



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**ESTRATEGIA DE CONTROL ROBUSTO POR
H INFINITO PARA SISTEMAS DE POTENCIA
POR BATERIAS DE HEVS USANDO CO-
SIMULACIÓN PLECS Y MATLAB/SIMULINK**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: EDGAR FABIAN CAIZALUISA ORTIZ

TUTOR: LEONY ORTIZ MATOS

Quito -Ecuador
2024


**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Edgar Fabian Caizaluisa Ortiz con documento de identificación N° 1727511329 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 22 de marzo del año 2024

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, reading "Edgar Caizaluisa", is written over a horizontal dashed line.

Edgar Fabian Caizaluisa Ortiz

1727511329

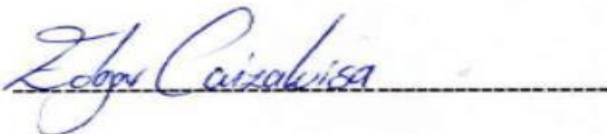
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Edgar Fabian Caizaluisa Ortiz con documento de identificación No. 1727511329, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico : “Estrategia de Control Robusto por H Infinito para Sistemas de Potencia por Baterías de HEVs usando co-simulación PLECS y Matlab / Simulink ”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 22 de marzo del año 2024

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, reading "Edgar Caizaluisa", is written over a horizontal dashed line.

Edgar Fabian Caizaluisa Ortiz

1727511329

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Leony Ortiz Matos con documento de identificación N° 1754230389, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ESTRATEGIA DE CONTROL ROBUSTO POR H INFINITO PARA SISTEMAS DE POTENCIA POR BATERIAS DE HEVS USANDO CO-SIMULACIÓN PLECS Y MATLAB / SIMULINK, realizado por Edgar Fabian Caizaluisa Ortiz con documento de identificación N° 1727511329, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 22 de marzo del año 2024

Atentamente,



Ing. Leony Ortiz Matos, Ph. D

1754230389

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico.....	5
2.1	Disposición de un HEVs	6
2.1.1	Sistemas encargados de producir energía eléctrica.....	6
2.2	Sistemas de Baterías para HEVs.....	7
2.2.1	Principios básicos de funcionamiento de una batería	7
2.2.2	Categorías de acumuladores eléctricos.....	8
2.2.3	Ventajas de las baterías	8
2.2.4	Desventajas de las baterías.....	9
2.3	Estrategias de control.....	9
2.3.1	Control PID	9
2.3.2	Control H-infinito	9
2.3.3	Control por deslizamiento.....	11
2.3.4	Control basado en observadores robustos	11
2.4	Sistema controlador para vehículos eléctricos	12
2.4.1	Modo eléctrico	12
2.4.2	Modo Híbrido.....	12
2.4.3	Modo de carga de batería	13
2.4.4	Mecanismo regulador del sistema	13
2.5	Sensores en los vehículos eléctricos	14
3	Planteamiento del problema	14
4	Caso de estudio.....	16
4.1	Modelo de espacio de estados	17
5	Resultados esperados	18
5.1	Control H-Inf: Torque del motor	20
5.2	Control H-Inf: Velocidad del motor	20
5.3	Control H-Inf: Velocidad del generador	20
5.4	Control H-Inf: Voltaje en la barra de DC	21
5.5	Control H-Inf: Batería SOC.....	21
5.6	Control H-Inf: Torque vs Velocidad.....	22
6	Conclusiones.....	22
7	Referencias.....	23
7.1	Matriz de Estado del Arte	28
7.2	Resumen de Indicadores.....	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Elementos principales de un Vehículo Eléctrico Híbrido.....	5
Figura 2. Vehículo Eléctrico Híbrido.....	5
Figura 3. Tipos de baterías para Vehículos Eléctricos Híbridos.....	8
Figura 4. Representación gráfica del sistema de control H_{∞}	10
Figura 5. Tipos de driver para Vehículos Eléctricos Híbridos.....	12
Figura 6. Ingreso del controlador H_{∞} al sistema.....	15
Figura 7. Sistema de Potencia de los Vehículos Eléctricos Híbrido.....	17
Figura 8. Señal del H_{∞} en comparación con el PI.....	19
Figura 9. Señal del Torque del Motor en comparación entre el controlador H_{∞} y el controlador PI.....	19
Figura 10. Señal del Velocidad del Motor en comparación entre el controlador H_{∞} y el controlador PI.....	20
Figura 11. Señal del Velocidad del Generador en comparación entre el controlador H_{∞} y el controlador PI.....	20
Figura 12. Señal del Voltaje en barra DC en comparación entre el controlador H_{∞} y el controlador PI.....	21
Figura 13. Señal del Batería SOC en comparación entre el controlador H_{∞} y el controlador PI.....	21
Figura 14. Señal de Torque vs Velocidad en comparación entre el controlador H_{∞} y el controlador PI.....	21
Figura 15. Indicador de Temática.....	35
Figura 16. Indicador de Formulación del Problema.....	35
Figura 17. Indicador de Solución Propuesta.....	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de HEVs.....	6
Tabla 2: Parámetros de las Baterías	9
Tabla 3: Descripción de variables y funciones.....	15
Tabla 4: Algoritmo H_{∞}	15
Tabla 5: Comparación del bucle cerrado.....	19
Tabla 6: Comparación de la Velocidad del Motor.	19
Tabla 7: Comparación de la Velocidad del Generador	20
Tabla 8: Comparación de la Voltaje barra DC.....	21
Tabla 9: Matriz estado del Arte.....	28

ESTRATEGIA DE CONTROL ROBUSTO POR H_{∞} PARA SISTEMAS DE POTENCIA POR BATERIAS DE HEVS USANDO CO-SIMULACIÓN PLECS Y MATLAB/SIMULINK

Resumen

El presente artículo propone un sistema de Control Robusto basado control H_{∞} para Sistemas de Potencia por Baterías de Vehículos Eléctricos Híbridos. La estrategia de control propuesta fue validada usando co-simulación digital mediante PLECS y Matlab / Simulink. La novedosa estrategia diseñada busca mejorar el rendimiento dinámico y mejorar la robustez del sistema de control para regular la velocidad del motor eléctrico, la velocidad del generador y el estado de carga de las baterías. El Vehículos Híbrido serie-paralelo estudiado como caso de estudio, incorpora un convertidor CC/CC, y un sistema de batería modelado mediante un modelo de resistencia única y dos máquinas síncronas de imanes permanentes con controladores específicos se integran para regular la velocidad del motor. Finalmente, este trabajo incorpora una comparación del rendimiento dinámico entre un controlador PI y el método por H_{∞} desarrollado para validar la propuesta.

Palabras Clave: Control Robusto, Vehículos Eléctricos Híbridos, Control H_{∞} , Sistema de Potencia Eléctrica, Sistema de almacenamiento de Energía de la batería.

Abstract

This paper proposes a Robust Control system based on H_{∞} control for Hybrid Electric Vehicle Battery Power Systems. The proposed control strategy was validated using digital co-simulation using PLECS and Matlab / Simulink. The novel strategy seeks to improve the dynamic performance and enhance the robustness of the control system to regulate the electric motor speed, generator speed, and battery state of charge. The series-parallel Hybrid Vehicle studied as a case study, incorporates a DC/DC converter, a battery system modeled by a single resistance model, and two permanent magnet synchronous machines with specific controllers integrated to regulate the motor speed. Finally, this work incorporates a dynamic performance comparison between a PI controller and the method by H_{∞} developed to validate the proposal.

Keywords: Robust Control, Hybrid Electric Vehicles, H_{∞} Control, Electric Power System, Battery energy storage system.

1 Introducción

En el contexto de esta investigación exhaustiva, se propone un análisis detallado destinado a mejorar la eficiencia de los Vehículos Eléctricos Híbridos (HEVs). El enfoque central de esta indagación se centra en el diseño e implementación de controladores robustos, con el objetivo de abordar y superar las limitaciones inherentes a los sistemas de control lineales convencionales [1]–[3].

Es relevante destacar que el controlador clásico PI, aunque eficaz para sistemas lineales, presenta limitaciones cuando se trata de sistemas altamente no lineales como los HEVs. Su rendimiento está directamente vinculado al punto de operación, de modo que cualquier cambio en dicho punto afecta su eficiencia [4]–[10]. En contraste, los HEVs, por su naturaleza no lineal, demandan un enfoque más robusto.

Es en este contexto que se propone la implementación de controladores H_∞ , los cuales, a diferencia de los controladores PI convencionales, mantienen un rendimiento aceptable para diferentes puntos de operación asegurando así la estabilidad y eficiencia en diversas condiciones operativas [11].

Con el propósito de validar de manera minuciosa la propuesta planteada, diversos estudios e investigaciones han explorado el rendimiento de los controladores PI clásicos y los controladores H_∞ . La literatura existente revela una serie de contribuciones significativas que han demostrado la eficacia y las limitaciones de estos controladores en entornos altamente dinámicos y no lineales.

Para validar exhaustivamente la propuesta presentada, se ha llevado a cabo un análisis minucioso y riguroso en una serie de estudios diversos. Los autores en [12]–[14] han realizado evaluaciones

detalladas de los controladores propuestos, profundizando en los aspectos clave de los controladores PI clásicos.

Sus hallazgos destacaron la eficiencia de estos controladores en situaciones específicas lineales, evidenciando su habilidad para mantener un rendimiento aceptable en sistemas lineales con puntos de operación constantes. Sin embargo, también señalaron las limitaciones evidentes cuando se trata de sistemas altamente no lineales, donde la sensibilidad al cambio en el punto de operación afecta significativamente su rendimiento.

Los autores en [3], realiza un análisis sobre impacto de los controladores Proporcional-Integral (PI), Analógico-Digital de Comportamiento Continuo (ADC) y la combinación difusa PI, ADC. Entre estas opciones, se observa que el controlador híbrido difuso PI, ADC demuestra resultados superiores en la estabilización de la frecuencia del sistema.

Los controladores PI afectan la capacidad de los EVs para mantener un estado de carga deseado y, por ende, es importante asegurar la energía disponible para las necesidades de conducción. Resultados sugieren que la implementación de controladores difusos PI, ADC mejora significativamente el rendimiento en la estabilización de la frecuencia, brindando una solución eficaz para gestionar las variaciones en la potencia generada por las Fuentes de Energía Renovable (RESs) [4].

Por otra parte, en [5] se evalúa el rendimiento de los controladores PI en la gestión de la carga y descarga de las baterías para mantener un equilibrio óptimo en el sistema. En este trabajo se destaca que los controladores PI difusos y los ADC surgen como la opción más eficiente para este estudio, destacando su capacidad para

estabilizar la frecuencia del sistema y garantizar un suministro de energía.

En contraste, en las investigaciones desarrolladas en [15]–[18] los autores se enfocaron en el análisis y aplicación de controladores H_∞ . Estos estudios destacaron la robustez inherente de los controladores H_∞ frente a variaciones en los puntos de operación, subrayando su capacidad para mantener un rendimiento estable y eficiente en condiciones no lineales. Los resultados de estas investigaciones sugieren que los controladores H_∞ ofrecen una solución más versátil y adaptable para abordar la complejidad inherente de los sistemas no lineales.

En [6] se presenta un método de diseño de control H_∞ multiobjetivo basado en algoritmos genéticos (GA) para lograr un equilibrio entre el rendimiento en el dominio del tiempo y la robustez en un sistema IPT compensado S-S. El modelo de optimización demostró su capacidad para identificar un conjunto de parámetros de ponderación con un valor de aptitud óptimo.

Los autores realizan experimentos comparativos entre el controlador optimizado y otros dos controladores. En ello revelaron que el controlador optimizado exhibía un rendimiento sobresaliente tanto en el dominio del tiempo como en la robustez, en contraste con los otros dos controladores que mostraron deficiencias en uno u otro aspecto [6].

En cambio, los autores en [7] presentan un control de formaciones en fila de vehículos automatizados donde aborda la importancia de considerar la estabilidad robusta al sintetizar dichas formaciones. Se propone un método de control robusto desacoplado para formaciones heterogéneas con dinámicas de nodo inciertas. En conclusion, en el manustrito se enfatiza en

la necesidad de abordar la estabilidad robusta al diseñar formaciones en fila de vehículos, así como la eficacia del método propuesto en garantizar la estabilidad robusta, el rendimiento de seguimiento y la estabilidad heterogénea de la cadena en dichas formaciones.

Un controlador robusto H_∞ diseñado para un convertidor DC-DC Boost puede tener como característica principal minimizar las pérdidas de potencia del sistema en la tensión de salida. Tales pérdidas, derivadas de incertidumbres en el convertidor como las pérdidas de inducción, conmutación y capacitivas, afectan directamente el ciclo de trabajo del convertidor [8].

El propósito principal del controlador es mantener constante la tensión de salida de la carga, independientemente de estas pérdidas. Se llevaron a cabo simulaciones para comparar la estabilidad, robustez y dinámica del controlador H-infinito con un controlador proporcional e integral simple. La implementación del controlador H-infinito en un Procesador de Señales Digitales y su prueba en un convertidor DC-DC Boost confirmaron el rendimiento, la eficiencia, la velocidad de respuesta transitoria y la robustez del sistema [8].

En su artículo [9] el autor, aborda el análisis de robustez y la síntesis de un controlador distribuido H_∞ para vehículos conectados con topologías no dirigidas. Se desarrolla un modelo unificado utilizando la teoría de grafos para describir el comportamiento colectivo de formaciones homogéneas de vehículos, descomponiendo las dinámicas colectivas en subsistemas equivalentes.

El presente trabajo busca diseñar un sistema de Control Robusto para Sistemas de Potencia por Baterías de Vehículos Eléctricos Híbridos HEVs, empleando

estrategias H_∞ . Para lograr este propósito, se han delineado objetivos específicos, que incluyen el análisis del comportamiento dinámico de sistemas de control lineal PI aplicados a los Sistemas de Potencia por Baterías de HEVs, considerando variables como la velocidad del motor eléctrico, la velocidad del generador, el voltaje del bus de DC y el estado de carga del sistema de baterías (SOC). Se busca desarrollar un algoritmo de control robusto basado en estrategias H_∞ para el mencionado sistema. La estrategia propuesta será validada a través de estudios de simulación dinámica y digital utilizando PLECS y Matlab / Simulink.

Adicionalmente en este estudio se proporcionó una perspectiva integral al comparar directamente el rendimiento de los controladores PI clásicos y H_∞ en un entorno simulado de HEV. La investigación no solo tiene como objetivo presentar nuevas estrategias de control para Vehículos Híbridos, sino también establecer una base sólida para investigaciones futuras en el campo de la ingeniería eléctrica. Al respaldar el progreso hacia soluciones más sostenibles en la movilidad eléctrica, la investigación aporta al desarrollo de tecnologías que redefinen los estándares de rendimiento en el sector automotriz.

La organización del presente artículo se desarrolla de manera estructurada en varias secciones, con el propósito de proporcionar una comprensión detallada del contenido.

En la sección 2, se presenta el marco teórico, abordando integralmente los temas principales que sirven como fundamentos para la formulación del problema de investigación. Este enfoque contribuye a establecer una sólida base conceptual.

La sección 3 se centra en la exposición del modelo y la metodología utilizada en el estudio. Aquí, se detalla el algoritmo empleado y las variables clave que desempeñan un papel fundamental en el proceso del modelado. Esta sección cumple la esencia de vincular la teoría establecida en la sección anterior con la aplicación práctica que se aborda posteriormente.

La sección 4, se presenta el caso de estudio, ofreciendo una visualización concreta de la implementación del controlador en una simulación específica. A través de esta presentación visual, se busca ilustrar la aplicación práctica de los conceptos teóricos y modelos previamente descritos.

La sección 5 se dedica a realizar un análisis detallado de los diferentes casos de estudio. Aquí, se exploran y examinan minuciosamente los resultados obtenidos en cada instancia, permitiendo una evaluación más profunda de la efectividad y aplicabilidad de las estrategias propuestas.

Finalmente, en la sección 6 se presentan las conclusiones del estudio. Este apartado resume y destaca los hallazgos clave, brindando una perspectiva consolidada sobre la efectividad del modelo propuesto, el controlador implementado y la metodología utilizada.

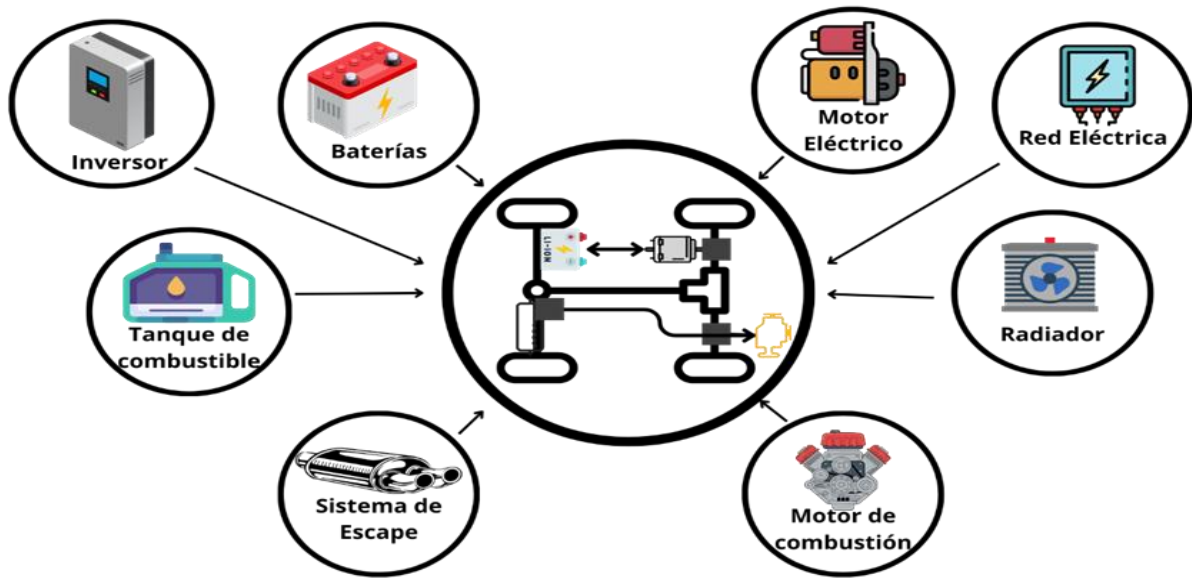


Figura 1 Elementos principales de un Vehículo Eléctrico Híbrido

La figura (1) exhibe los elementos presentes en un HEVs. La disposición gráfica destaca componentes clave, tales como el motor eléctrico, la batería, el inversor y el sistema de gestión de energía. El motor eléctrico esencial para la propulsión trabaja en sinergia con la batería, la cual actúa como la principal fuente de almacenamiento de energía, alimentando de manera eficiente el motor. El inversor juega un papel vital al convertir la corriente continua proveniente de la batería en corriente alterna para impulsar el motor. Asimismo, el sistema de gestión de energía optimiza el flujo de energético entre los diversos componentes eléctricos, asegurando una administración adecuada del sistema de un HEVs [1]-[19].

2 Marco teórico

En los últimos años, se ha observado un creciente interés en los vehículos eléctricos, debido a su potencial para revolucionar la industria de transporte y hacer frente a los desafíos energéticos y ambientales existentes [1].

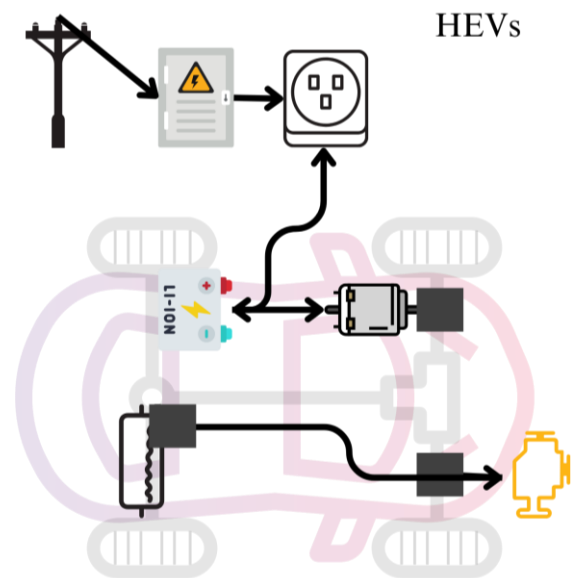


Figura 2 Vehículo Eléctrico Híbrido

La figura (2) exhibe los componentes y la disposición interna presente en los HEVs.

- *Estándares de rendimiento de un HEVs*

Los vehículos híbridos de Toyota, como el Prius, se han ganado una reputación

destacada por liderar la industria en eficiencia de combustible [20]. A pesar de los avances tecnológicos en la hibridación, algunos modelos de Toyota muestran una autonomía limitada en modo eléctrico puro [21]. De manera similar, los modelos híbridos de Honda, como el Accord Hybrid, son reconocidos por su eficiencia de combustible, aunque también comparten una limitación en la autonomía en modo eléctrico puro [22]. Por otro lado, los HEVs de Ford, incluyendo el Ford Escape Hybrid, son elogiados por su eficiencia, y Ford ha expandido su presencia en el mercado de vehículos eléctricos con opciones como el Ford Mustang Mach-E, que ofrece una autonomía completamente eléctrica [23]. En el ámbito de lujo, los híbridos de Lexus, como el Lexus RX Hybrid, combinan rendimiento y eficiencia de combustible, proporcionando modos eléctricos adecuados para distancias cortas y velocidades moderadas [24]. Para una comparación detallada de las características de estos modelos, se presenta una tabla a continuación.

<i>Parámetros Marcas</i>	<i>Motor Eléctrico</i>	<i>RPM</i>	<i>Hybrid Synergy Drive (HSD)</i>
<i>Toyota Prius</i>	71 HP	5200 Rpm	138 HP
<i>Honda Accord</i>	145 HP	6000 rpm	204 HP
<i>Ford Escape</i>	163 HP	6250 rpm	210 HP
<i>Kia Niro</i>	139 HP	5700 rpm	182 HP
<i>Hyundai Ioniq</i>	143 HP	5700 rpm	147 HP

Tabla 1 Características de HEVs

2.1 Disposición de un HEVs

- *Disposición en serie de un HEVs*

En la configuración serie de un vehículo eléctrico híbrido HEVs, el motor (ICE) no puede estar conectado directamente a las ruedas del vehículo. En cambio, el ICE funciona como un generador para cargar la batería, que a su vez puede suministrar

energía a los motores eléctricos que impulsan el vehículo. Este diseño permite que el motor ICE opere en su punto de eficiencia óptimo y mejore la economía de combustible [25].

- *Disposición en paralelo de un HEVs*

La configuración en paralelo de un vehículo eléctrico híbrido HEVs, tanto el motor ICE como el motor eléctrico están interconectados mecánicamente a las ruedas del vehículo y pueden trabajar de manera independiente o juntos para impulsar el vehículo, durante la aceleración y en situaciones de alta demanda de potencia el motor eléctrico brinda asistencia al motor ICE, facilitando la optimización del rendimiento global y la eficiencia [25].

- *Disposición combinada de un HEVs*

La configuración combinada de un vehículo eléctrico híbrido HEVs, combina los principios de los sistemas en serie y paralelo. Permite que el motor eléctrico propulse el vehículo por sí mismo en condiciones tangibles de conducción, mientras que el motor ICE se activa cuando se necesita más potencia o la batería necesita recargar. Esto permite una mayor autonomía y eficiencia en comparación a otras configuraciones [25].

2.1.1 *Sistemas encargados de producir energía eléctrica*

La relación entre los HEVs y los mecanismos de producción de energía eléctrica, abarcando desde la descarga hasta la recarga de la batería.

- *Carga desde la red eléctrica*

Los vehículos eléctricos híbridos se pueden cargar desde la red eléctrica, ocupando estaciones específicas de carga. El proceso de carga se realiza en momentos de menor requerimiento de electricidad o cuando los precios de energía eléctrica estén más bajos,

lo que permite tener mayor flexibilidad en la gestión de la demanda eléctrica [26].

- ***Descarga hacia la red eléctrica***

Los vehículos eléctricos híbridos pueden almacenar energía tomando un rol de unidades de almacenamiento, permitiendo gestionar por el usuario la descarga de la energía almacenada en las baterías hacia una conexión con la red eléctrica. Esta capacidad de descarga de energía almacenada puede utilizarse para equilibrar la demanda y oferta del mercado eléctrico, específicamente en momento de alta demanda de energía eléctrica o en situaciones emergentes [26].

- ***Gestión de la demanda por carga inteligente***

Los vehículos eléctricos híbridos también pueden utilizar los sistemas de gestión de carga inteligente, que permiten una programación de la carga de baterías basándose en las prioridades y necesidades del usuario. Esto permite evitar los picos de la demanda eléctrica y permite una mejor gestión y planificación de la infraestructura de carga [13].

- ***Gestión de la demanda por descarga***

En situaciones de elevada demanda de carga, los HEVs pueden desempeñar un papel en la regulación de la demanda eléctrica al liberar la energía acumulada en sus baterías hacia la red eléctrica, se puede reducir el ingreso de fuentes de generación desactivadas y ayuda a la estabilizar la demanda eléctrica [13].

2.2 Sistemas de Baterías para HEVs

El desempeño de los Vehículos Híbridos HEVs se ve significativamente influenciado por la función crucial desempeñada por las baterías y son conocidas como el corazón de su sistema de propulsión. Estos dispositivos

electroquímicos desempeñan la función de proveer y retener la energía requerida para el correcto funcionamiento del motor eléctrico del automóvil [27].

Las baterías como ventaja principal entre los combustibles convencionales es su capacidad de poder almacenar energía de forma eficiente y liberar energía de forma controlada. Esta característica posibilita que los vehículos eléctricos (EV) operen prescindiendo de combustibles fósiles, contribuyendo así a la reducción de emisiones de gases por efecto invernadero y la mitigación de la elevada contaminación atmosférica en entornos urbanos [27].

La elección de la batería adecuada para un EV es crucial, debido a que afecta con su rendimiento, autonomía, tiempo de carga y la vida útil del EV. Por eso, la investigación y el desarrollo eficiente de baterías con mayor durabilidad, capacidad, menor costo son de mayor importancia para la masiva adopción de EV y mejorar su competitividad en comparación con los vehículos de combustión fósil [27].

2.2.1 Principios básicos de funcionamiento de una batería

Las baterías funcionan según el principio de reacciones electroquímicas reversibles. Se basa en celdas electroquímicas, donde se genera reacciones químicas que produce corriente eléctrica. Estas unidades están conformadas por dos electrodos, un cátodo y un ánodo, inmersos en un electrolito [28].

En el proceso de carga, se introduce corriente eléctrica en el electrodo positivo (cátodo), desencadenado así una reacción química que facilita la liberación de electrones y la captación de iones Al mismo tiempo, el electrodo (ánodo), produce una reacción de almacenamiento de iones y electrones. Estos procesos permiten la

acumulación de energía química en la batería [28].

Durante la descarga, se interrumpe a la corriente eléctrica y los electrones se transportan a través de un circuito externo desde el ánodo hasta llegar al cátodo, suministrando energía al motor del EV. En este proceso, los iones se transportan a través del electrolito para conservar el equilibrio de carga en ambas celdas [28].

2.2.2 Categorías de acumuladores eléctricos

La figura (3) proporciona distintas categorías disponibles para su implementación en HEVs.

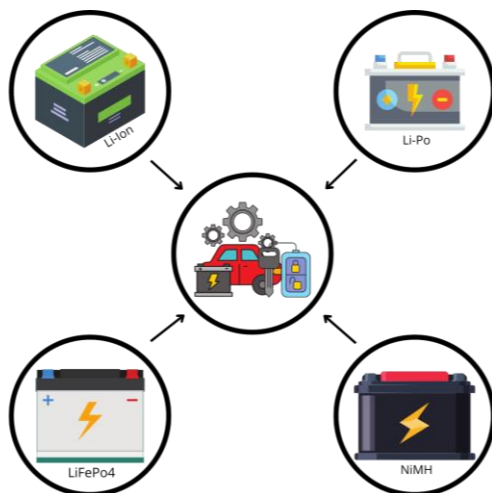


Figura 3 Tipos de Baterías para Vehículos Eléctricos Híbridos

- **Acumuladores de iones de litio (Li-Ion)**

Estas baterías son extensamente empleadas gracias a su elevada densidad energética, eficiencia en los procesos de descarga y carga, así como a su reducida tasa de autodescarga. Presentan una porción favorable entre su capacidad y peso, además de contar con una longevidad destacada y la ausencia del fenómeno de efecto memoria [29].

- **Acumuladores de polímero de litio (Li-Po)**

Las composiciones químicas de estas baterías guardan similitud con las baterías de iones, sin embargo, se diferencian al emplear un electrolito polimérico en lugar de un electrolito líquido. Esto proporciona una alta flexibilidad en términos de forma y tamaño, lo que permite generar un diseño compacto. Además, permite una mayor adaptación a los espacios reducidos en los HEVs [29].

- **Acumuladores de níquel-metal hidruro (NiMH)**

Estas baterías son menos comunes en los EV actuales, pero se utilizan en algunos modelos híbridos. Presentan una densidad de energía inferior en contraste con los acumuladores de iones de litio, pero son más económicas. Además, presenta menos problemas de seguridad y son menos propensos al calentamiento durante la descarga y carga [29].

2.2.3 Ventajas de las baterías

- **Acumuladores de iones de litio (Li-Ion)**

Elevada densidad energética, eficiencia destacada en los procesos de descarga y carga, duración prolongada y una tasa de autodescarga baja [30].

- **Acumuladores de polímero de litio (Li-Po)**

Versatilidad en cuanto a su configuración y dimensiones, mayor adaptabilidad a los espacios reducidos de los EV [30].

- **Acumuladores de níquel-metal hidruro (NiMH)**

Un costo inferior en relación con las baterías de litio, menos propensa a calentamiento durante la descarga y carga [30].

2.2.4 Desventajas de las baterías

- Acumuladores de iones de litio (Li-Ion)

Mayor costo en comparación con otras tecnologías, posibles problemas de seguridad si no se manejan adecuadamente [30].

- Acumuladores de polímero de litio (Li-Po)

Se observa un costo más elevado en comparación con los acumuladores de iones de litio y, en algunos casos, una densidad de energía inferior [30].

- Acumuladores de níquel-metal hidruro (NiMH)

Densidad de energía inferior en contraste con los acumuladores de iones de litio, y una vida útil más restringida [30], [31].

Tipo	Acido de Plomo	NiCd	Li-Ion	NiMH
Parámetros	12V 7.5Ah	1.2V 2.3Ah	3.3V 2.3Ah	1.2V 6.5Ah
$E_o(V)$	12.4659	1.2705	3.366	1.2816
$R(\Omega)$	0.04	0.003	0.01	0.002
$K(\Omega \text{ o } V/Ah)$	0.047	0.0037	0.0076	0.0014
$A(V)$	0.83	0.127	0.26422	0.111
$B(Ah)^{-1}$	125	4.98	26.5487	2.3077

Tabla 2 Parámetros de las Baterías

Dónde:

E_o = voltaje constante de la batería (V)

R = resistencia interna (Ω)

K = constante de polarización (V/(Ah)) o resistencia de polarización (Ω)

A = amplitud de la zona exponencial (V)

B = inverso de la constante de tiempo de la zona exponencial (Ah)⁻¹

2.3 Estrategias de control

Las estrategias de un controlador robusto se utilizan para diseñar sistemas preparados para resolver las incertidumbres y perturbaciones vigentes en los sistemas

dinámicos. Estas incertidumbres también pueden incluir cambios en los parámetros de un sistema, perturbaciones externas y errores en la modelación de un control robusto. El objetivo del control robusto es garantizar un rendimiento adecuado del sistema, incluso cuando se presenten estas incertidumbres [32].

2.3.1 Control PID

La técnica de control proporcional-integral-derivativo PID es una metodología de control clásica y robusta que goza de una amplia adopción. El controlador PID robusto se centra en diseñar un controlador PID que no se vea afectado por las variaciones en los parámetros del sistema [33], [34].

Esto se logra ajustando los parámetros del controlador robusto asegurando así la estabilidad y el desempeño óptimo del sistema incluso cuando existen incertidumbres en el sistema. Se emplea en una variedad de sistemas, como el control de temperatura, velocidad de motores y posicionamiento de actuadores [34], [35].

El proceso de cálculo del controlador PID implica el uso de las ecuaciones siguientes:

$$E_{SA} = K_{CP}E(s) \left[1 + sT_d + 1/sT_d \right] \quad (1)$$

$$G_t(s) = \left[K_{CP} + sK_d + K_i/s \right] \quad (2)$$

Dónde:

E_{SA} Señal de impulso

K_{CP} Valor proporcional constante

G_t Valor de función de transferencia

K_d Valor diferencial

K_i Valor Integral

s Valor de Laplace constante

2.3.2 Control H-infinito

El control robusto H_∞ es una técnica de un sistema de control resistente fundamentado

en los principios de la teoría del control óptimo. El objetivo del controlador robusto H_∞ es minimizar el impacto de las perturbaciones externas en el sistema, al tiempo que asegura la estabilidad y el rendimiento deseados. Se utilizan herramientas matemáticas avanzadas, como la teoría de la matriz de Lyapunov y la optimización convexa, para diseñar controladores robustos H_∞ [36]–[40].

El Controlador H_∞ , al ser implementado, demuestra su capacidad para minimizar la ganancia de transferencia máxima desde las salidas del sistema hacia las perturbaciones externas en los HEVs. En otras palabras, busca alcanzar una robustez óptima del sistema HEVs frente a perturbaciones externas e incertidumbre que podrían afectar la estabilidad y el rendimiento del vehículo [41].

Este controlador exhibe una alta atenuación de las perturbaciones en todo su rango de frecuencias, estableciéndose como un sistema robusto y estable. Su característica principal radica en garantizar el rendimiento óptimo del HEVs y su seguridad, especialmente en condiciones desafiantes y variables, proporcionando así una experiencia de conducción segura y cómoda [41].

El diseño de un controlador H_∞ se basa en el uso de avanzadas técnicas de control H_∞ y el uso de teoría de los sistemas lineales en tiempo continuo. Este controlador parte de un modelo matemático de los HEVs en el cual se incluye la dinámica eléctrica como la mecánica del HEVs. Además, se ejerce la teoría de Control H_∞ para la minimización de la máxima ganancia de transferencia tomando desde perturbaciones externas hasta el fin del sistema, esto garantiza un nivel alto del diseño del controlador robusto [36], [42].

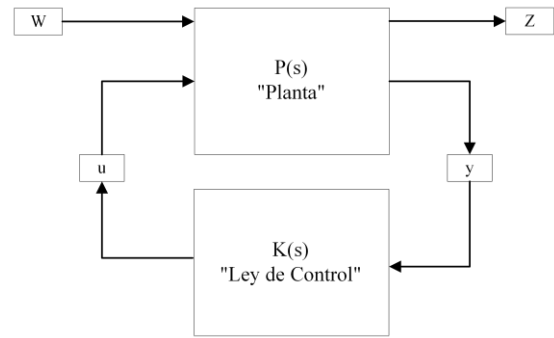


Figura 4 Representación gráfica del sistema de control H_∞

La representación gráfica (4) presenta las variables de estado, tal como se ilustran en la ecuación 4, donde $K(s)$ representa el controlador H_∞ .

El análisis del control H_∞ se efectúa en el espacio complejo positivo de Hardy, donde se evalúa el valor máximo, representado por la ganancia en todas las direcciones y frecuencias para varios sistemas SISO [43].

Cuando se consideran los sistemas, se nota una reducción del impacto en el lazo cerrado, lo que indica una estabilidad perceptible y una mejora en el desempeño de las entradas y salidas del sistema [43].

Las matrices (W) y (Z) son componentes adicionales relacionadas con la descripción del sistema y la formulación del problema de control robusto.

Matriz W (W - Matriz de Perturbación de Entrada): La matriz (W) especifica la sensibilidad del sistema a las perturbaciones de entrada. En otras palabras, indica cómo las perturbaciones externas afectan el sistema a través de las entradas. Esta matriz se utiliza en la formulación del problema de optimización H_∞ para minimizar la influencia de las perturbaciones en el rendimiento del sistema [36].

Matriz Z (Z - Matriz de Perturbación de Salida): La matriz (Z) describe la sensibilidad del sistema a las perturbaciones en las salidas. Indica cómo las

perturbaciones afectan las salidas del sistema. Al igual que la matriz (W), la matriz (Z) es esencial en el problema de control H_∞ para minimizar los efectos adversos de las perturbaciones en las salidas del sistema [36].

La derivación de las variables de control a partir de las variables medidas, señales manipuladas y señales de referencia del sistema a analizar puede realizarse de manera matricial empleando los sistemas de espacio de estados que han sido evaluados [43].

$$\begin{bmatrix} Z \\ Y \end{bmatrix} = P(S) \begin{bmatrix} W \\ U \end{bmatrix} \quad (3)$$

Dónde:

$$\begin{bmatrix} Z \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P(S)_{11} & P(S)_{12} \\ P(S)_{21} & P(S)_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W \\ U \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$U = K(S) * Y \quad (5)$$

Se emplean diversas técnicas para parametrizar controladores de alto orden, algunas de las cuales se basan en la reformulación de matrices de Riccati mediante lineales. Estas técnicas requieren soluciones diversas con superposiciones en sus resoluciones, como se describe en las referencias [44], [45].

Para obtener los parámetros de ley de control o controlador K según la norma H_∞ , es necesario simplificar valores de $F_l(P, K)$ utilizando el mismo enfoque para diferentes modelos [44].

Entonces el análisis procede de la siguiente manera:

$$F_l(P, K) * W = Z \quad (6)$$

Por lo cual:

$$\begin{aligned} F_l(P, K) &= P(S)_{11} + P(S)_{12} \\ &* K(I - P(S)_{22} * K)^{-1} \\ &* P(S)_{21} \end{aligned} \quad (7)$$

Este tipo de control es ampliamente aplicado en sistemas con perturbaciones externas significativas, como el control de vuelo de aeronaves, procesos químicos y sistemas de control de robots [44].

2.3.3 Control por deslizamiento

El control robusto por deslizamiento, o sliding mode control, es una estrategia que busca llevar el sistema a un estado de deslizamiento, donde la dinámica del sistema se reduce a una superficie deslizante específica. El controlador se diseña para mantener la dinámica del sistema en esta superficie deslizante, lo que brinda robustez frente a las incertidumbres y perturbaciones [46].

El por deslizamiento es utilizado frecuentemente en aplicaciones de control de velocidad y posicionamiento. El control por deslizamiento se emplea en sistemas que requieren control preciso y rápido, como vehículos autónomos, sistemas de energía renovable y manipuladores de robóticos [46].

2.3.4 Control basado en observadores robustos

En algunos sistemas, no se dispone de mediciones directas de todas las variables de estado. En estos casos, se utilizan observadores para estimar estas variables. El controlador robusto basado en observadores robustos combina la estimación de las variables de estado con técnicas de control robusto para diseñar un controlador que sea insensible a las incertidumbres en las mediciones y las perturbaciones externas [47].

Esto permite controlar el sistema incluso cuando las mediciones no son perfectas. El control por realimentación de estados se

emplea en sistemas donde se pueden medir todas las variables de estado de manera directa, como procesos industriales, vehículos autónomos y sistemas de robótica avanzada [47].

2.4 Sistema controlador para vehículos eléctricos

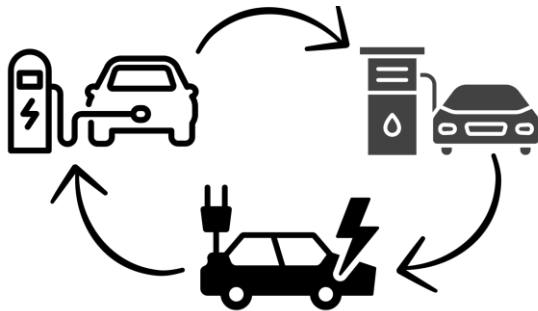


Figura 5 Tipo de controlador para Vehículos Eléctricos Híbridos

Estos HEVs cuentan con un sofisticado y avanzado sistema de control como se muestra en la figura (5) que coordina la interacción entre el propulsor eléctrico y el motor de combustión interna, así como el flujo de energía entre ambas fuentes. El sistema de control de estos vehículos tiene un papel fundamental en la optimización del rendimiento del vehículo y lograr una eficiencia en el uso de la energía [48].

El mecanismo de regulación presente en un vehículo híbrido eléctrico opera a través de diversos modos de funcionamiento que determina como se aprovecha la energía almacenada en la batería y la generada por el motor de combustión. Además, entre los modos de funcionamiento comunes incluyen [48].

2.4.1 Modo eléctrico

En esta modalidad, el vehículo depende exclusivamente del motor eléctrico, aprovechando la reserva energética almacenada en la batería como su principal fuente de alimentación. Este enfoque demuestra ser altamente eficiente en

circunstancias específicas, especialmente en desplazamientos de corta distancia y a velocidades moderadas. La completa dependencia del motor eléctrico en este modo de operación resulta en ventajas notables, como la disminución de emisiones y una mayor eficiencia, aspectos cruciales en entornos urbanos y en los desplazamientos diarios en áreas urbanas [49].

Este método de propulsión se distingue por su adaptabilidad en entornos urbanos, donde los recorridos suelen ser más breves y la velocidad varía en un rango moderado. La eficiencia del motor eléctrico a velocidades bajas y la capacidad para recuperar energía durante la desaceleración son factores fundamentales que contribuyen a la eficiencia general del vehículo en estas condiciones [49].

Es importante señalar que, aunque esta estrategia resulta ser óptima en escenarios específicos, la autonomía del vehículo podría verse afectada en comparación con modalidades que integran la potencia eléctrica con otros sistemas de propulsión. Por lo tanto, la elección de este modo de operación dependerá de la naturaleza y exigencias del viaje, siempre buscado un equilibrio entre la eficiencia energética y la practicidad del alcance [49].

2.4.2 Modo Híbrido

En el presente diseño específico, denominado modo de propulsión combinada, tanto el propulsor de combustión interna como el motor eléctrico colaboran en armonía para impulsar el vehículo híbrido (HEV). Esta estrategia tiene como objetivo principal maximizar la eficiencia y minimizar el consumo de combustible, capitalizando las ventajas complementarias de ambas fuentes de energía [50].

En el núcleo de esta configuración, destaca un sistema de control avanzado que dinámicamente regula la distribución de potencia entre los dos motores. Este sistema desempeña un papel crucial al adaptarse continuamente a las demandas cambiantes de la conducción y las variaciones en las condiciones del terreno. Su meta fundamental radica en lograr una fusión armoniosa que optimice la eficiencia global del vehículo [50].

Durante la operación en este modo, el sistema de control analiza de forma constante factores como la velocidad del vehículo, el estado de carga de la batería, las necesidades de aceleración y las particularidades del terreno. Ajusta dinámicamente la contribución de cada motor en tiempo real para asegurar un rendimiento equilibrado y eficaz. Esta capacidad de adaptación resulta esencial para alcanzar una respuesta óptima del vehículo en diversas situaciones de conducción, permitiendo una transición suave entre los modos eléctrico y de combustión interna [51].

La fusión estratégica de estas tecnologías no solo persigue mejorar la eficiencia operativa, sino también reducir las emisiones y elevar la calidad de la experiencia de conducción. Al aprovechar la combinación de energía eléctrica y combustible, se aspira a lograr un equilibrio óptimo entre sostenibilidad y rendimiento. Cada componente de esta configuración se ajusta meticulosamente para contribuir a la eficacia global del vehículo híbrido en diversas condiciones de conducción, respaldando así un enfoque que promueve una mayor sostenibilidad y eficiencia en la utilización de recursos energéticos [51].

2.4.3 Modo de carga de batería

En esta disposición específica, denominada modo de recarga durante la conducción en HEVs, se aplica una táctica que utiliza el

motor de combustión interna para recargar la batería mientras el vehículo está en movimiento. Este enfoque ha sido diseñado para situaciones en las que la carga de la batería ha descendido y es necesario mantener una reserva de energía para su utilización futura [52].

La ejecución de esta estrategia se fundamenta en la optimización eficiente de la energía guardada en la batería. Durante el trayecto, al descender el nivel de carga de la batería disminuye hasta un umbral específico, el motor de combustión interna se activa para generar electricidad y recargar la batería, contribuyendo así a conservar una cantidad adecuada de energía almacenada [52].

Este modo de recarga durante la conducción proporciona la ventaja de extender la autonomía del vehículo híbrido al mantener niveles óptimos de carga en la batería. Además, facilita una transición sin inconveniente entre los modos de propulsión, garantizando una respuesta eficiente en diversas condiciones de conducción. Resulta especialmente beneficioso en desplazamientos donde la demanda de energía eléctrica es más elevada, buscando maximizar la eficiencia del sistema híbrido [52].

Es relevante destacar que esta estrategia contribuye a una administración más equilibrada y sostenible de la energía, aprovechando la eficiencia del motor de combustión interna para mantener la disponibilidad de energía eléctrica según sea necesario. Este enfoque aspira a brindar una solución eficaz y práctica para asegurar una experiencia de conducción continua y sostenible en HEVs [52].

2.4.4 Mecanismo regulador del sistema

Este mecanismo de control de los HEVs se basa en algoritmos que determinan la distribución de energía y la estrategia

óptima según los datos recopilados por los sensores y las condiciones del vehículo. Estos algoritmos utilizan información en tiempo real, tales como la velocidad del automóvil, el estado de carga de la batería, la posición del pedal del acelerador, y la demanda de energía, para tomar decisiones y ajustar la configuración del sistema [53].

Además de los distintos modos de funcionamiento, los HEVs también emplean algoritmos de control específicos para la recuperación de energía al frenar se lleva a cabo mediante un proceso en el que, durante la desaceleración y frenado, el motor eléctrico opera como un generador. Este dispositivo recupera parte de la energía cinética del vehículo y la convierte en energía eléctrica, destinada a recargar la batería. El sistema de gestión regula la cantidad de energía recuperada y su distribución entre los motores [53].

2.5 Sensores en los vehículos eléctricos

En los HEVs, los sensores desempeñan un papel fundamental en la recopilación de datos fundamentales para operar y regular el vehículo. Estos mecanismos recopilan datos en tiempo real que permite que el sistema de gestión tome decisiones y ajuste la configuración para lograr un rendimiento óptimo [48].

- *Tacómetro (Sensor de Velocidad)*

Este sensor registra la velocidad del vehículo y es crucial para determinar la demanda de potencia y la distribución tanto el propulsor eléctrico como el de combustión interna. Proporciona datos precisos sobre la velocidad de desplazamiento, lo que ayuda al sistema de gestión a tomar decisiones relacionadas con el rendimiento y la eficiencia [54].

- *Medidor de SOC (Medidor de Carga de la Batería)*

Este al evaluar el nivel de carga, posibilita al sistema de control adaptar la estrategia operativa para asegurar una administración eficaz de la energía almacenada. La información crucial que ofrece contribuye a establecer la asignación de potencia y la producción de energía durante el frenado, mejorando de este modo la eficiencia en la utilización de la energía acumulada en la batería [54].

- *Transductor de Aceleración (Sensor de Detección de Aceleración)*

Este dispositivo se encarga de identificar la ubicación del pedal de aceleración y proporciona información sobre la demanda de potencia del conductor, Ayuda al sistema de control a ajustar la respuesta del motor y determina la cantidad de potencia requerida para satisfacer las necesidades del conductor. Además, contribuya a la eficiencia energética al optimizar la entrega de potencia [54].

- *Termostato (Sensor de temperatura del motor)*

Este dispositivo monitorea la medición de la temperatura del motor de combustión interna para garantizar un funcionamiento óptimo y prevenir daños por sobrecalentamiento. Este sensor proporcionara la temperatura del motor, permitiendo que el sistema de control ajuste la gestión térmica y mantenga el motor dentro de los límites seguros de temperatura [54].

3 Planteamiento del problema

La problemática central de este estudio se centra en la optimización de la autonomía eléctrica en HEVs, un tema crucial en la evolución de la movilidad sostenible. Aunque los fabricantes llevan a cabo evaluaciones para estimar la autonomía eléctrica en HEVs está fuertemente

influenciada por la degradación de la batería, las condiciones de conducción y el diseño del sistema de Sistemas de Potencia por Baterías.

En la actualidad, los Sistemas de Potencia por Baterías se diseñan empleando estrategias de control clásicas o lineales. A pesar de que estos sistemas muestran un rendimiento aceptable en el punto de operación predefinido, enfrentan obstáculos dinámicos al controlar sistemas altamente no lineales, como los presentes en los HEVs. Además, el rendimiento de estos sistemas de control lineales se ve afectado por la degradación considerable provocada por alteraciones en el punto de operación.

Estos desafíos impactan directamente en la degradación acelerada del rendimiento de la batería de los HEVs. Esto se logrará mediante el diseño de un control automático robusto capaz de gestionar las dinámicas altamente no lineales del sistema en diferentes puntos de operación, contribuyendo así a una optimización efectiva de la autonomía y eficiencia en condiciones de conducción variables.

En la Figura 6 se presenta el esquema de ingreso del controlador H_∞ . Este controlador robusto reemplaza al controlador tradicional del sistema PI, ya que es más sólido y tiene un tiempo de respuesta considerablemente más rápido. Esto se evidencia al observar los distintos casos de estudio.

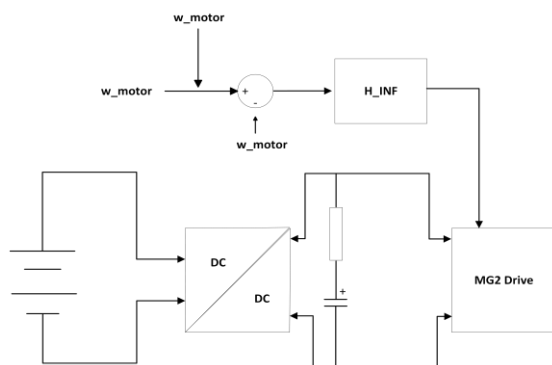


Figura 6 Ingreso del controlador H_{inf} al sistema

La tabla 3 detalla las variables y funciones utilizadas en la elaboración del algoritmo H_∞ , conforme a lo descrito en la tabla 4. Es relevante subrayar que los comandos utilizados son accesibles en el entorno de desarrollo del software Matlab / Simulink.

Tabla 3 Descripción de variables y funciones

Nomenclatura	Descripción
P	Genera una matriz de espacio de estados
A, B, C, D	Variables de espacio de estados
Q	Valores ideales del modelo de espacio de estados (Pre-filtro)
S, M	Desarrollo de polos, ceros, ganancia
C1	Controlador de retroalimentación negativo
M	Transferencia del sistema
L	Es la ganancia del controlador H_∞
Pw	Adquisición de estructura genérica
Wo	Constante H_∞ (Integrador)
Sg	Bucle cerrado del controlador H_∞
Zpk	Este genera un modelo de ganancia con cero
Dcgain	Este calcula la ganancia de sistemas LTI en la frecuencia baja en DC
Bandwidth	Este calcula el ancho de banda de un modelo dinámico SISO
ncfsyn	Este genera un controlador con un factor coprimo 'K', basado en la norma H_∞
minreal	Esta cancela o minimiza los ceros y polos

La tabla 4 exhibe la formulación del algoritmo del controlador diseñado según los principios de la normativa H_∞ . Este algoritmo hace uso de funciones particulares integradas en el entorno de desarrollo del software Matlab / Simulink.

Tabla 4 Algoritmo de diseño para el Control H_{∞}

Controlador con normativa H_{∞}
Paso 1 Entrada $\leftarrow P \leftarrow (A, B, C, D)$
Paso 2 $S \leftarrow \text{zpk}('S')$ $M \leftarrow M / (\text{dcgain}(M) * \text{dcgain}(P(1,:)))$;
Paso 3 $\text{bandwidth}(P(1, :)*M)$;
Paso 4 $P_w \leftarrow \text{minreal}(P_w, [], \text{false})$;
Paso 5 $C_{\text{inf}} \leftarrow \text{ncfsyn}(P_w)$; $\text{perf_margin} \leftarrow 1/\text{gam}$
Paso 6 $L \leftarrow (P*C1)$;
Paso 7 $Q_{\text{hat}} \leftarrow (T(1,:)*Q0) \setminus R_{\text{ideal}}(1, :)$; $Q \leftarrow Q0*Q_{\text{hat}}$;
Paso 7 $\text{Controller} \leftarrow \text{minreal}(\text{Controller}, [], \text{false})$;
Paso 8 Salida $\leftarrow \text{Plant_peq}(\text{Controller})$

4 Caso de estudio

El estudio presente es validado usando co-simulación digital en PLECS y Matlab y su análisis dinámico se realizó para diversas variables cruciales que conforman el HEV del modelo de ejemplo del software PLECS “Power Split Hybrid Vehicle System”.

En el estudio se enfatizó el análisis sobre el Torque Motor, que representa la fuerza rotativa generada por el motor eléctrico. La Velocidad del Motor, como la medida de la rotación del motor. La Velocidad del Generador se refiere a la velocidad de

rotación del generador eléctrico. Además, se incluye el Voltaje de la Barra DC, que representa la diferencia de potencial en el bus de corriente continua. Finalmente, se define el Estado de carga de la Batería (SOC), que indica la proporción de carga almacenada en la batería.

El controlador, se presenta como una mejora fundamental para optimizar el rendimiento de los Sistemas de Potencia por Baterías destinados a los HEVs.

Este controlador, junto con su ley de control, se simula para obtener los parámetros necesarios para el modelo y la identificación de la planta, utilizando el sistema de espacio. Los resultados de esta simulación proporcionarán información valiosa sobre la eficacia y el comportamiento del controlador ante diversas condiciones y escenarios de operación del sistema, brindando así una base sólida para la optimización continua y el perfeccionamiento del rendimiento de los HEVs.

Este proceso integral de simulación permitirá una comprensión más profunda de las dinámicas del sistema y contribuirá a la evolución continua de estrategias de control más eficientes robustas para los Sistemas de Potencia por Baterías de Vehículos Eléctricos Híbridos.

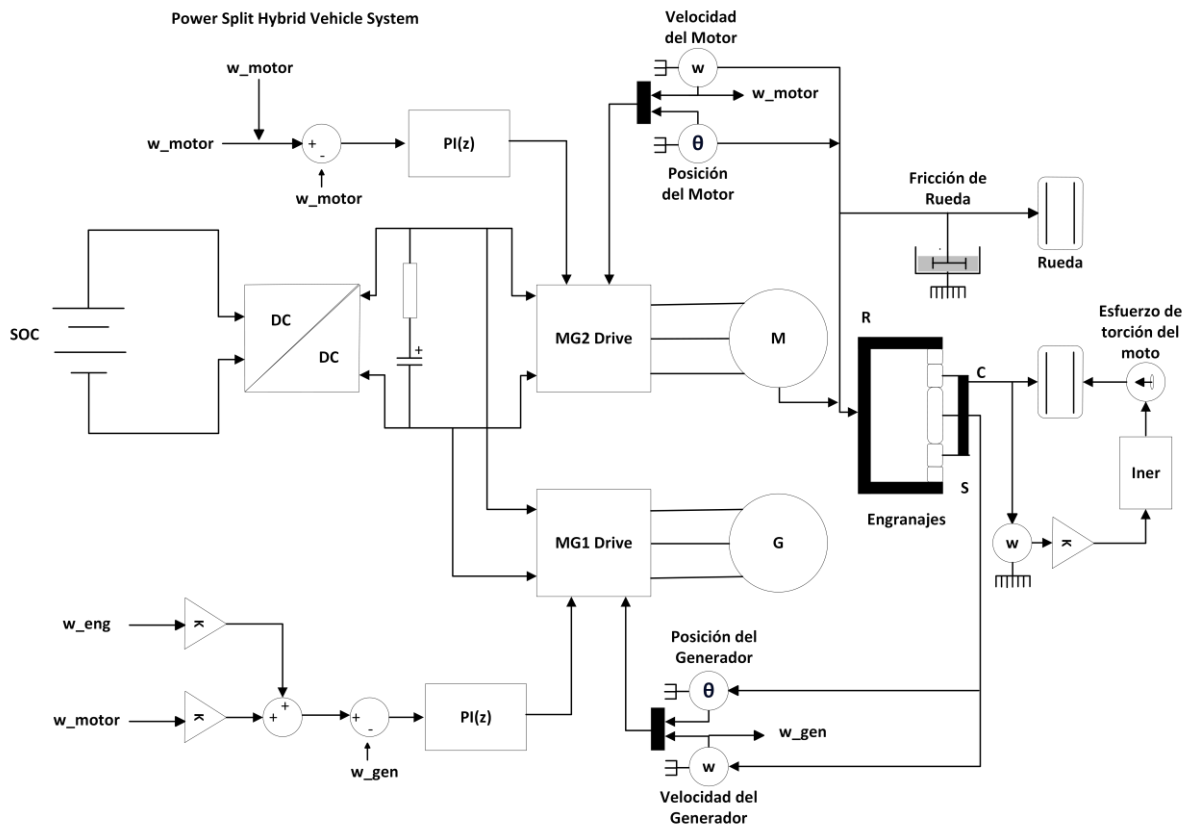


Figura 7 Sistema de Potencia de los Vehículos Eléctricos Híbrido

4.1 Modelo de espacio de estados

El procedimiento para derivar el modelo en espacio de estado, para el diseño de un control robusto H_∞ , implica una serie de pasos clave. En primer lugar, se identifican las variables de estado pertinente que describen el comportamiento dinámico del sistema. Estas variables representan estados internos cruciales que caracterizan la evolución del sistema a largo del tiempo [17].

Posteriormente, se formulan las ecuaciones de estado utilizando principios físicos y relaciones matemáticas adecuadas. En casos de sistemas no lineales, se puede requerir la linealización de las ecuaciones alrededor de un punto de operación para

facilitar el análisis y el diseño del controlador [17].

El modelo linealizado en espacio de estado se expresa en la forma estándar [2], [3], [55]–[57]:

$$X = Ax + Bu \quad (8)$$

$$Y = Cx + Du \quad (9)$$

Donde:

Las matrices A, B, C y D representan las matrices asociadas con la descripción matemática del sistema dinámico;

A es la matriz de estado;

B es matriz de vector de control;

C es matriz de Salida;

D es matriz de Transmisión Directa o Matriz de Ganancia Directa.

Estas matrices son importantes en la formulación del modelo y en la implementación del controlador por H_∞ .

La matriz A representa la evolución de los estados del sistema dinámico a lo largo del tiempo. Contiene la información sobre cómo los estados del sistema cambian en función del tiempo. La matriz B describe cómo las entradas externas afectan a la evolución de los estados del sistema. Muestra cómo las señales de control o las perturbaciones externas influyen en el sistema. La matriz C determina cómo los estados del sistema se traducen en salidas observables. Especifica qué estados o combinaciones de estados se miden y se utilizan como salidas del sistema. Finalmente, la matriz D relaciona directamente las entradas a las salidas sin

pasar por los estados del sistema. Si la matriz D es cero, significa que no hay una conexión directa entre las entradas y las salidas.

La validez del modelo se verifica mediante datos experimentales o comparaciones con modelos existentes, ajustándolo según sea necesario para mejorar su precisión. En el contexto del diseño H_∞ , se puede considerar la inclusión de incertidumbre, como variaciones paramétricas o perturbaciones externas, las cuales se reflejarán en las matrices A, B, C y D [15]. En el proceso de obtener la identificación de la planta y los parámetros del modelo, se evidencia el empleo del sistema de espacio de estados, los cuales se describen de la siguiente manera:

$$A = \begin{bmatrix} 80.03 & -680 & 421.2 & -123 & -47.92 & 7.136 & 30.62 & 24.4 \\ 884.6 & -4.622 & -37.36 & 15.49 & 22.02 & -4.83 & -5.057 & -8.731 \\ -1619 & -187 & -1062 & 316.2 & 191.2 & -20.13 & -113 & 56.38 \\ 1333 & 295.9 & 1287 & -524.5 & -297.7 & 44.05 & 165.2 & 94.94 \\ -1930 & -810.6 & -1842 & 1106 & 42.74 & 129.9 & 93.34 & -3.135 \\ -103.1 & -47.28 & -89.16 & 19.45 & -175.8 & 8.309 & -170.4 & -25.78 \\ 1545 & 536 & 1556 & -944.5 & 22.96 & 214.2 & -102.5 & -494.8 \\ -1756 & -787.6 & -1384 & 607.4 & -31.17 & -25.3 & 668.7 & -80.2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.9719 \\ 20.78 \\ -91.58 \\ 100.1 \\ -177.7 \\ -12.29 \\ 133.6 \\ -152 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$C = [-2.055 \quad -8.602 \quad -11.93 \quad -7.753 \quad 0.581 \quad -0.01786 \quad -0.06328 \quad -0.1879] \quad (12)$$

$$D = [0] \quad (13)$$

5 Resultados esperados

En el marco de este estudio, se han aplicado diversas estrategias para comprender y optimizar un sistema de control. Métodos específicos han sido utilizados para

recopilar información detallada sobre los parámetros del sistema y ajustar de manera adecuada las señales de entrada y salida. Estas técnicas han sido cuidadosamente planificadas y ejecutadas con el propósito de verificar una mejora sustancial en el

sistema, asegurando su preparación y optimización para la tarea específica que se busca abordar.

Los procedimientos complementados no solo se enfocan en la identificación y mejora del sistema, sino que también han sido diseñados para garantizar su idoneidad para la aplicación prevista. Cuidadosamente planificados y ejecutados, estos pasos buscan confirmar no solo la eficiencia general del sistema, sino también su capacidad para cumplir de manera óptima con la tarea específica que se espera que realice. Este enfoque integral busca asegurar un rendimiento mejorado y una adecuación precisa del sistema para el propósito deseado.

Los resultados obtenidos indican que las respuestas ante diversas dinámicas son consistentes y confiables, destacando su aplicabilidad en Sistemas de Potencia por Baterías de los HEVs. Esta observación confirma la eficacia del enfoque adoptado en la identificación y sintonización del sistema de control, respaldando su idoneidad del controlador H_∞ para su implementación en el contexto de los HEVs.

En primer escenario, se llevaron a cabo simulaciones del sistema original para diversos casos de estudio, variando la configuración del bucle cerrado de manera empírica. Esta variación se ejecutó con el propósito de obtener el resultado óptimo para la aplicación del controlador H_∞ . Los análisis detallados de estas simulaciones proporcionarán información valiosa sobre la respuesta del sistema en diferentes condiciones, permitiendo una evaluación integral de la efectividad del controlador propuesto en diversos escenarios dinámicos.

La observación de la representación gráfica en la figura 8 revela de manera

concluyente que la disposición empírica del bucle cerrado para el controlador H_∞ presenta un desempeño notablemente superior en velocidad en comparación con el control proporcional (PI). En particular, se destaca que el valor de tiempo de asentamiento (T_s) del controlador H_∞ se establece en 0.065 s, en contraste con el (PI) que alcanza su correspondiente valor de asentamiento (T_s) en 0.067 s.

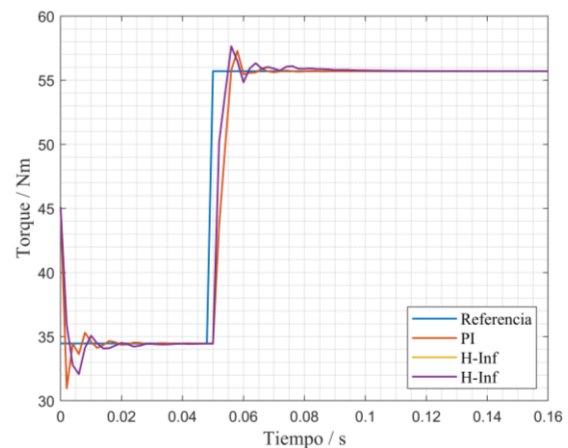


Figura 8 Señal del H_∞ en comparación con el PI

Un aspecto clave a tener en cuenta es que estos resultados, provenientes del análisis tanto en espacio transitorio como permanente mediante la simulación del algoritmo H_∞ , se llevará a cabo una evaluación comparativa de las señales en función de sus parámetros característicos, tales como el sobreimpulso M_p (u), el tiempo de retardo T_d (s), El tiempo de asentamiento T_s (s) y el error de estado estable e (%). Los resultados obtenidos de esta evaluación se han resumido y consolidado de manera detallada en la tabla 5.

En dicha tabla se presenta una comparación detallada entre ambos controladores, proporcionando una visión completa de las características dinámicas y de rendimiento. Este enfoque permite una evaluación más precisa y detallada de los resultados obtenidos, asegurando una

presentación imparcial y concisa de los hallazgos.

Tabla 5 Comparación del bucle cerrado

Controlador	Mp(u)	Td(s)	Ts(s)	e(%)
H_∞	1.95	0.001	21.4505	0.01
PI	1.58	0.002	21.2139	0.02

5.1 Control H-Inf: Torque del motor

En la figura 9, se evidencia que la respuesta del controlador H_∞ en comparación con el controlador clásico PI para el torque del motor del sistema, muestra una capacidad de estabilización significativamente más veloz ante alteraciones imprevistas en el sistema. El pico máximo para el controlador H_∞ es de 0.122 s, en contraste, el controlador PI alcanza su valor más alto en 0.120 s. En cuanto al Torque/Nm, el H_∞ registra un total de 118.955, destacándose notablemente sobre el PI, que logra los 99.621 Torque/Nm.

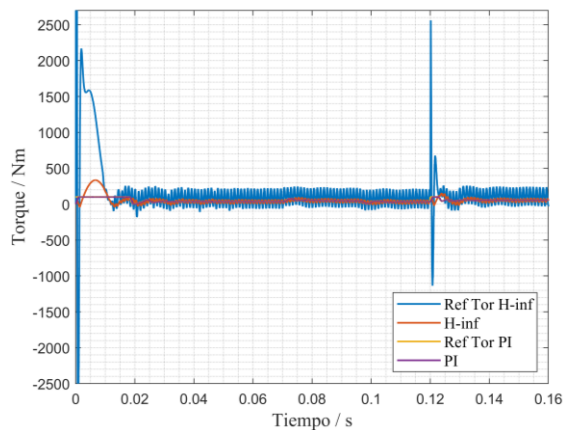


Figura 9 Señal del Torque del Motor en comparación entre el controlador H_∞ y el controlador PI

5.2 Control H-Inf: Velocidad del motor

En la figura 10, se puede apreciar la diferencia en la respuesta entre el controlador H_∞ y el tradicional controlador PI en relación con la velocidad del motor. El tiempo de asentamiento (T_s) del

controlador H_∞ es de 0.0105 s, mientras que el controlador PI alcanza su tiempo de asentamiento (T_s) en 0.0106 s. En términos de Velocidad/(rad/s), el H_∞ registra un total de 3.91, sobresaliendo notoriamente sobre el PI, que logra los 3.57 Velocidad/(rad/s). En la tabla 6 se presenta una comparación detallada entre ambos controladores.

Tabla 6 Comparación de la Velocidad del Motor

Controlador	Mp(u)	Td(s)	Ts(s)	e(%)
H_∞	2.906	0.11519	0.0418652	0.02
PI	2.904	0.11518	0.0418650	0.02

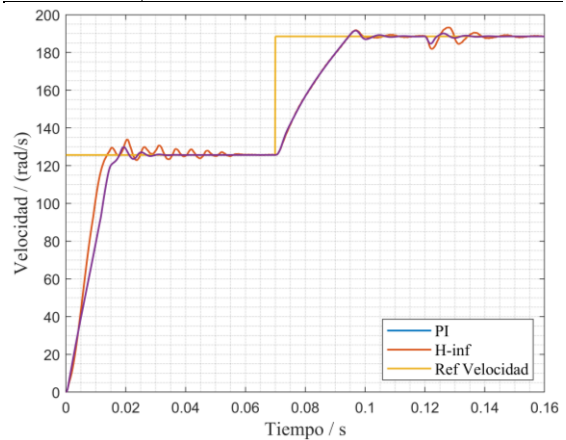


Figura 10 Señal del Velocidad del Motor en comparación entre el controlador H_∞ y el controlador PI

5.3 Control H-Inf: Velocidad del generador

En la figura 11, se evidencia la diferencia en la respuesta entre el controlador H_∞ y el controlador tradicional PI en relación con la velocidad del generador. En particular, se destaca que el valor de tiempo de asentamiento (T_s) del controlador H_∞ se establece en 0.1015 s, en contraste con el (PI) que alcanza su correspondiente valor de asentamiento (T_s) en 0.1027 s. En tabla 7 se presenta una comparación detallada entre ambos controladores, proporcionando una visión completa de las características dinámicas y de rendimiento. Asegurando una presentación imparcial y concisa de los resultados.

Tabla 7 Comparación de la Velocidad del Generador

Controlador	Mp(u)	Td(s)	Ts(s)	e(%)
H ∞	9.61	0.0100002	0.0393634	0.02
PI	9.61	0.0100001	0.0393630	0.01

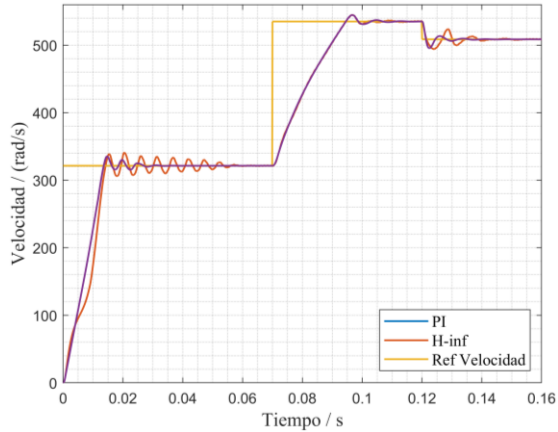


Figura 11 Señal del Velocidad del Generador en comparación entre el controlador H ∞ y el controlador PI

5.4 Control H-Inf: Voltaje en la barra de DC

En la figura 12, se observa que el controlador H ∞ presenta una respuesta notablemente más rápida en lo que respecta al voltaje en la barra DC. Este controlador exhibe una velocidad sustancialmente mayor al mantener el voltaje del bus DC en el nivel deseado de 500V, incluso frente a posibles perturbaciones inducidas por el usuario. Esta eficacia comparativa se destaca al contrastarla con el rendimiento del controlador PI. Cabe señalar que la respuesta más ágil del controlador H ∞ sugiere una mayor capacidad para gestionar y corregir las variaciones del sistema, lo que puede traducirse en un mejor rendimiento y estabilidad en condiciones dinámicas y ante cambios en la carga del usuario. En tabla 8 se presenta una comparación detallada entre ambos controladores

Tabla 8 Comparación de la Voltaje en barra DC

Controlador	Mp(u)	Td(s)	Ts(s)	e(%)
H ∞	36.197	0.015	0.057	0.02
PI	22.464	0.012	0.030	0.01

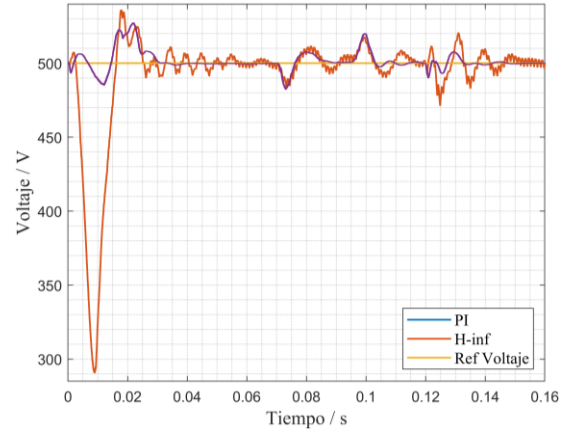


Figura 12 Señal del Voltaje en barra DC en comparación entre el controlador H ∞ y el controlador PI

5.5 Control H-Inf: Batería SOC

En la figura 13, se evidencia que, al considerar las mejoras implementadas en diversos casos de estudio, se logra un rendimiento mínimo en el Estado de Carga (SOC) de la batería del Vehículo Eléctrico Híbrido. A los 0.08 segundos, se observa que la respuesta del controlador proporcional integral (PI) se encuentra en un punto de coordenadas cartesianas correspondiente al estado de carga, alcanzando un valor de 49.9978%, mientras que el controlador H ∞ registra un valor de 50.0003% en ese mismo estado de carga.

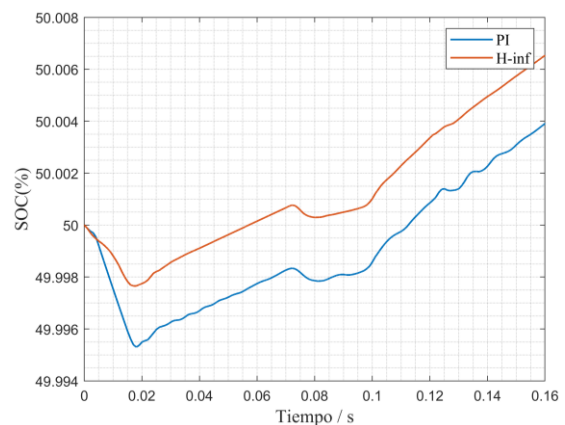


Figura 13 Señal del Batería SOC en comparación entre el controlador H ∞ y el controlador PI

Este hallazgo respalda la robustez de nuestro controlador H_∞ , posibilitando la obtención de resultados altamente eficaces en términos de duración, eficiencia, rendimiento y extensión de la vida útil de la batería.

5.6 Control H_∞ : Torque vs Velocidad

En la figura 14, se presenta una comparación del par de velocidad del motor en un vehículo eléctrico híbrido, ilustrando la operación del motor con el objetivo de minimizar el Consumo Específico de Combustible (BSFC) en el contexto de esta simulación. Se destaca que el motor permanece inactivo por debajo de las 850 rpm. En este escenario, se aprecia una marcada discrepancia en el desempeño entre el controlador H_∞ y el controlador PI, evidenciando una mejora significativa en el rendimiento general del vehículo tras la optimización con H_∞ .

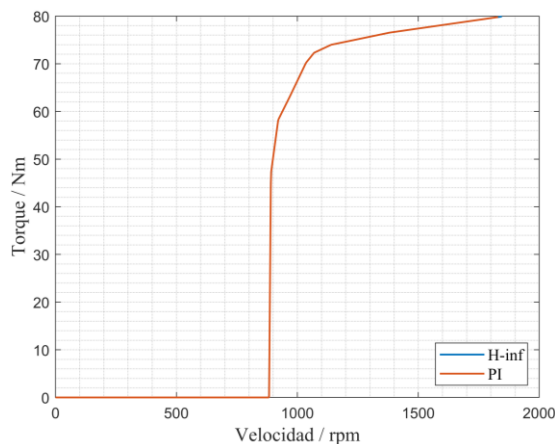


Figura 14 Señal de Torque vs Velocidad en comparación entre el controlador H_∞ y el controlador PI

6 Conclusiones

El presente trabajo ha logrado exitosamente alcanzar los objetivos propuestos en el diseño de un Sistema de Control Robusto para Sistemas de Potencia por Baterías de Vehículos Eléctricos Híbridos, basado en estrategias H_∞ , y su validación mediante co-simulación PLECS y Matlab / Simulink.

Los resultados obtenidos revelan mejoras significativas en variables críticas como la velocidad del motor eléctrico, la velocidad del generador y el voltaje del bus DC al implementar el controlador H_∞ . En comparación con el controlador PI, el controlador H_∞ ha demostrado un rendimiento superior, logrando una ganancia de +0.34 Mp(s) para la velocidad del motor eléctrico, +0.1 Mp(s) para la velocidad del generador y +13.733 Mp(s) para el voltaje del bus DC.

Este controlador ha demostrado una capacidad sustancialmente mejorada para mantener el voltaje del bus DC en el nivel deseado de 500V, mientras que logra un estado de carga del sistema de batería (SOC) del 50.0003%, ligeramente superior al obtenido con el controlador PI (49.9978%).

Se ha diseñado un algoritmo de control robusto basado en estrategias H_∞ , con el propósito de mitigar las limitaciones presentes en los controladores convencionales. Este enfoque se ha desarrollado con el objetivo de mejorar el rendimiento del controlador para diversos puntos de operación del Sistema de Potencia por Batería de Vehículos Eléctricos Híbridos (HEVs), particularmente en escenarios no lineales.

Las comparaciones detalladas presentadas en las tablas y figuras del trabajo respaldan de manera concluyente la eficacia de la estrategia H_∞ en comparación con los controladores convencionales PI, destacando mejoras significativas en la velocidad de respuesta y la capacidad de mantener el voltaje del bus de DC en niveles deseados frente a perturbaciones del usuario. Estas conclusiones respaldan la viabilidad y eficacia del enfoque de Control H_∞ para mejorar la estabilidad y rendimiento de los Sistemas de Potencia por Baterías en Vehículos Eléctricos Híbridos.

Esta investigación no solo contribuye al avance en el diseño de controladores para sistemas de potencia por baterías en HEVs, sino también sienta bases para futuras investigaciones en ingeniería eléctrica. La capacidad demostrada del controlador H ∞ para gestionar dinámicas altamente no lineales y su rendimiento superior frente a un controlador PI clásico sugiere un camino prometedor para la implementación práctica de estas estrategias en la movilidad eléctrica.

7 Referencias

- [1] M. Abul Masrur, “Hybrid and Electric Vehicle (HEV/EV) Technologies for Off-Road Applications,” *Proc. IEEE*, vol. 109, no. 6, pp. 1077–1093, 2021, doi: 10.1109/JPROC.2020.3045721.
- [2] L. Ortiz-Matos, L. B. Gutierrez-Zea, and J. W. Gonzalez-Sanchez, “A Methodology of Sensor Fault-tolerant Control on a Hierarchical Control for Hybrid Microgrids,” *IEEE Access*, vol. 11, no. June, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3279821.
- [3] L. Ortiz, J. W. Gonzalez, L. B. Gutierrez, and O. Llanes-santiago, “A review on control and fault-tolerant control systems of AC / DC microgrids,” *Heliyon*, vol. 6, no. June, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04799.
- [4] A. T. Aguila, L. M. Ortiz, and R. Orizondo, “Optimal Location and Dimensioning of Capacitors in Microgrids Using a Multicriteria Decision Algorithm,” *Heliyon*, vol. 7, no. August, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08061.
- [5] A. Águila, D. González, G. Gutiérrez, and L. Ortiz, “Ubicación y dimensionamiento óptimo de generación distribuida fotovoltaica en redes de distribución usando PSO Optimal location and dimensioning of photovoltaic distributed generation in,” *I+D Tecnológico*, vol. 18, no. 1, pp. 50–68, 2022, doi: <https://doi.org/10.33412/idt.v18.1.3> 219.
- [6] B. Ramírez, L. Ortiz, and W. Pavón, “Análisis Dinámico Comparativo de Métodos de Detección e identificación de Fallas de Sensado sobre el Control Local de Micro-redes,” *RISTI – Rev. Ibérica Sist. e Tecnol. Informação*, vol. E45, no. 44, pp. 1–17, 2021, [Online]. Available: <http://www.risti.xyz/issues/ristie45.pdf>.
- [7] A. Aguila Téllez, G. M. Gutiérrez Serna, D. L. González Samueza, and M. L. Ortiz, “Optimum location and sizing of capacitor banks using VOLT VAR compensation in micro-grids,” *IEE Lat. Am. Trans.*, vol. 18, no. 3, pp. 465–472, 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9082717.
- [8] G. K. Chinchuña Toledo and L. Ortiz Matos, “Mejoramiento de la fiabilidad en microredes mediante el control robusto de voltaje usando técnicas pasivas de tolerancia a fallos,” Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [9] L. Ortiz and A. Aguila, “Modeling and Control of an Automated System in Surgical Microscopy Based on Petri Nets,” *IEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 1, pp. 96–101, 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7430067.
- [10] D. Arias Cazco, R. A. Robayo Vasco, and L. Ortiz Matos, “Novel inteligente Step Voltaje Regulator (SVR) for residential electrical connections,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 4, pp. 1656–1661, 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7483497.
- [11] C. H. Lee and H. C. Yang, “A Privacy-Preserving Learning Method for Analyzing HEV Driver’s

- Driving Behaviors,” *IEEE Access*, vol. 11, no. June, pp. 76816–76826, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3297268.
- [12] M. U. Jan, A. Xin, M. A. Abdelbaky, H. U. Rehman, and S. Iqbal, “Adaptive and Fuzzy PI Controllers Design for Frequency Regulation of Isolated Microgrid Integrated with Electric Vehicles,” *IEEE Access*, vol. 8, no. 1, pp. 87621–87632, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993178.
- [13] A. K. Podder, O. Chakraborty, S. Islam, N. Manoj Kumar, and H. H. Alhelou, “Control Strategies of Different Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicles Applications,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 51865–51895, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3069593.
- [14] M. Of and M. R. Warhead, “Modeling and Control of a Power-Split Hybrid Vehicle,” vol. 16, no. 6, pp. 1242–1251, 2010.
- [15] M. Yang, Y. Li, H. Du, C. Li, and Z. He, “Hierarchical Multiobjective H-Infinity Robust Control Design for Wireless Power Transfer System Using Genetic Algorithm,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 27, no. 4, pp. 1753–1761, 2019, doi: 10.1109/TCST.2018.2814589.
- [16] J. T. De Carvalho Neto, A. L. De Oliveira Cavalcanti, and A. Ortiz Salazar, “Design and Implementation of DSP-Based H-Infinity Robust Controller for a Boost Converter,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 11, pp. 2766–2774, 2018, doi: 10.1109/TLA.2018.8795118.
- [17] Y. Zheng, S. E. Li, K. Li, and W. Ren, “Platooning of Connected Vehicles with Undirected Topologies: Robustness Analysis and Distributed H-infinity Controller Synthesis,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 19, no. 5, pp. 1353–1364, 2018, doi: 10.1109/TITS.2017.2726038.
- [18] S. E. Li, F. Gao, K. Li, L. Y. Wang, K. You, and D. Cao, “Robust Longitudinal Control of Multi-Vehicle Systems - A Distributed H-Infinity Method,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 19, no. 9, pp. 2779–2788, 2018, doi: 10.1109/TITS.2017.2760910.
- [19] X. Wu, J. Li, C. Su, J. Fan, and M. Xu, “A deep reinforcement learning based hierarchical eco-driving strategy for connected and automated HEVs,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 11, pp. 13901–13916, 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3283617.
- [20] Y. Y. Zhou *et al.*, “Study on fuel economy performance of HEV based on powertrain test bed,” *2013 World Electr. Veh. Symp. Exhib. EVS 2014*, pp. 1–5, 2014, doi: 10.1109/EVS.2013.6914760.
- [21] Bustamante Remache Carlos Andres - Llumi Guambo Ruben Byron, *Analisis comparativo de un vehiculo hibrido Toyota Prius frente a un vehículo eléctrico Kia Soul en la ciudad de Cuenca*. 2022.
- [22] T. Honeywill, “Honda accord,” *Automot. Eng.*, vol. 33, no. 5, pp. 24–25, 2022.
- [23] F. Territory and T. Kluger, “Ford Escape,” pp. 1–10, 2022.
- [24] Lexus, “Lexus rx safety.,” *Lexus*, 2019.
- [25] Y. Bai, J. Li, H. He, R. C. Dos Santos, and Q. Yang, “Optimal Design of a Hybrid Energy Storage System in a Plug-In Hybrid Electric Vehicle for Battery Lifetime Improvement,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 142148–142158, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3013596.
- [26] A. Rezaei, J. B. Burl, M. Rezaei, and B. Zhou, “Catch energy saving opportunity in charge-depletion

- mode, a real-time controller for plug-in hybrid electric vehicles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 11, pp. 11234–11237, 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2866569.
- [27] S. Li, P. Zhao, C. Gu, J. Li, D. Huo, and S. Cheng, “Aging Mitigation for Battery Energy Storage System in Electric Vehicles,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 14, no. 3, pp. 2152–2163, 2023, doi: 10.1109/TSG.2022.3210041.
- [28] L. Timilsina, P. R. Badr, P. H. Hoang, G. Ozkan, B. Papari, and C. S. Edrington, “Battery Degradation in Electric and Hybrid Electric Vehicles: A Survey Study,” *IEEE Access*, vol. 11, no. April, pp. 42431–42462, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3271287.
- [29] R. M. Reddy, M. Das, and N. Chauhan, “Novel Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Wide Ambient Temperature Electric Vehicles Operation,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 70, no. 7, pp. 2580–2584, 2023, doi: 10.1109/TCSII.2023.3237860.
- [30] R. Xiong, Y. Zhang, J. Wang, H. He, S. Peng, and M. Pecht, “Lithium-Ion Battery Health Prognosis Based on a Real Battery Management System Used in Electric Vehicles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 5, pp. 4110–4121, 2019, doi: 10.1109/TVT.2018.2864688.
- [31] O. Tremblay and L. A. Dessaint, “Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications,” *24th Int. Batter. Hybrid Fuel Cell Electr. Veh. Symp. Exhib. 2009, EVS 24*, vol. 2, pp. 930–939, 2009.
- [32] S. Azad and M. J. Alexander-Ramos, “Robust Combined Design and Control Optimization of Hybrid-Electric Vehicles Using MDSDO,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 5, pp. 4139–4152, 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3071863.
- [33] J. G. B. Sánchez and L. O. Matos, “Estrategia de tolerancia a fallas por condiciones ambientales para IEDS en subestaciones de distribución,” Universidad Politécnica Salesiana, 2016.
- [34] Z. Li and S. Li, “Saturated PI Control for Nonlinear System with Provable Convergence: An Optimization Perspective,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 68, no. 2, pp. 742–746, 2021, doi: 10.1109/TCSII.2020.3007879.
- [35] K. Iqbal and S. Ansari, “Near optimal PI Control of Cascaded Buck Converters in a DC Micro Grid,” *2022 IEEE 16th Int. Conf. Compat. Power Electron. Power Eng. CPE-POWERENG 2022*, pp. 1–6, 2022, doi: 10.1109/CPE-POWERENG54966.2022.9880865.
- [36] X. Ding, Z. Wang, and L. Zhang, “Hybrid Control-Based Acceleration Slip Regulation for Four-Wheel-Independent-Actuated Electric Vehicles,” *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 7, no. 3, pp. 1976–1989, 2021, doi: 10.1109/TTE.2020.3048405.
- [37] A. F. Falcón Ayala and L. Ortiz Matos, “Confiability en microredes eléctricas AC/DC usando control robusto H_∞ y estrategias de tolerancia a fallas,” Universidad Politécnica Salesiana, 2019.
- [38] S. X. Garrido Jácome and L. Ortiz Matos, “Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de micro-redes eléctricas en DC,” Universidad Politécnica Salesiana, 2019.
- [39] J. C. Buestán, L. Ortiz Matos, and A. Aguila Telelz, “Control Tolerante a Fallos Multi-Objetivo para BESS acoplados a Micro-redes aisladas basado en IMC y H_∞ ,” *Ser.*

- Científica la Univ. las Ciencias Informáticas*, vol. 15, no. 5, pp. 41–56, 2022, [Online]. Available: <https://publicaciones.uci.cu/index.php/serie/article/view/1046/912>.
- [40] J. R. Collaguazo Solís and L. Ortiz Matos, “Control de voltaje óptimo para sistemas de almacenamiento de energía de batería (BESS) acoplados a microrredes de AC utilizando algoritmos LQG,” Universidad Politécnica Salesiana, 2020.
- [41] X. Zhang, Z. Lu, X. Yuan, Y. Wang, and X. Shen, “L2-Gain Adaptive Robust Control for Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 6, pp. 7319–7332, 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3041653.
- [42] J. Ramírez, L. Ortiz, and A. Aguila, “Passive Control Tolerant to Sensing Faults in dynamic compensation devices - SVC through a hybrid strategy Control Pasivo Tolerante a Fallos de sensado en dispositivos de compensación dinámicos - SVC mediante una estrategia híbrida,” *Ingenius*, no. 28, pp. 34–43, 2022, doi: <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.03>.
- [43] S. A. Siffat, I. Ahmad, A. Ur Rahman, and Y. Islam, “Robust integral backstepping control for unified model of hybrid electric vehicles,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 49038–49052, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978258.
- [44] D. Wang, Z. Zhu, B. Ding, X. Dai, H. Li, and W. Wei, “Robust Frequency Control of Microgrid Containing Electric Vehicles,” *Proc. 34th Chinese Control Decis. Conf. CCDC 2022*, pp. 905–910, 2022, doi: 10.1109/CCDC55256.2022.10033642.
- [45] B. Sen Chen, M. Y. Lee, and T. H. Lin, “DNN-Based H_∞ Control Scheme of Nonlinear Time-Varying Dynamic Systems with External Disturbance and its Application to UAV Tracking Design,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 69635–69653, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3078122.
- [46] A. M. Ali, B. Moulik, and D. Soffker, “Intelligent Real-Time Power Management of Multi-Source HEVs Based on Driving State Recognition and Offline Optimization,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 24, no. 1, pp. 247–257, 2023, doi: 10.1109/TITS.2022.3215607.
- [47] C. Liang, X. Xu, F. Wang, S. Wang, and Z. Zhou, “CAN-Induced Asynchronous Random Delays-Considered Mode Transition System for DM-PHEV Based on Constrained Output Feedback Robust Control Strategy,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, no. 6, pp. 5995–6006, 2022, doi: 10.1109/TVT.2022.3164913.
- [48] Y. Chen, C. Stout, A. Joshi, M. L. Kuang, and J. Wang, “Driver-Assistance Lateral Motion Control for In-Wheel-Motor-Driven Electric Ground Vehicles Subject to Small Torque Variation,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 8, pp. 6838–6850, 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2817514.
- [49] I. Husain *et al.*, “Electric Drive Technology Trends, Challenges, and Opportunities for Future Electric Vehicles,” *Proc. IEEE*, vol. 109, no. 6, pp. 1039–1059, 2021, doi: 10.1109/JPROC.2020.3046112.
- [50] A. Coppola, D. G. Lui, A. Petrillo, and S. Santini, “Eco-Driving Control Architecture for Platoons of Uncertain Heterogeneous Nonlinear Connected Autonomous Electric Vehicles,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 23, no. 12, pp.

- 24220–24234, 2022, doi: 10.1109/TITS.2022.3200284.
- [51] K. Yeom, “Efficient self-driving strategy with preceding car following and road slopes based on learning predictive control,” *Energy Reports*, vol. 9, no. February, pp. 139–148, 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.05.249.
- [52] L. Guo, B. Yang, J. Ye, J. M. Velni, and W. Song, “Attack-Resilient Lateral Stability Control for Four-Wheel-Driven EVs Considering Changed Driver Behavior under Cyber Threats,” *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 8, no. 1, pp. 1362–1375, 2022, doi: 10.1109/TTE.2021.3102134.
- [53] D. Dogan, S. Bogosyan, and P. B. Baykas, “A Low-Cost Embedded Data Collection System for Traction Control Systems in Electric Vehicles,” *Proc. - 2019 IEEE Int. Conf. Mechatronics, ICM 2019*, vol. 1, pp. 513–518, 2019, doi: 10.1109/ICMECH.2019.8722837.
- [54] W. Zhao, Q. Song, W. Liu, M. Ahmad, and Y. Li, “Distributed electric powertrain test bench with dynamic load controlled by neuron PI speed-tracking method,” *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 5, no. 2, pp. 433–443, 2019, doi: 10.1109/TTE.2019.2904652.
- [55] L. Ortiz, R. Orizondo, A. Aguila, J. W. Gonzalez, I. Isaac, and J. L. Gabriel, “Hybrid AC / DC microgrid test system simulation: grid-connected mode,” *Heliyon*, vol. 5, no. August, p. 21, 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02862.
- [56] L. Ortiz Matos, L. B. Gutierrez Zea, J. W. González Sanchez, and A. Aguila Tellez, “An ARX-Petri Nets algorithm for Active Identification of an AC / DC Microgrid Simulation,” in *2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control* (CCAC), 2019, p. 6, doi: 10.1109/CCAC.2019.8921191.
- [57] L. Ortiz, L. B. Gutiérrez, J. W. González, and A. Águila, “A novel strategy for dynamic identification in AC/DC microgrids based on ARX and Petri Nets,” *Heliyon*, vol. 6, no. March, p. 18, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03559.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 9: Matriz de estado del arte

ESTRATEGIA DE CONTROL ROBUSTO POR H_{∞} PARA SISTEMAS DE POTENCIA POR BATERIAS DE HEVS USANDO CO-SIMULACIÓN PLECS Y MATLAB/SIMULINK																							
ITEM	DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA					
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	SISTEMAS DE POTENCIA POR BATERIAS	NORMATIA H-INF	IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	CO-SIMULACIÓN MATLAB / PLECS	CONTROL ROBUSTO	METODOLÓGÍAS DE CONTROL	CONTROLADOR ROBUSTO H-INF	ANÁLISIS TRANSITORIO	CAPACIDAD DEL SISTEMA	CAPACIDAD DEL PI	CAPACIDAD CONTROL ROBUSTO H-INF	CONTROL ROBUSTO H-INF	ALGORITMO H-INF	LINEALIZACIÓN DEL SISTEMA	IDENTIFICACIÓN DINÁMICA NO LINEAL	OBSERVADOR	CONTROL ROBUSTO H-INF	ALGORITMO ROBUSTO H-INF	
1	2021	Hybrid and Electric Vehicle (HEV/EV) Technologies for Off-Road Applications	3		✗	✗		✗	✗						✗			✗	✗				
2	2023	A Methodology of Sensor Fault-tolerant Control on a Hierarchical Control for Hybrid Microgrids	3			✗				✗										✗			
3	2020	A review on control and fault-tolerant control systems of AC / DC microgrids	4			✗		✗							✗								
4	2021	Optimal Location and Dimensioning of Capacitors in Microgrids Using a Multicriteria Decision Algorithm	3	✗	✗					✗					✗			✗	✗	✗			
5	2022	Ubicación y dimensionamiento óptimo de generación distribuida fotovoltaica en redes de distribución usando PSO Optimal location and dimensioning of photovoltaic distributed	3	✗	✗					✗													
6	2021	Análisis Dinámico Comparativo de Métodos de Detección e identificación de Fallas de Sensado sobre el Control Local de Micro-redes	4				✗								✗								✗
7	2020	Optimum location and sizing of capacitor banks using VOLT VAR compensation in micro-grids	3			✗	✗								✗	✗							✗
8	2018	Mejoramiento de la fiabilidad en microredes mediante el control robusto de voltaje usando técnicas pasivas de tolerancia a fallos	4	✗	✗					✗					✗				✗	✗			
9	2016	Modeling and Control of an Automated System in Surgical Microscopy Based on Petri Nets	3				✗								✗	✗							✗

ESTRATEGIA DE CONTROL ROBUSTO POR H_∞ PARA SISTEMAS DE POTENCIA POR BATERIAS DE HEVS USANDO CO-SIMULACIÓN PLECS Y MATLAB/SIMULINK

DATOS		TEMÁTICA							FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	SISTEMAS DE POTENCIA POR BATERIAS	NORMATIA H-INF	IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	CO-SIMULACIÓN MATLAB / PLECS	CONTROL ROBUSTO	METODLOGÍAS DE CONTROL	CONTROLADOR ROBUSTO H-INF	ANÁLISIS TRANSITORIO	CAPACIDAD DEL SISTEMA	CAPACIDAD DEL PI	CAPACIDAD CONTROL ROBUSTO H-INF	CONTROL ROBUSTO H-INF	ALGORITMO H-INF	LINEALIZACIÓN DEL SISTEMA	IDENTIFICACIÓN DINÁMICA NO LINEAL	OBSERVADOR	CONTROL ROBUSTO H-INF	ALGORITMO ROBUSTO H-INF
10	2016	Novel inteligente Step Voltaje Regulator (SVR) for residential electrical connections	2	✗	✗															✗	✗	
11	2023	A Privacy-Preserving Learning Method for Analyzing HEV Driver's Driving Behaviors	2		✗	✗		✗	✗												✗	✗
12	2020	Adaptive and Fuzzy PI Controllers Design for Frequency Regulation of Isolated Microgrid Integrated with Electric Vehicles	2	✗	✗					✗												
13	2021	Control Strategies of Different Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicles Applications	4						✗	✗							✗					
14	2010	Modeling and Control of a Power-Split Hybrid Vehicle	2				✗										✗	✗				
15	2019	Hierarchical Multiobjective H-Infinity Robust Control Design for Wireless Power Transfer System Using Genetic Algorithm	3	✗	✗						✗						✗					✗
16	2018	Design and Implementation of DSP-Based H-Infinity Robust Controller for a Boost Converter	2	✗	✗					✗										✗		
17	2018	Platooning of Connected Vehicles with Undirected Topologies: Robustness Analysis and Distributed H-infinity Controller Synthesis	4						✗		✗											

ESTRATEGIA DE CONTROL ROBUSTO POR H_∞ PARA SISTEMAS DE POTENCIA POR BATERIAS DE HEVS USANDO CO-SIMULACIÓN PLECS Y MATLAB/SIMULINK

ITEM	DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA					
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	SISTEMAS DE POTENCIA POR BATERIAS	NORMATIA H-INF	IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	CO-SIMULACIÓN MATLAB / PLECS	CONTROL ROBUSTO	METODLOGÍAS DE CONTROL	CONTROLADOR ROBUSTO H-INF	ANÁLISIS TRANSITORIO	CAPACIDAD DEL SISTEMA	CAPACIDAD DEL PI	CAPACIDAD CONTROL ROBUSTO H-INF	CONTROL ROBUSTO H-INF	ALGORITMO H-INF	LINEALIZACIÓN DEL SISTEMA	IDENTIFICACIÓN DINÁMICA NO LINEAL	OBSERVADOR	CONTROL ROBUSTO H-INF	ALGORITMO ROBUSTO H-INF
18	2018	Robust Longitudinal Control of Multi-Vehicle Systems - A Distributed H-Infinity Method	2	✗	✗					✗						✗						✗
19	2023	A deep reinforcement learning based hierarchical eco-driving strategy for connected and automated HEVs	1	✗	✗									✗						✗		
20	2014	Study on fuel economy performance of HEV based on powertrain test bed	1		✗					✗				✗						✗		
21	2022	Analisis comparativo de un vehiculo hibrido Toyota Prius frente a un vehiculo eléctrico Kia Soul en la ciudad de Cuenca	1		✗									✗						✗		
22	2022	Honda accord	1		✗					✗				✗						✗		
23	2022	Ford Escape	1		✗			✗	✗													
24	2019	Lexus rx safety	1	✗	✗					✗				✗						✗	✗	✗
25	2020	Optimal Design of a Hybrid Energy Storage System in a Plug-In Hybrid Electric Vehicle for Battery Lifetime Improvement	3	✗	✗					✗				✗				✗	✗	✗		

ESTRATEGIA DE CONTROL ROBUSTO POR H_∞ PARA SISTEMAS DE POTENCIA POR BATERIAS DE HEVS USANDO CO-SIMULACIÓN PLECS Y MATLAB/SIMULINK

ITEM	DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA			
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	SISTEMAS DE POTENCIA POR BATERÍAS	NORMATIA H-INF	IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	CO-SIMULACIÓN MATLAB / PLECS	CONTROL ROBUSTO	METODLOGÍAS DE CONTROL	CONTROLADOR ROBUSTO H-INF	ANÁLISIS TRANSITORIO	CAPACIDAD DEL SISTEMA	CAPACIDAD DEL PI	CAPACIDAD CONTROL ROBUSTO H-INF	CONTROL ROBUSTO H-INF	ALGORITMO H-INF	LINEALIZACIÓN DEL SISTEMA	IDENTIFICACIÓN DINÁMICA NO LINEAL	OBSERVADOR	CONTROL ROBUSTO H-INF	ALGORITMO ROBUSTO H-INF
26	2018	Catch energy saving opportunity in charge-depletion mode, a real-time controller for plug-in hybrid electric vehicles	2	✗						✗						✗						
27	2023	Aging Mitigation for Battery Energy Storage System in Electric Vehicles	3	✗	✗					✗				✗								
28	2023	Battery Degradation in Electric and Hybrid Electric Vehicles: A Survey Study	2					✗		✗				✗					✗			
29	2023	Novel Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Wide Ambient Temperature Electric Vehicles Operation	3				✗					✗	✗									
30	2019	Lithium-Ion Battery Health Prognosis Based on a Real Battery Management System Used in Electric Vehicles	5																		✗	
31	2009	Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications	1	✗	✗								✗	✗								
32	2021	Robust Combined Design and Control Optimization of Hybrid-Electric Vehicles Using MDSO	1												✗	✗	✗	✗			✗	
33	2016	Estrategia de tolerancia a fallas por condiciones ambientales para IEDS en subestaciones de distribución	1	✗	✗			✗													✗	

ESTRATEGIA DE CONTROL ROBUSTO POR H_{∞} PARA SISTEMAS DE POTENCIA POR BATERIAS DE HEVS USANDO CO-SIMULACIÓN PLECS Y MATLAB/SIMULINK

DATOS		TEMÁTICA							FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	SISTEMAS DE POTENCIA POR BATERÍAS	NORMATIA H-INF	IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	CO-SIMULACIÓN MATLAB / PLECS	CONTROL ROBUSTO	METODLOGÍAS DE CONTROL	CONTROLADOR ROBUSTO H-INF	ANÁLISIS TRANSITORIO	CAPACIDAD DEL SISTEMA	CAPACIDAD DEL PI	CAPACIDAD CONTROL ROBUSTO H-INF	CONTROL ROBUSTO H-INF	ALGORITMO H-INF	LINEALIZACIÓN DEL SISTEMA	IDENTIFICACIÓN DINÁMICA NO LINEAL	OBSERVADOR	CONTROL ROBUSTO H-INF	ALGORITMO ROBUSTO H-INF	
34	2021	Saturated PI Control for Nonlinear System with Provable Convergence: An Optimization Perspective	2					✗	✗			✗	✗									✗	
35	2022	Near optimal PI Control of Cascaded Buck Converters in a DC Micro Grid	1						✗									✗					
36	2021	Hybrid Control-Based Acceleration Slip Regulation for Four-Wheel-Independent-Actuated Electric Vehicles	4	✗	✗	✗		✗		✗							✗		✗			✗	
37	2019	Confiabilidad en microrredes eléctricas AC/DC usando control robusto H_{∞} y estrategias de tolerancia a fallas	1						✗														
38	2019	Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de micro-redes eléctricas en DC	1	✗	✗		✗	✗		✗							✗		✗			✗	
39	2022	Control Tolerante a Fallos Multi-Objetivo para BESS acoplados a Micro-redes aisladas basado en IMC y H_{∞}	1		✗	✗			✗		✗								✗			✗	
40	2020	Control de voltaje óptimo para sistemas de almacenamiento de energía de batería (BESS) acoplados a microrredes de AC utilizando algoritmos LQG	1		✗		✗	✗	✗	✗							✗						✗

ESTRATEGIA DE CONTROL ROBUSTO POR H_∞ PARA SISTEMAS DE POTENCIA POR BATERIAS DE HEVS USANDO CO-SIMULACIÓN PLECS Y MATLAB/SIMULINK

ITEM	DATOS		TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA			
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	SISTEMAS DE POTENCIA POR BATERIAS	NORMATIA H-INF	IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	CO-SIMULACIÓN MATLAB / PLECS	CONTROL ROBUSTO	METODLOGÍAS DE CONTROL	CONTROLADOR ROBUSTO H-INF	ANÁLISIS TRANSITORIO	CAPACIDAD DEL SISTEMA	CAPACIDAD DEL PI	CAPACIDAD CONTROL ROBUSTO H-INF	CONTROL ROBUSTO H-INF	ALGORITMO H-INF	LINEALIZACIÓN DEL SISTEMA	IDENTIFICACIÓN DINÁMICA NO LINEAL	OBSERVADOR	CONTROL ROBUSTO H-INF	ALGORITMO ROBUSTO H-INF
41	2021	L2-Gain Adaptive Robust Control for Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles	1		✗	✗	✗			✗								✗			✗	✗
42	2022	Passive Control Tolerant to Sensing Faults in dynamic compensation devices - SVC through a hybrid strategy Control Pasivo Tolerante a Fallos de sensado en dispositivos de compensación dinámicos - SVC mediante una estrategia híbrida	1		✗				✗	✗						✗						✗
43	2020	Robust integral backstepping control for unified model of hybrid electric vehicles	3	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗		✗		✗	✗	✗	✗	✗
44	2022	Robust Frequency Control of Microgrid Containing Electric Vehicles	3		✗	✗		✗		✗						✗					✗	✗
45	2021	DNN-Based H_∞ Control Scheme of Nonlinear Time-Varying Dynamic Systems with External Disturbance and its Application to UAV Tracking Design	1		✗		✗	✗		✗			✗				✗		✗	✗	✗	✗
46	2023	Intelligent Real-Time Power Management of Multi-Source HEVs Based on Driving State Recognition and Offline Optimization	2	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗				✗		✗	✗	✗	✗	✗
47	2022	CAN-Induced Asynchronous Random Delays-Considered Mode Transition System for DM-PHEV Based on Constrained Output Feedback Robust Control Strategy	2		✗					✗								✗			✗	

ESTRATEGIA DE CONTROL ROBUSTO POR H_{∞} PARA SISTEMAS DE POTENCIA POR BATERIAS DE HEVS USANDO CO-SIMULACIÓN PLECS Y MATLAB/SIMULINK

ITEM	DATOS		TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA			
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTICULO	CITAS	VEHICULOS ELÉCTRICOS	SISTEMAS DE POTENCIA POR BATERÍAS	NORMATA H-INF	IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	CO-SIMULACIÓN MATLAB / PLECS	CONTROL ROBUSTO	METODLOGÍAS DE CONTROL	CONTROLADOR ROBUSTO H-INF	ANÁLISIS TRANSITORIO	CAPACIDAD DEL SISTEMA	CAPACIDAD DEL PI	CAPACIDAD CONTROL ROBUSTO H-INF	CONTROL ROBUSTO H-INF	ALGORITMO H-INF	LINEALIZACIÓN DEL SISTEMA	IDENTIFICACIÓN DINÁMICA NO LINEAL	OBSERVADOR	CONTROL ROBUSTO H-INF	ALGORITMO ROBUSTO H-INF
48	2018	Driver-Assistance Lateral Motion Control for In-Wheel-Motor-Driven Electric Ground Vehicles Subject to Small Torque Variation	3		✗	✗	✗	✗						✗			✗		✗	✗	✗	✗
49	2021	Electric Drive Technology Trends, Challenges, and Opportunities for Future Electric Vehicles	3		✗		✗				✗							✗		✗	✗	✗
50	2022	Eco-Driving Control Architecture for Platoons of Uncertain Heterogeneous Nonlinear Connected Autonomous Electric Vehicles	2	✗	✗			✗		✗						✗		✗		✗	✗	✗
51	2023	Efficient self-driving strategy with preceding car following and road slopes based on learning predictive control	2		✗	✗			✗		✗							✗		✗	✗	✗
52	2022	Attack-Resilient Lateral Stability Control for Four-Wheel-Driven EVs Considering Changed Driver Behavior under Cyber Threats	4		✗		✗	✗		✗			✗				✗		✗	✗	✗	✗
53	2019	A Low-Cost Embedded Data Collection System for Traction Control Systems in Electric Vehicles	2		✗	✗	✗		✗		✗							✗		✗	✗	✗
54	2019	Distributed electric powertrain test bench with dynamic load controlled by neuron PI speed-tracking method	4		✗		✗	✗	✗	✗			✗				✗		✗	✗	✗	✗
55	2019	Hybrid AC / DC microgrid test system simulation: grid-connected mode	1	✗	✗	✗		✗		✗						✗		✗		✗	✗	✗
56	2019	An ARX Petri Nets algorithm for Active Identification of an AC / DC Microgrid Simulation	1		✗		✗	✗		✗			✗				✗		✗	✗	✗	✗
57	2020	A novel strategy for dynamic identification in AC/DC microgrids based on ARX and Petri Nets	1			✗		✗	✗		✗			✗				✗				
CANTIDAD:				21	40	16	16	19	19	14	24	5	4	8	15	6	16	8	18	20	28	20

7.2 Resumen de Indicadores

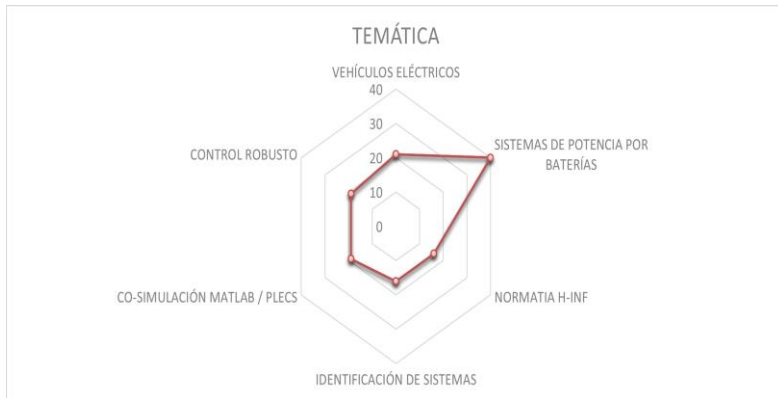


Figura 15 Indicador de Temática

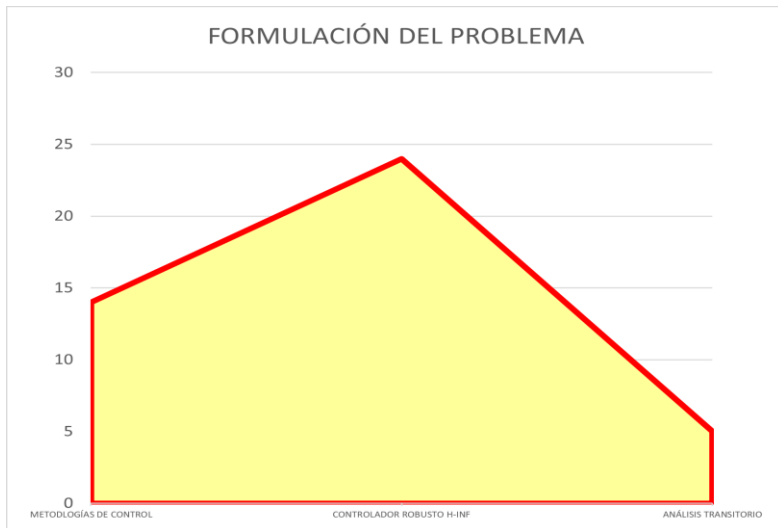


Figura 16 Indicador de Formulación del Problema

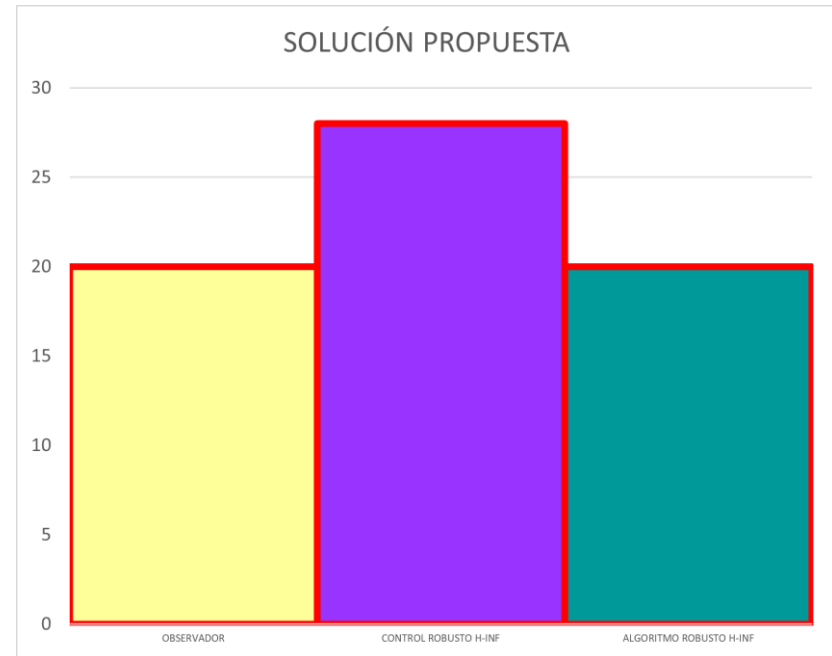


Figura 17 Indicador de Solución Propuesta