M., Zaitsev, I., Optimizing Electric Vehicle Powertrains Peak Performance with Robust Predictive Direct Torque Control of Induction Motors: A Practical Approach and Experimental Validation, *Scientific Reports*, Vol. 14, No. 11217303, pp. 1-15, Abril 2024.
- [7] Li, K., Wang, Z., Chen, M., SIL-based Validation of Traction Control Strategies for Electric Vehicles, *Applied Sciences*, Vol. 12, No. 18, pp. 1-12, 2022.

- [8] Pérez, F., Rodríguez, J., Ortega, R., Carranza, O., Memije, D., Peralta, E., Electric Traction Emulator System. *IEEE Access*, Vol. 13, pp. 47794-47804, Nueva York, 2025.
- [9] Sajnani, A., Vernekar, K., Gosavi, R., Naik, V., Electric Powertrain – Standardization of Adaptable Software in Loop System, *SAE Technical Paper* 2024-26-0117, 2024.
- [10] Santini, N., Catuogno, G., Magaldi, G., Implementación de un Control Vectorial de una Máquina Síncrona de Imanes Permanentes, Octubre 2014.
- [11] Sharma, A., Nusrat, R., Bhuiya, M., Youssef, M., Hardware-in-the-loop validation of different power train topologies' models in electric vehicles: A plug-and-play capability. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, Vol. 2, pp. 365-376, Nueva York, 2021.
- [12] Soni, Jatin, SIL Setup for Motor Controller Testing in Virtual Vehicle Environments, *International Journal of Engineering and Computer Science*, Vol. 12, Issue 09, pp. 25862-25885, September 2023.
- [13] Strasser, T., Real-Time Simulation Technologies for Power Systems Design, Testing, and Analysis, *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, Vol. 2, pp. 63-73, June 2015.
- [14] Vasiliu, C., Vasile, N., Hardware-in-the-loop simulation for electric powertrains. *Revue Roumaine des Sciences Techniques – Électrotechnique et Énergétique*, No. 2, pp. 212–221, Bucarest, 2012.