



INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Proyecto previo a la Obtención del Título de Ingeniero Automotriz

Autor: José Antonio Morán Estévez

Tutor: Alex Fernando Llerena Mena, MSc.

Análisis de Controles PID y MPC en la Regulación de la Temperatura de Baterías en Vehículos Eléctricos

Certificado de Autoría

Yo, José Antonio Morán Estévez, declaro bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedo los derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y leyes.

José Antonio Morán Estévez

C.I. 1727270744

Aprobación del Tutor

Yo, Alex Fernando Llerena Mena certifico que conozco al autor del presente trabajo siendo responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

Ing. Alex Fernando Llerena Mena.

C.I. 1804973277

Director del Proyecto

Agradecimiento

Quiero expresar mi agradecimiento a mi familia, quienes han sido mi pilar fundamental a lo largo de este camino. Su amor, apoyo constante y palabras de aliento me han acompañado en cada etapa de esta travesía académica. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

También deseo agradecer sinceramente a los profesores de mi carrera, quienes con su dedicación, conocimientos y vocación docente han dejado una huella significativa en mi formación profesional y personal. Gracias por compartir su experiencia y por motivarme a dar siempre lo mejor de mí.

De igual manera, extendo mi gratitud a la institución que me acogió durante estos años, brindándome no solo una educación de calidad, sino también un espacio para crecer, aprender y desarrollar mis habilidades. Este trabajo representa el fruto del esfuerzo conjunto de todos quienes fueron parte de este proceso.

Índice General

Certificado de Autoría.....	iii
Aprobación del Tutor	iv
Agradecimiento	v
Índice General	vi
Índice de Figuras	viii
Índice de Gráficos	ix
Índice de Tablas.....	x
Resumen.....	xi
Abstract	xii
Introducción	1
Capítulo I.	2
Antecedentes	2
1.1 Planteamiento del Problema.....	2
1.2 Formulación del Problema	2
1.3 Sistematización del Problema	2
1.4 Objetivo General	3
1.5 Objetivos Específicos.....	3
1.6 Justificación y Delimitación de la Investigación	3
1.6.1 Justificación Teórica.....	3
1.6.2 Justificación Metodológica.....	4
1.6.3 Justificación Práctica	4
1.6.4 Delimitación Temporal.....	4
1.6.5 Delimitación Geográfica.....	5
1.6.6 Delimitación del Contenido	5

Capítulo II.	7
Marco de Referencia	7
2.1 Fundamentos de Vehículos eléctricos y Baterías de Iones de Litio.	7
2.2 Principios de Control de Temperatura en Sistemas de Almacenamiento de Energía....	10
2.3 Análisis Comparativo de Algoritmos de Control: PID vs. MPC.	13
2.4 Revisión Bibliográfica sobre Aplicaciones de PID vs. MPC.	15
Capítulo III.	18
Diseño de los modelos de simulación.	18
3.1 Selección de Parámetros y Configuraciones para Simulación.	18
3.2 Implementación de Algoritmos de Control PID y MPC en Simulink.	19
3.3 Definición de escenarios de Simulación y Variables de Control.	27
3.4 Metodología para el Análisis y la Comparación de Datos.	29
Capítulo IV.	32
Resultados y Análisis de Datos.	32
4.1 Análisis de la Eficiencia de las Baterías Bajo Diferentes Algoritmos de Control.	32
4.2 Comparación de los Rendimientos de PID y MPC.	38
Conclusiones	41
Recomendaciones.....	42
Bibliografía	43

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Esquema de un controlador PID</i>	11
Figura 2 <i>Esquema de un controlador MPC</i>	12
Figura 3 <i>Bloques de simulación de Simulink del controlador PID</i>	20

Índice de Gráficos

Gráfico 1	<i>Temperatura de batería con controlador PID a temperatura ambiente de 38°C....</i>	33
Gráfico 2	<i>Temperatura de batería con controlador PID a temperatura ambiente 20°C</i>	34
Gráfico 3	<i>Temperatura de batería con controlador MPC a temperatura ambiente 38°C.....</i>	36
Gráfico 4	<i>Temperatura de batería con controlador MPC a temperatura ambiente 20°C.....</i>	37

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Comparación entre algoritmos PID y MPC</i>	15
Tabla 2 <i>Escenarios de simulación</i>	29

Resumen

La creciente adquisición de vehículos eléctricos (EV) ha destacado la importancia de una gestión térmica eficiente en las baterías de iones de litio, ya que su temperatura influye de manera directa en el rendimiento, la seguridad y la vida útil de la misma. Este estudio evalúa y compara dos estrategias de control avanzado que son el PID (Proporcional-Integral-Derivativo) y MPC (Control Predictivo basado en Modelos) usados para optimizar la regulación térmica en estas baterías. Mediante simulaciones en Simulink/Matlab, se analiza su eficiencia en distintos escenarios operativos, considerando variables como carga, descarga y condiciones ambientales.

El control PID, ampliamente utilizado por su simplicidad y robustez, se contrasta con el MPC, que utiliza modelos predictivos para anticipar cambios y ajustar el sistema de forma proactiva. Los resultados demuestran que el MPC supera al PID en precisión y adaptabilidad, especialmente en entornos dinámicos, reduciendo oscilaciones y mejorando la estabilidad térmica. Además, el MPC muestra mayor eficiencia energética, un factor clave para extender la autonomía de los EV.

Esta investigación aporta soluciones prácticas para la industria, subrayando que, aunque el PID sigue siendo viable por su bajo coste computacional, el MPC representa una alternativa superior en sistemas que requieren alta eficiencia y capacidad de adaptación. Los hallazgos contribuyen al desarrollo de vehículos eléctricos más sostenibles y confiables, alineados con los objetivos de descarbonización del transporte.

Palabras clave: Baterías de litio, control térmico, PID, MPC, vehículos eléctricos, Simulink.

Abstract

The growing adoption of electric vehicles (EVs) has underscored the importance of efficient thermal management in lithium-ion batteries, as temperature directly impacts performance, safety, and lifespan. This study evaluates and compares two advanced control strategies—PID (Proportional-Integral-Derivative) and MPC (Model Predictive Control)—to optimize thermal regulation in these batteries. Using Simulink/Matlab simulations, their efficiency is analyzed under various operational scenarios, including charging, discharging, and environmental conditions.

The widely used PID control, known for its simplicity and robustness, is contrasted with MPC, which employs predictive models to proactively adjust the system. Results demonstrate that MPC outperforms PID in precision and adaptability, particularly in dynamic environments, reducing oscillations and improving thermal stability. Additionally, MPC exhibits higher energy efficiency, a critical factor in extending EV range.

This research provides practical insights for the industry, highlighting that while PID remains viable due to its low computational cost, MPC is a superior alternative for systems requiring high efficiency and adaptability. The findings contribute to the development of more sustainable and reliable electric vehicles, aligning with global decarbonization goals in transportation.

Keywords: Lithium-ion batteries, thermal control, PID, MPC, electric vehicles, Simulink.

Introducción

En los últimos años, la transición hacia la movilidad sostenible ha llevado al incremento en la adopción de vehículos eléctricos (VE), los cuales dependen de baterías de iones de litio para su funcionamiento. El rendimiento y la eficiencia de estas baterías, sin embargo, dependen de la regulación de su temperatura. Lograr mantener las baterías de iones de litio dentro de un rango térmico óptimo es esencial para conseguir de manera efectiva maximizar su vida útil y por ende mejorar la eficiencia energética del vehículo. Esto ha generado la necesidad de investigar y desarrollar sistemas de control más efectivos para la gestión térmica en VE.

Los sistemas de control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) y MPC (Control Predictivo por Modelo) han surgido como las principales estrategias para abordar el control térmico de las baterías. El PID es reconocido por su potencia y simplicidad, estas características han facilitado su aplicación en múltiples industrias. Mientras que, el MPC se destaca por su capacidad para anticipar y optimizar el control en sistemas que involucran múltiples variables y restricciones, por lo tanto, esto puede resultar que su implementación sea más compleja.

El presente estudio se centra en el análisis comparativo de estos dos métodos de control (PID y MPC), utilizando simulaciones en Simulink con la finalidad de evaluar el desempeño de los mismo en la regulación térmica de baterías de iones de litio en los vehículos eléctricos. La investigación busca determinar, por medio de la simulación, cuál de estos métodos de control es más eficaz en la optimización de la eficiencia energética y la durabilidad de las baterías bajo diferentes condiciones operativas, proporcionando información importante con el objetivo de la mejora continua de los VE y su aceptación en el mercado automotriz.

Capítulo I

Antecedentes

1.1 Planteamiento del Problema

El auge en la adquisición de vehículos eléctricos (VE) ha traído consigo algunos desafíos relacionados a la eficiencia energética y el rendimiento de los elementos que los componen, específicamente las baterías de iones de litio. Un aspecto crítico que suele pasar por alto es el control de la temperatura de la batería, el cual tiene un impacto altamente significativo en la eficiencia energética, así como en la vida útil de la batería. Existen diversas estrategias de control como el Control Proporcional Integral Derivativo (PID) y el control Predictivo por Modelo (MPC) aún no existe claridad respecto a que enfoque es más efectivo para la optimización de la eficiencia energética bajo diferentes escenarios y condiciones por medio de la temperatura. Esta falta de claridad limita el desarrollo y la adopción de tecnologías de VE más eficientes en la industria automotriz.

1.2 Formulación del Problema

¿Cómo impactan los algoritmos de control PID Y MPC en la regulación térmica de las baterías de iones de litio y, en consecuencia, la eficiencia energética de las misma, y cuáles de estos enfoques es más eficaz para optimizar dicha eficiencia?

1.3 Sistematización del Problema

- ¿Cuál es la relevancia de la eficiencia energética en vehículos eléctricos y como se relaciona con el control de temperatura de las baterías de iones de litio?
- ¿Qué impacto tienen los algoritmos de control PID y MPC en el control de temperatura de las baterías de iones de litio en vehículos eléctricos?
- ¿Cómo se pueden simular y analizar estos factores de manera efectiva usando Simulink?

- ¿Cómo se compara la eficacia de los algoritmos PID y MPC frente a diferentes escenarios con determinadas condiciones?
- ¿Qué métricas específicas son adecuadas para evaluar la eficiencia energética en los escenarios determinados?

1.4 Objetivo General

Analizar el desempeño de los algoritmos de control PID y MPC mediante simulaciones en Simulink en la regulación térmica de baterías de iones de litio de un vehículo eléctrico.

1.5 Objetivos Específicos

- Comprender los principios fundamentales de los algoritmos de control PID y MPC para la determinación de sus ventajas y a su vez escenarios de aplicación.
- Realizar simulaciones con el fin de evaluar de las respuestas dinámicas de PID y MPC frente a variaciones en las condiciones de temperatura ambiental.
- Comparar la estabilidad y también la velocidad de respuesta de los resultados obtenidos por medio de las simulaciones de cada controlador.

1.6 Justificación y Delimitación de la Investigación

1.6.1 Justificación Teórica

Este proyecto se analizará el desempeño de los algoritmos de control PID y MPC para encontrar una regulación térmica óptima en las baterías de iones de litio utilizadas en los vehículos eléctricos, y así obtener mejoras para la industria en el contexto de la sostenibilidad global. El estudio de los algoritmos de control PID y MPC en la regulación térmica es importante, ya que influye de manera directa en la eficiencia, fiabilidad y durabilidad de los VE. Además, la utilización de simulaciones en Simulink permitirá un análisis detallado y a su vez, flexible de estos sistemas de control, brindando una comprensión más profunda de su funcionamiento en diferentes escenarios donde pueden operar, lo cual es clave para el avance y aceptación de la tecnología de los vehículos eléctricos.

1.6.2 Justificación Metodológica

La metodología de esta investigación consiste en ejecutar simulaciones en el entorno de Simulink para desarrollar algoritmos de control PID y MPC para la gestión térmica de baterías de litio en vehículos eléctricos, se justifica ya que genera un entorno preciso y controlado. Esta metodología permite experimentar con distintos escenarios y condiciones operativas sin las complicaciones inherentes a los ensayos en entornos reales, como limitaciones económicas, de tiempo o riesgos técnicos. De igual manera, estas simulaciones hacen que los hallazgos sean relevantes y aplicables en el contexto del progreso en la ciencia y tecnología de vehículos eléctricos automotrices y sistemas de control, siguiendo consecuentemente las tendencias actuales de investigación y tecnología.

1.6.3 Justificación Práctica

La justificación práctica de este estudio radica en su aplicabilidad directa al desarrollo y mejora de vehículos eléctricos. Al estudiar y comparar los algoritmos de control térmico PID y MPC que pueden aplicarse para la regulación térmica de baterías de iones de litio, este proyecto busca desarrollar métodos prácticos para mejorar la economía de energía de los vehículos eléctricos. Dada la importancia de la efectividad y durabilidad de las baterías para el éxito y la penetración en el mercado de los vehículos eléctricos, los hallazgos podrían tener amplias implicaciones para la industria automotriz. Además, al utilizar herramientas de simulación como Simulink, el modelo propuesto tiene la ventaja de ofrecer predicciones rápidas en la dinámica del sistema de baterías bajo diferentes condiciones de operación, lo cual es esencial para vehículos sostenibles y energéticamente eficientes.

1.6.4 Delimitación Temporal

El proyecto se llevará a cabo en un lapso estimado de 16 semanas comenzando en mayo de 2024 y concluyendo en septiembre de 2024. Esta delimitación temporal está estructurada para abarcar todas las fases de proyecto, desde la fase inicial de revisión bibliográfica y

formulación de la metodología, pasando por la modelización y simulación en Simulink, hasta el análisis de los resultados y la redacción del informe final.

1.6.5 Delimitación Geográfica

La investigación se centrará en un ambiente de simulación, excluyendo así la necesidad de delimitar la investigación a una región geográfica específica.

1.6.6 Delimitación del Contenido

La investigación se limitará únicamente al estudio y comparación de los controladores PID y MPC (Proporcional-Integral-Derivativo y Control Predictivo de Modelo) para el sistema de gestión térmica de las baterías de iones de litio. Estos dos algoritmos se eligen debido a su importancia y uso común en sistemas de control térmico, sin considerar otros algoritmos que podrían aplicarse en este campo.

El estudio está restringido solo al uso de baterías de iones de litio, y no abordará otros medios de almacenamiento de energía como baterías de plomo-ácido, de NiMH, supercondensadores, etc. Este límite proporciona un alcance más concreto y específico sobre un tipo de batería.

Solo se utilizará la herramienta Simulink para el modelado y simulación de algoritmos de control térmico. Este entorno se selecciona debido a su capacidad para trabajar con dinámicas complejas y controladores, así como su prevalencia en la academia y la industria.

Además, el estudio no cubrirá otros algoritmos PID y MPC para otras aplicaciones de confort térmico en vehículos eléctricos. En consecuencia, se eliminan las posibles aplicaciones a otros campos como sistemas industriales, procesos químicos o energías renovables para garantizar una exploración específica y exhaustiva en el ámbito aquí presentado.

Finalmente, los hallazgos y conclusiones de esta investigación no serán directamente aplicables a vehículos eléctricos con batería de iones de litio debido a las diferencias

fundamentales en la operación. También significa que las contribuciones están relacionadas e inmediatamente aplicables a esta tecnología y sector.

Capítulo II

Marco de Referencia

2.1 Fundamentos de Vehículos eléctricos y Baterías de Iones de Litio.

El marco teórico del estudio se basa en los controladores PID, así como en los controladores predictivos de modelo para la gestión térmica de vehículos eléctricos con baterías de iones de litio (Li-ion). Este desafío se relaciona con maximizar la eficiencia energética y la vida útil de la batería, y es crucial para la manejabilidad y durabilidad de los vehículos eléctricos (EV).

Este trabajo aborda el tema cruzado entre la tecnología automotriz y el control automático, y encuentra que diferentes estrategias de control muestran efectos diversos evidentes en el rendimiento de las baterías de los EV bajo diferentes condiciones de trabajo.

Un avance en la tecnología automotriz, los vehículos eléctricos emplean uno o más motores eléctricos como fuente de propulsión. Los EV funcionan con baterías recargables como las de iones de litio, a diferencia de los vehículos de combustión interna. Esta solución no solo disminuye la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también proporciona una mayor eficiencia energética junto con menores costos operativos. Los VE son clave en el movimiento hacia una movilidad sostenible y la reducción del impacto ambiental en el transporte. (Smith & Castellano, 2021)

Figura 1

Ejemplo de vehículos eléctricos(VE) en Ecuador



Fuente: <https://www.eluniverso.com/noticias/informes/los-7-vehiculos-electricos-mas-vendidos-en-ecuador-en-2025-nota/>

Los vehículos eléctricos tienen una historia más larga de lo que muchos piensan. Los primeros prototipos de vehículos eléctricos (VE) se desarrollaron en el siglo XIX aproximadamente, incluso antes de que los vehículos de combustión interna se convirtieran en la norma. A finales del siglo XIX y principios del XX, los VE eran bastante populares, especialmente en las áreas urbanas debido a su funcionamiento silencioso y limpio en comparación con los vehículos de gasolina. Por lo que se puede apreciar como la tecnología de estos vehículos a evolucionado a través de varios años siempre en busca de una mejor eficiencia.

Existen varios tipos de vehículos eléctricos, cada uno con diferentes configuraciones y propósitos. Por un lado, están los Vehículos Eléctricos de Batería (BEV) funcionan exclusivamente con energía almacenada en baterías recargables. También se encuentran los Vehículos Eléctricos Híbridos (HEV) combinan un motor de combustión interna con uno o más motores eléctricos y baterías, lo que permite un funcionamiento más eficiente. Finalmente, están los Vehículos Eléctricos Híbridos Enchufables (PHEV) son similares a los HEV, pero tienen la capacidad de recargar las baterías a través de una toma de corriente externa, lo que permite una mayor autonomía en modo eléctrico.

El campo de los VE está en constante evolución con innovaciones como mejoras en las baterías, con investigaciones en baterías de estado sólido que prometen mayor capacidad, seguridad y tiempos de carga más rápidos. Por otro lado, se están desarrollando tecnologías de reciclaje de baterías con la finalidad de lograr reducir el impacto ambiental, de esta manera lograr la sostenibilidad del mercado de vehículos eléctricos. En adición, también se están desarrollando sistemas de conducción autónoma para mejorar la seguridad y la eficiencia del transporte.

Las baterías de iones de litio son el corazón de todos los vehículos eléctricos, proporcionando la electricidad necesaria para el funcionamiento de los VE. Las baterías son

deseables por su alta densidad de energía, lo que permite almacenar más energía en la misma cantidad de espacio que las tecnologías de baterías anteriores. Además, duran más y manejan más ciclos de carga/descarga antes de experimentar una gran pérdida de capacidad. Estas baterías deben ser tanto eficientes en energía como de larga duración para permitir que el vehículo eléctrico funcione aceptablemente en términos de autonomía y disponibilidad. (Johnson, 2022)

Figura 2

Baterías de iones de Litio en un vehículo eléctrico



Fuente: (Sembi, 2020)

Hay varias partes principales en una batería de iones de litio: un ánodo, un cátodo, un electrolito y un separador. El ánodo se construye típicamente de grafito y el cátodo puede ser de varios materiales, incluyendo óxidos de cobalto, níquel, manganeso o hierro. Cuando la batería se carga, los iones de litio viajan entre el cátodo y el ánodo a través del electrolito, y durante la descarga regresan al cátodo, liberando electricidad. Estas características hacen que las baterías de iones de litio tengan una alta eficiencia de conversión de energía y buen almacenamiento de energía.

A pesar de sus numerosos beneficios, las baterías de iones de litio no están exentas de inconvenientes. Una preocupación principal es que son susceptibles al sobrecalentamiento y si los dispositivos no pueden manejar el riesgo de manera segura, puede resultar en un problema

de seguridad, como un incendio o explosión. Para abordar este problema, se han diseñado sistemas avanzados de gestión de baterías (BMS) para controlar la carga y la temperatura. En segundo lugar, el costo necesita reducirse aún más, ya que muchas soluciones anteriores en movimiento forzado son costosas. La fabricación de baterías de iones de litio requiere materiales costosos y procedimientos complicados, lo que significa que el costo total de los vehículos eléctricos puede ser elevado. Sin embargo, están surgiendo costos más bajos debido a la mejora de la tecnología de producción y la economía de escala.

2.2 Principios de Control de Temperatura en Sistemas de Almacenamiento de Energía

El sistema de gestión térmica de las baterías de iones de litio para vehículos eléctricos es una parte importante que afecta en gran medida la eficiencia, seguridad y vida útil de la batería. Esta regla es mantener la temperatura de la batería dentro de un cierto límite; de lo contrario, la batería puede calentarse o enfriarse demasiado, perdiendo capacidades de carga y causando problemas de fiabilidad como la degradación térmica, y problemas de seguridad como incendios y explosiones. Se necesita una gestión térmica efectiva para lograr una eliminación suficiente del calor, especialmente en la carga rápida o uso de alta energía. Además, una buena gestión térmica es clave para el funcionamiento óptimo de la batería en todas las condiciones operativas y ambientales, y entra en el mercado. (Wang & Yuan, 2020)

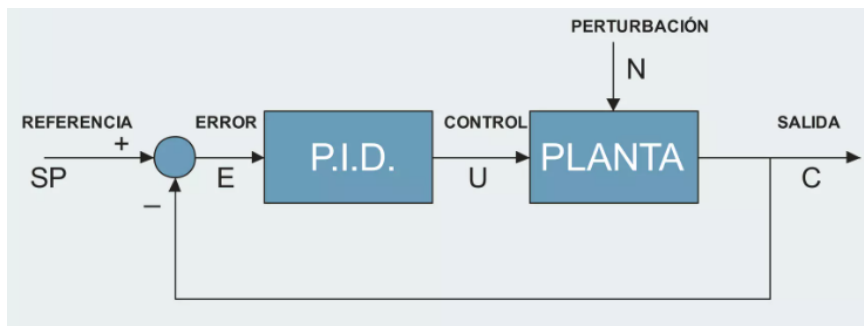
Una clase importante de algoritmo de control para industrias llamado proporcional-integral-derivativo (PID) se utiliza aquí, que manipula continuamente la salida para lograr un nivel de referencia deseado. El término proporcional del controlador contrarresta el error actual (la diferencia entre la medición y el punto de ajuste), el término integral del controlador trata con la acumulación de errores pasados, y el término derivativo del controlador anticipa el curso futuro del error. Tal estructura proporciona un ajuste fino, efecto de ajuste rápido y puede

aplicarse a numerosas aplicaciones como controladores de temperatura, controladores de velocidad de motor y similares. (Liu & Wang, 2020)

Además, el control PID puede realizarse mediante hardware y software, por lo que es flexible. En sistemas embebidos, por ejemplo, puede colocarse directamente en microcontroladores para lograr un uso en tiempo real. En aplicaciones de control industrial, una buena opción para un controlador a un costo relativamente bajo es el llamado PID o controlador de tres términos en lugar de uno muy simple. Sus parámetros pueden ajustarse fácilmente de modo que el comportamiento del controlador pueda personalizarse para coincidir con las características del sistema en cuestión, permitiendo una mejor precisión y estabilidad del control.

Figura 3

Esquema de un controlador PID



Fuente: <https://www3.fi.mdp.edu.ar/control4c7/APUNTES/Clase%207%20-%20PID.pdf>

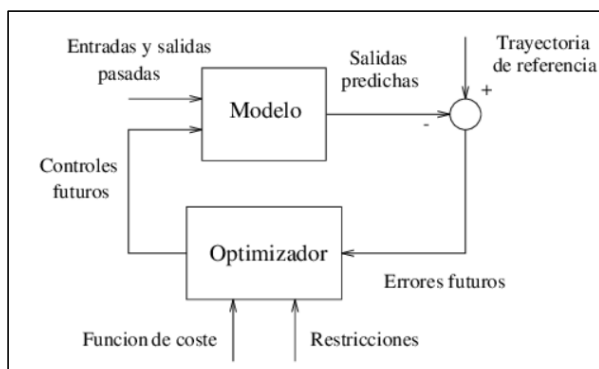
MPC, por otro lado, es un enfoque de control basado en modelos que utiliza modelos matemáticos para predecir y controlar el comportamiento futuro de un proceso. A diferencia de las técnicas de control convencionales, MPC considera restricciones y perturbaciones y su uso ha sido prominente en el control de sistemas complejos, incluyendo plantas químicas, y más recientemente en el control de sistemas en vehículos eléctricos. Su capacidad de predecir eventos futuros y adaptar las acciones de control en consecuencia lo hace muy adecuado para sistemas controlados, donde la naturaleza de tales sistemas es precisa y de control adaptativo. (Garcia, Prett & Morari, 2021)

MPC, por otro lado, es un enfoque de control basado en modelos que utiliza modelos matemáticos para predecir y controlar el comportamiento futuro de un proceso. A diferencia de las técnicas de control convencionales, MPC considera restricciones y perturbaciones y su uso ha sido prominente en el control de sistemas complejos, incluyendo plantas químicas, y más recientemente en el control de sistemas en vehículos eléctricos. Su capacidad de predecir eventos futuros y adaptar las acciones de control en consecuencia lo hace muy adecuado para sistemas controlados, donde la naturaleza de tales sistemas es precisa y de control adaptativo.

El MPC es atractivo debido a su flexibilidad y adaptabilidad en una amplia gama de aplicaciones industriales. Tiene la capacidad de procesar varias variables de entrada y salida al mismo tiempo para mejorar el rendimiento general del sistema. En el área de la e-movilidad, la gestión de energía del vehículo eléctrico (EV), MPC se ha utilizado para gestionar la potencia de la batería, la regeneración de energía de frenado y la asignación del consumo de energía entre los dispositivos del vehículo. Esta optimización en tiempo real no solo conduce a un menor consumo de energía, sino a una vida útil más larga de la batería y una experiencia de conducción óptima. La aplicación de MPC a sistemas industriales también tiene potencial para minimizar costos y mejorar la seguridad asegurando la operación del proceso dentro de sus límites seguros y eficientes.

Figura 4

Esquema de un controlador MPC



(Gonz & Tamayo, 2005, p. 14)

2.3 Análisis Comparativo de Algoritmos de Control: PID vs. MPC

Los vehículos eléctricos (EV) se han convertido en una parte integral de la industria automotriz, ya que ofrecen una solución perfecta a los problemas energéticos y ambientales, siendo los vehículos más amigables con el medio ambiente hasta ahora. Los algoritmos de control que mejorarían el rendimiento y gobernarían problemas complejos dentro de los EV incluyen el Control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y el Control Predictivo de Modelo (MPC). La comparación y verificación de aplicaciones de los dos métodos de control se detallan, enfocándose en los vehículos eléctricos.

Computacionalmente hablando, los controladores PID tienen la ventaja de la simplicidad y facilidad de implementación. Es un enfoque que los ingenieros y técnicos pueden comprender y ajustar fácilmente, algo que es particularmente útil para aplicaciones de EV donde la velocidad y la facilidad de uso son importantes. Por otro lado, el MPC requiere una comprensión más profunda de la teoría de control y métodos de optimización, y más recursos computacionales, lo que puede hacer que la realización de esta estrategia sea más compleja.

El control PID puede tolerar perturbaciones y cambios en el sistema hasta cierto grado, pero la calidad del control puede reducirse con sistemas altamente no lineales o multivariantes. En los coches eléctricos, esto puede ser una gran desventaja para aplicaciones como la recuperación de energía, la alimentación rápida de energía y el control avanzado del equilibrio de la batería. Para este fin, el MPC es más flexible para variaciones y perturbaciones, ya que podría actualizar sus predicciones y optimizaciones en un nivel en tiempo real, lo que lo hace más favorable para la gestión de energía y la optimización del rendimiento en sistemas dinámicos y complicados.

Una gran característica del MPC es su capacidad para tener en cuenta las restricciones directamente dentro del algoritmo de control. Esto es especialmente crítico en aplicaciones de vehículos eléctricos, donde la gestión efectiva de la energía y la prevención de puntos de operación seguros son cruciales. En contraste, el PID no toma en cuenta explícitamente las restricciones y se deben usar medidas adicionales para evitar exceder los límites de un sistema.

En rendimiento de tiempo absoluto, el PID (cuando está bien ajustado) ofrece un rendimiento muy eficiente y una carga computacional pequeña, lo que lo hace adecuado para sistemas con pequeña respuesta de tiempo (bajo TJ) y altos tiempos de actualización. Aunque el MPC es una herramienta poderosa, puede sufrir problemas de rendimiento en tiempo real ya que los problemas de optimización deben resolverse en cada muestra de control. Pero ahora, con las computadoras volviéndose más poderosas y el algoritmo de optimización volviéndose más rápido, la desventaja está disminuyendo.

En los EV, el PID se aplica en el control de temperatura, el control de velocidad del motor y en los sistemas de control climático. Es apropiado para circunstancias cuando la respuesta del sistema es relativamente lineal y predecible. En contraste, el MPC se aplica para optimizar la gestión de energía de la batería (BEM), la recuperación de energía al frenar y la asignación de energía a través de varios sistemas del vehículo. Estas aplicaciones requieren un control avanzado y que el comportamiento del sistema sea predicho y optimizado en el futuro.

El control PID y el MPC son grandes herramientas, y ambos tienen su propósito basado en el requerimiento de la aplicación cuando se trata de vehículos eléctricos. El PID es realmente más adecuado para aplicaciones donde se necesita ser rápido y/o simple, y el sistema es bastante lineal y predecible. Por otro lado, el MPC es más apropiado para sistemas complejos y multivariantes en los que las restricciones operativas y la anticipación de eventos futuros son esenciales. La decisión entre PID y MPC debe hacerse considerando un análisis preciso de las características del sistema y los requisitos de control. Con el rápido desarrollo de técnicas de

computación y algoritmos de optimización, las aplicaciones del MPC están en aumento, lo que empuja la frontera del control avanzado para los EV.

Tabla 1

Comparación entre algoritmos PID y MPC

Aspecto	Control PID	Control MPC
Simplicidad	Método simple, fácil de entender y ajustar. Ideal para implementaciones rápidas.	Requiere conocimiento avanzado y mayor capacidad computacional. Más complejo de implementar.
Robustez y Adaptabilidad	Robusto ante perturbaciones moderadas, pero menos eficaz en sistemas no lineales y multivariables.	Alta adaptabilidad, puede actualizar predicciones y optimizaciones en tiempo real. Ideal para sistemas dinámicos y complejos.
Manejo de restricciones	No considera restricciones explícitas; se requieren mecanismos adicionales para mantener seguridad operativa.	Incorpora restricciones operativas directamente en el algoritmo, asegurando límites seguros de operación.
Requerimientos computacionales	Bajo, eficiente para aplicaciones en tiempo real con respuestas rápidas.	Alto, debido a la resolución de problemas de optimización en cada ciclo, aunque esto está mejorando con tecnología avanzada.
Aplicaciones típicas en VE	Regulación de temperatura, control de velocidad del motor, gestión de sistemas de climatización.	Optimización de gestión energética de la batería, regeneración de energía durante frenado, distribución de energía entre componentes.
Adecuación del sistema	Mejor para sistemas lineales y predecibles.	Adecuado para sistemas multivariables y no lineales con comportamiento complejo.
Tendencias y perspectivas	Uso consolidado en aplicaciones sencillas y de rápida respuesta.	Creciente adopción gracias a avances computacionales y algoritmos de optimización, ampliando aplicaciones avanzadas.

2.4 Revisión Bibliográfica sobre Aplicaciones de PID vs. MPC

Para la revisión bibliográfica sobre las aplicaciones de PID y MPC se utilizó un trabajo investigativo realizado por Amal Azzi, Mohamed Tabaa, Badr Chegari y Hanna Hachimi publicado el 5 de marzo de 2024. Este documento fue publicado por el MDPI de Suiza con el título en inglés: ‘Balancing Sustainability and Comfort: A Holistic Study of Building Control

Strategies That Meet the Global Standards for Efficiency and Thermal Comfort’. En el documento, se presentan diversos estudios de caso que demuestran la aplicación exitosa de ambos tipos de control en sistemas de gestión de energía y regulación de temperatura en vehículos eléctricos.

El documento cita un par de casos de uso del control PID en vehículos eléctricos, destacando su facilidad de uso, así como su eficiencia en ciertos roles. Una de las aplicaciones más comunes del PID es el control de la velocidad de los motores.

Los motores de vehículos eléctricos requieren un control delicado en aceleraciones y velocidades de crucero. El PID cambia la potencia suministrada al motor en tiempo real comparando la diferencia entre la velocidad real y la velocidad objetivo, de modo que la conducción sea estable y eficiente.

Un estudio de caso ejemplar se presenta en el informe para la aplicación del control PID en la gestión de baterías en un vehículo eléctrico. En este ejemplo, el PID controla la temperatura de la batería para que esté en una temperatura ideal. A partir del modelo de simulación, se confirma que al proporcionar un controlador PID, se logra un control rápido sobre la variación de temperatura y así se previene el sobrecalentamiento y el enfriamiento excesivo, además de aumentar la eficiencia y seguridad del almacenamiento de energía.

Otra investigación informa sobre el uso del PID en el control de carga de baterías. Aquí el PID controla la corriente de carga para evitar los picos que podrían dañar la batería, lo que cargará eficientemente y extenderá la vida útil de la batería.

El artículo también señala que el MPC se emplea en aplicaciones más sofisticadas que demandan un control óptimo y adaptativo de múltiples variables. La gestión de energía es uno de los usos clave del MPC en vehículos eléctricos. El MPC minimiza la asignación de energía entre la batería y los motores eléctricos teniendo en cuenta la misión de conducción y las restricciones evolutivas del sistema. Esto también se extiende a la restauración de energía

durante el frenado, donde el MPC asegura una recuperación de energía y una eficiencia del sistema máximas.

Un estudio de caso ejemplar en el informe demuestra el MPC en la gestión de energía de un vehículo eléctrico. En este documento, el MPC tiene como objetivo minimizar el uso de la batería para el proceso de conducción según las rutas y las congestiones de tráfico. Los resultados muestran que el alcance del vehículo se mejora considerablemente y el consumo de energía se reduce significativamente, verificando la capacidad de optimización de la eficiencia de propulsión del MPC.

Se realiza un segundo estudio de simulación para investigar la aplicación del MPC para la asignación de energía en un sistema de propulsión híbrido. Aquí, el MPC controla el flujo de energía entre un motor de combustión interna y un motor eléctrico, logrando mejoras en el rendimiento de los sistemas y las emisiones. Esto no solo mejora la economía de combustible, sino que también ayuda a minimizar el impacto ambiental del vehículo.

Una rica variedad de estudios de caso discutidos en este documento refleja el uso e impacto de los algoritmos de control PID y MPC en vehículos eléctricos. El PID puede usarse para un control de velocidad simple y efectivo y para la gestión térmica, y las técnicas de MPC han avanzado en optimización y versatilidad en la gestión de energía y en el rendimiento en tiempo real. Ya sea que el PID o el MPC sea más adecuado para un sistema determinado y un propósito específico, su combinación exitosa puede mejorar significativamente la eficiencia y sostenibilidad de los vehículos eléctricos.

Capítulo III

Diseño de los Modelos de Simulación

3.1 Selección de Parámetros y Configuraciones para Simulación.

Para llevar a cabo una simulación efectiva de control de temperatura en una batería, es de suma importancia realizar una selección cuidadosa y meticulosa de los parámetros que conforman el sistema. Estos parámetros incluyen, en primer lugar, las especificaciones técnicas de la batería, que abarcan aspectos fundamentales como la capacidad nominal expresada en amperios-hora (Ah), la resistencia interna que puede provocar pérdidas de energía significativas, y el coeficiente de temperatura, que es un indicador crucial del cambio en la resistencia interna en respuesta a variaciones en la temperatura ambiente.

Además de las características de la batería, los parámetros del sistema de enfriamiento juegan un papel igualmente relevante en la simulación. Estos parámetros incluyen la capacidad calorífica del refrigerante, su conductividad térmica y la tasa de flujo del refrigerante, todos ellos esenciales para modelar de manera precisa la disipación de calor que se produce en la batería durante su funcionamiento. No se puede subestimar la influencia de los factores ambientales en este contexto; en particular, la temperatura de bulbo seco es un elemento que afecta de manera significativa la transferencia de calor a través de los mecanismos de convección y radiación, lo que puede alterar el rendimiento general del sistema.

En lo que respecta al diseño del controlador, es fundamental que el controlador proporcional-integral-derivativo (PID) esté debidamente ajustado. Esto se logra mediante la modificación de las ganancias K_p , K_i y K_d , que son los parámetros que regulan la respuesta del controlador ante los cambios térmicos. Un ajuste adecuado de estos parámetros es esencial para iniciar las acciones correctivas necesarias que mantengan la estabilidad del sistema y eviten fenómenos indeseables como el sobreimpulso, que podría comprometer la integridad de la batería. Por otro lado, el controlador de predicción de modelo (MPC) requiere una

especificación cuidadosa de un horizonte de predicción y control, lo que determina cómo se anticipan y optimizan las acciones de control en función de las proyecciones del comportamiento futuro del sistema. Es igualmente crucial establecer las restricciones operativas que aseguren que el sistema no exceda niveles que puedan resultar inseguros o ineficientes.

Finalmente, pero no menos importante, la configuración de la simulación en Simulink representa un aspecto crítico de la ingeniería que debe atender a la precisión y velocidad de la simulación. La elección del tamaño del paso para la simulación es un factor determinante que debe buscar un equilibrio adecuado entre la precisión temporal y la eficiencia computacional. Asimismo, la duración de la simulación debe ser lo suficientemente extensa como para permitir una evaluación completa de los desempeños tanto transitorios como en estado estacionario del sistema. Por último, es esencial asignar de manera cuidadosa y precisa los diversos valores de las variables que se emplearán y estudiarán a lo largo de la simulación, asegurando así que se obtengan resultados significativos y útiles para el análisis posterior.

3.2 Implementación de Algoritmos de Control PID y MPC en Simulink.

Para llevar a cabo la implementación del controlador PID en el entorno de Simulink, es fundamental seguir una serie de pasos metódicos que aseguren un funcionamiento óptimo del sistema. El primer paso en este proceso es la creación de un modelo del sistema que se desea controlar. Este modelo debe incluir no solo la representación de la batería, que es el componente principal del sistema, sino también su sistema de refrigeración, el cual es crucial para mantener la temperatura de la batería dentro de los límites seguros y eficientes.

Una vez que se ha creado el modelo, el siguiente paso es agregar el bloque denominado "PID Controller" desde la biblioteca de Simulink. Este bloque es esencial, ya que es el que permitirá implementar el algoritmo de control PID. Es importante conectar este bloque de manera adecuada a los sensores de temperatura que monitorean constantemente el estado

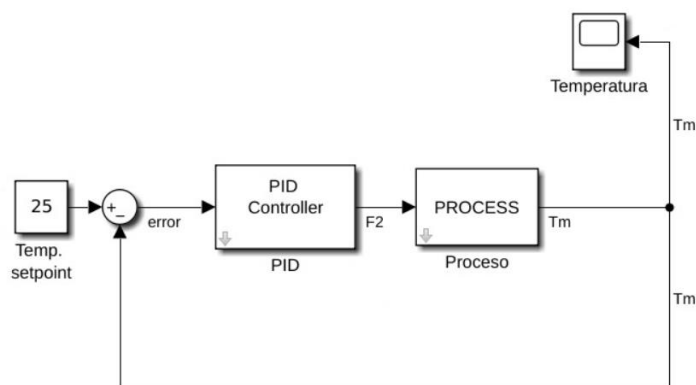
térmico de la batería, así como a los actuadores de refrigeración que se encargarán de ajustar la temperatura en función de las señales de control que reciba el controlador.

Este proceso de conexión implica que el controlador PID estará en constante comunicación con el sensor de temperatura, recibiendo la señal correspondiente que indica la temperatura actual de la batería. A partir de esta información, el controlador PID procesará los datos y enviará una señal de control al actuador de refrigeración. Esta señal es fundamental, ya que permitirá ajustar la temperatura de la batería según sea necesario, asegurando que se mantenga dentro de un rango óptimo para su funcionamiento.

Una vez que todas las conexiones están establecidas y el sistema está configurado, es crucial proceder a la configuración de los parámetros del controlador PID, que son K_p (ganancia proporcional), K_i (ganancia integral) y K_d (ganancia derivativa). Esta configuración se llevará a cabo utilizando la herramienta "PID Tuner", que es una herramienta muy útil en Simulink para la afinación automática de los parámetros del controlador. A través de esta herramienta, se busca obtener la mejor configuración de control posible, lo que permitirá optimizar el rendimiento del sistema y garantizar que la batería funcione de manera eficiente y segura, minimizando el riesgo de sobrecalentamiento y prolongando su vida útil.

Figura 5

Bloques de simulación de Simulink del controlador PID



Los bloques aplicados en Simulink se pueden encontrar en la Fig. 3. En primer lugar, es importante destacar que este es el bloque de estado estacionario, el cual tiene la función crucial de obtener el valor deseado de la temperatura de la batería. Este bloque actúa como un punto de referencia, asegurando que el sistema pueda operar dentro de los parámetros deseados. Luego, se encuentra el bloque del controlador PID, que ha sido diseñado específicamente para el simulador, aunque con una modificación menor que se adapta a las necesidades del sistema en cuestión. Este controlador es fundamental para mantener la temperatura de la batería en el rango óptimo, ajustando continuamente la salida en función de las variaciones en la temperatura medida.

Otro bloque importante en este sistema es el bloque de proceso de transformación. Este bloque tiene en cuenta la influencia de la refrigeración en la temperatura inicial de la batería, lo que es esencial para una simulación precisa. Esta relación se describe en la Ecuación correspondiente, que detalla cómo la refrigeración afecta la temperatura de la batería en función de diversos factores. Finalmente, para visualizar el rendimiento del sistema, se puede abrir el bloque Scope. Este bloque permite observar el gráfico que ilustra cómo se está llevando a cabo el control de temperatura a través del controlador PID, proporcionando una representación visual del comportamiento del sistema a lo largo del tiempo.

Para implementar el controlador PID en Simulink y controlar de manera efectiva la temperatura de la batería, es necesario comenzar con un modelo detallado de la dinámica térmica del sistema. Por ejemplo, se asumió una capacidad térmica de la batería (C_t) de 5000 J/°C, lo que indica la cantidad de energía necesaria para cambiar la temperatura de la batería en un grado Celsius. Además, se considera una resistencia térmica interna (RT_i) de 0.1 °C/W, que representa la dificultad que tiene el calor para fluir a través de la batería. También se establece una tasa de flujo de refrigerante variable, que oscila entre 0 y 1 L/min, y que es fundamental para la eliminación de calor del sistema. La temperatura ambiental, junto con su

efecto en la transferencia de calor, debe ser variada como un parámetro de entrada en el modelo. Para la simulación, se considera un rango de temperatura ambiental de 20 a 38°C, lo que permite evaluar diferentes escenarios y su impacto en el rendimiento del sistema.

En cuanto a los resultados de la simulación, para fines de análisis, el bloque "Controlador PID" se incluye en Simulink, siguiendo los requisitos establecidos en la Fig. 8. En esta configuración, se conectan el sensor de temperatura de la batería y el actuador del sistema de refrigeración a la entrada y salida del controlador PID, respectivamente. El elemento de control se establece con una referencia en 25 °C, que es la temperatura objetivo que debemos alcanzar o mantener de manera constante. El controlador PID utiliza la desviación entre esta referencia y la temperatura existente como una señal de error, que es fundamental para el funcionamiento del controlador.

Para comenzar la configuración del controlador, las ganancias PID pueden tener valores iniciales donde $K_p = 2$, $K_i = 0.5$ y $K_d = 0.1$. Estos valores de parámetros permiten una respuesta moderada y estable, evitando oscilaciones violentas que podrían comprometer el rendimiento del sistema. Sin embargo, para ajustar dichos parámetros de manera más precisa, puede ser útil confiar en el "PID Tuner" de Simulink. Esta herramienta ajusta automáticamente los parámetros del sistema, mejorando la eficiencia y estabilidad del control, y cambiando los valores de las ganancias según las características específicas del modelo.

En cuanto al paso de simulación, un buen valor podría ser 0.01 segundos, lo que proporciona un equilibrio adecuado entre precisión temporal y costo computacional. Para evaluar la efectividad del modelo, se puede comparar la solución aproximada entre dos solucionadores: 'ode45', que ha demostrado devolver los mejores resultados para el tipo de sistema mencionado, y otros solucionadores que podrían no ser tan efectivos.

Para poder ver y analizar cómo respondió el sistema a lo largo de la simulación, se agregó un bloque "Scope". Este bloque es esencial para observar cómo evolucionaron la

temperatura de la batería y la señal de control enviada por el PID a lo largo del tiempo. Esto permitirá determinar si la temperatura se estabiliza rápidamente alrededor de 25°C , si habrá oscilaciones o sobreimpulsos, y cómo se comporta la señal de control en términos de amplitud y suavidad.

Alternativamente, si se hacen evidentes problemas como oscilaciones o tiempos de asentamiento excesivamente largos, puede ser necesario realizar pequeños ajustes manuales a los valores de K_p , K_i y K_d . También se puede optar por ejecutar nuevamente la herramienta "PID Tuner" para reajustar estos valores y optimizar el rendimiento del sistema.

Además, para preservar la integridad del sistema físico y evitar daños, se puede agregar un bloque de saturación. Este bloque es fundamental para restringir la señal de control, por ejemplo, limitando el flujo de refrigerante en un rango entre 0% y 100% del flujo máximo permitido. Esto asegura que el controlador no genere señales que excedan la capacidad del sistema de refrigeración, protegiendo así tanto el sistema como la batería de posibles fallos o daños.

En cuanto a la implementación del controlador MPC (Control Predictivo Basado en Modelos), el proceso se inicia de la misma manera que en otros enfoques de control, comenzando con el modelado de la batería y el sistema de refrigeración en la plataforma de simulación Simulink. Este paso es fundamental, ya que proporciona una representación precisa del sistema que se desea controlar. Sin embargo, es importante destacar que el controlador MPC requiere una definición adecuada y detallada de un modelo dinámico que contenga todas las características relevantes del sistema a controlar. Este modelo predictivo se desarrolla utilizando el Toolbox de Control Predictivo de Modelos de MATLAB, que ofrece herramientas avanzadas para la creación y ajuste de modelos dinámicos.

Una vez que se ha especificado el modelo de la planta, el siguiente paso en el proceso es integrar el modelo en Simulink, donde se incluye el bloque "Controlador MPC". Este bloque

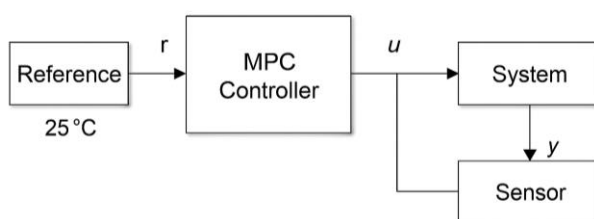
es esencial, ya que actúa como el núcleo del sistema de control, y está conectado a un sensor que se encarga de recibir la señal de temperatura del sistema. Además, el controlador MPC también se conecta al actuador de refrigeración, que es el componente responsable de realizar los ajustes necesarios para mantener la temperatura dentro de los límites deseados.

Posteriormente, se procede a la configuración de parámetros críticos, como el horizonte de predicción y el horizonte de control. Estos horizontes son fundamentales para el funcionamiento del controlador, ya que determinan el período de tiempo durante el cual el controlador anticipa y planifica las acciones necesarias para alcanzar los objetivos establecidos. Además, se definen las restricciones del sistema, que son condiciones que deben cumplirse para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente del sistema de refrigeración. También se establecen los objetivos de regulación y rendimiento, que guiarán al controlador en su tarea de mantener la temperatura en un valor preestablecido.

Gracias a esta cuidadosa configuración, el controlador MPC es capaz de mantener la temperatura de la batería en un nivel óptimo, controlándola de manera efectiva mediante el sistema de refrigeración. Esto no solo asegura un rendimiento eficiente de la batería, sino que también contribuye a prolongar su vida útil y a mejorar la seguridad del sistema en su conjunto.

Figura 6

Bloques de simulación de Simulink del controlador MPC



Para establecer un controlador de Predicción de Modelo (MPC, por sus siglas en inglés) en el entorno de programación MATLAB, es fundamental contar con un modelo dinámico del sistema que se desea controlar. Este sistema puede ser descrito de diversas maneras,

dependiendo de la naturaleza del mismo y de los datos disponibles. En el caso de sistemas que operan en tiempo continuo, se puede optar por representarlos mediante un modelo en espacio de estados, que proporciona una descripción matemática completa de las dinámicas del sistema. Alternativamente, se puede utilizar una función de transferencia, que es particularmente útil para sistemas lineales y permite analizar la respuesta del sistema a diferentes entradas. También existe la opción de emplear un modelo aproximado que se obtiene a través de métodos experimentales, lo cual es común en situaciones donde el modelo teórico es difícil de obtener o no se ajusta adecuadamente a la realidad del sistema.

Una vez que se ha definido el modelo, este se utiliza para predecir el comportamiento futuro del sistema, lo que permite tomar decisiones informadas sobre la mejor acción de control a implementar. Por ejemplo, en el contexto de un vehículo eléctrico, esto podría implicar el modelado de las características térmicas del sistema de baterías, que son cruciales para garantizar un rendimiento óptimo y una larga vida útil de la batería. Asimismo, el controlador podría ser responsable de regular el funcionamiento del motor eléctrico, asegurando que se mantenga dentro de los parámetros deseados para maximizar la eficiencia energética y el rendimiento del vehículo.

La primera parametrización importante en el diseño de un controlador MPC implica la especificación del tiempo de muestreo. Este parámetro representa el intervalo de tiempo en el cual el controlador recalculará su decisión de control. Es esencial que este valor sea lo suficientemente pequeño para capturar adecuadamente la dinámica del sistema; por ejemplo, en un sistema de alta respuesta, un tiempo de muestreo de 0.1 segundos podría ser adecuado. A continuación, se definen dos horizontes temporales críticos: el horizonte de predicción, que indica cuántos pasos de tiempo en las variables futuras deben preverse (por ejemplo, 10 pasos), y el horizonte de control, que regula el número de decisiones de control que se optimizan en cada ciclo (por ejemplo, 3 pasos). La correcta elección de estos valores es fundamental, ya que

influye directamente en la capacidad del modelo del controlador para anticipar y adaptarse a cambios futuros en el comportamiento del sistema.

Una segunda consideración importante en el diseño del controlador MPC es la especificación de restricciones. Estos parámetros abarcan un rango de señales de entrada permitidas, como voltaje o corriente, así como tasas de cambio aceptables que eviten transiciones bruscas que podrían dañar el sistema. Además, es crucial establecer el valor deseado o permitido para la salida del sistema, que podría incluir variables como la temperatura, la velocidad o la carga de la batería. Por ejemplo, si el objetivo es controlar la temperatura de la batería, se podría establecer un rango de operación seguro entre 20°C y 38°C, garantizando así que el sistema funcione de manera eficiente y segura.

Una vez que se han definido las restricciones, se procede a ajustar los pesos de optimización del controlador. Estos pesos son parámetros escalares que permiten al controlador equilibrar varios objetivos simultáneamente: seguir la referencia de manera precisa, mantener la señal de control lo más pequeña posible y evitar cambios bruscos en las señales de control. La correcta selección de estos pesos es lo que determina si el sistema responde de manera rápida y suave a las perturbaciones, o si, por el contrario, se comporta de manera lenta y conservadora, lo que podría no ser deseable en todos los contextos.

Con ambos controladores configurados y parametrizados adecuadamente, estamos listos para simular nuestro diseño en Simulink, una herramienta poderosa que permite modelar y simular sistemas dinámicos. Esta simulación proporciona una forma efectiva de observar cómo cada controlador gestiona la temperatura de la batería en diversas situaciones y condiciones operativas. Tras ejecutar el modelo en Simulink, es posible visualizar la salida del sistema utilizando un bloque de osciloscopio, como el bloque "Scope", lo que facilita la comparación del rendimiento de tu controlador PID frente al controlador MPC. Esta comparación es crucial, ya que involucra la evaluación de varios aspectos, como la estabilidad

del sistema, el tiempo de respuesta ante cambios en las condiciones y el uso eficiente de los recursos del sistema de enfriamiento.

Finalmente, la evaluación de estos factores proporciona pautas valiosas para elegir el controlador más adecuado según los requisitos específicos del sistema en cuestión. La selección del controlador correcto no solo optimiza el rendimiento del sistema, sino que también contribuye a la seguridad y eficiencia operativa a largo plazo.

3.3 *Definición de escenarios de Simulación y Variables de Control.*

Se plantean dos casos de simulación que se centran en ciclos de conducción en carretera, específicamente bajo condiciones ambientales de verano, con el objetivo de comparar la efectividad del sistema de gestión térmica de la batería propuesta. Este sistema es controlado mediante dos algoritmos diferentes: el algoritmo PID (Proporcional-Integral-Derivativo) y el MPC (Control Predictivo Basado en Modelo). La comparación se realiza para determinar si estos métodos son efectivos en la regulación de la temperatura de la batería en situaciones de alta demanda térmica.

En el primer caso, se simula el funcionamiento del vehículo eléctrico a una temperatura ambiente de 33°C. Esta temperatura se considera extrema y representa un desafío significativo para la eficiencia del sistema de refrigeración, ya que debe trabajar arduamente para mantener la temperatura de la batería dentro de un rango seguro y óptimo. El controlador, en este escenario, tiene la responsabilidad de asegurar que la temperatura de la batería se mantenga alrededor de 25°C. Este rango es crucial, ya que permite no solo el mejor rendimiento del sistema de almacenamiento de energía (ESS), sino que también contribuye a prolongar su vida útil, evitando el deterioro que puede resultar de temperaturas excesivas.

El segundo escenario se presenta con condiciones más moderadas, comenzando a 20°C y luego bajando a 19°C de temperatura ambiente. Estas temperaturas son consideradas más cercanas a las condiciones invernales que se pueden experimentar en Guayaquil. Aunque las

condiciones térmicas en este caso son menos extremas que en el primer escenario, mantener la batería a 25°C sigue siendo un desafío. Esto se debe a las fluctuaciones térmicas que se producen durante el ciclo de conducción, que pueden afectar la estabilidad térmica de la batería. Este segundo caso permite evaluar los algoritmos de control en un entorno operativo más habitual, pero que sigue siendo de gran importancia. La comparación de su eficiencia y efectividad en esta situación menos desafiante es igualmente crucial para garantizar la estabilidad y el rendimiento del sistema en condiciones que son más representativas de la realidad diaria.

Es importante destacar que la temperatura de la batería es la única variable de control en todos los escenarios planteados. Esta variable de estado es el objetivo principal tanto de las leyes de control PID como del MPC, que intentan regularla a un valor de 25°C. Este objetivo es fundamental para alcanzar un funcionamiento eficiente del sistema y para extender la vida útil de la batería. Los controladores logran este objetivo modulando el flujo de refrigerante, activando el sistema de refrigeración en respuesta al aumento de temperatura. Una vez que se alcanza la temperatura deseada, el sistema continúa operando durante el tiempo necesario para mantener esa temperatura estable.

Finalmente, los parámetros y la guía de configuración utilizados en estas simulaciones permiten realizar una comparación adecuada del rendimiento de los diferentes métodos de control en el mantenimiento de la temperatura deseada de la batería. A través de este análisis, se busca resolver de manera efectiva los desafíos que presenta la gestión térmica en el funcionamiento de vehículos eléctricos, asegurando así un rendimiento óptimo y una mayor durabilidad del sistema de almacenamiento de energía.

Tabla 2*Escenarios de simulación*

Esce- nario	Temperatura Ambiente	Objetivo del Controlador	Variable Con- trolada	Desafíos Principales
1	33 °C (Verano)	Mantener bate- ría a 25 °C	Temperatura de la batería	Condición extrema, alto estrés térmico en el sistema
2	20 °C (Invierno)	Mantener bate- ría a 25 °C	Temperatura de la batería	Moderado, pero con variacio- nes térmicas por conducción

3.4 Metodología para el Análisis y la Comparación de Datos

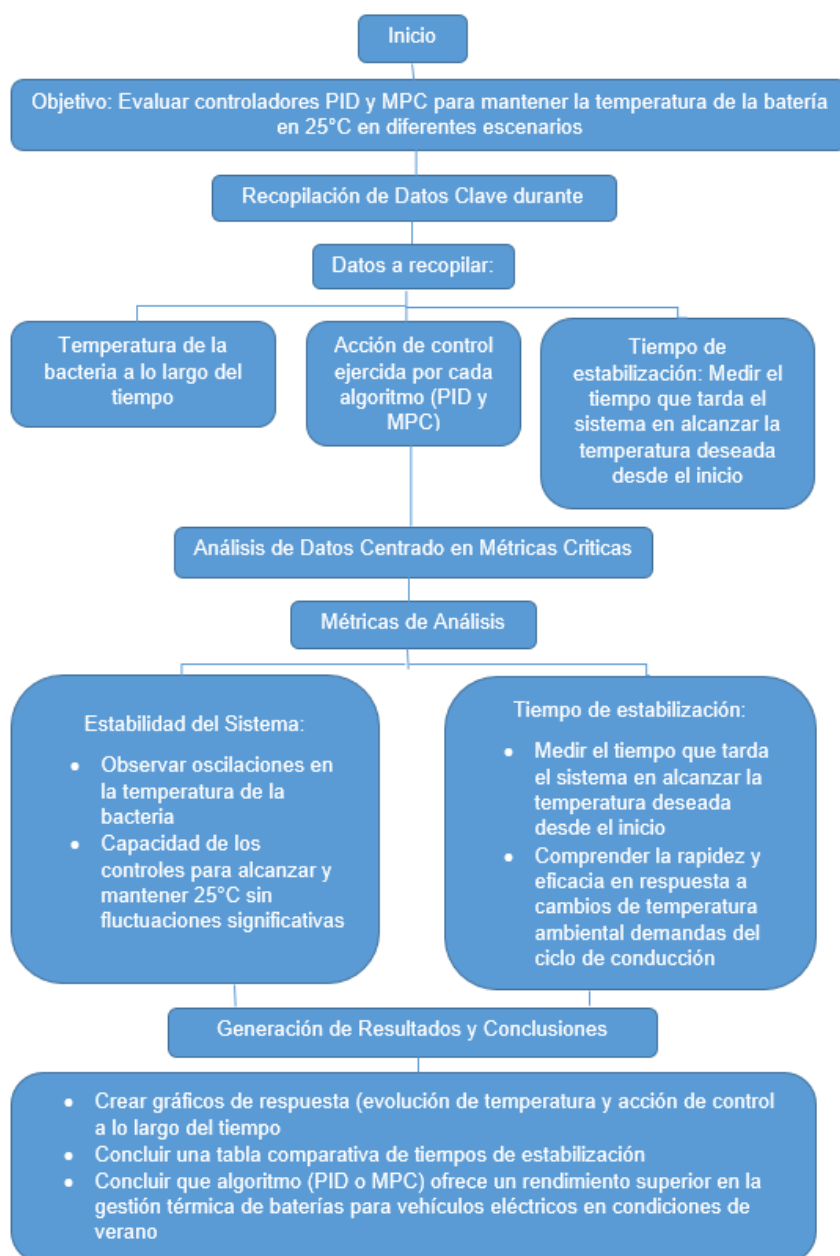
En esta simulación, el método elegido para llevar a cabo el análisis y la comparación de datos se basa en un estudio exhaustivo de cómo los controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) y MPC (Control Predictivo Basado en Modelo) gestionan y regulan la temperatura de la batería en relación con un valor de referencia de 25°C, teniendo en cuenta las condiciones de temperatura ambiente que pueden variar significativamente. Este enfoque es fundamental, ya que la temperatura de la batería es un factor crítico que influye en su rendimiento, durabilidad y seguridad.

La primera fase de esta metodología comprende una cuidadosa y meticulosa recopilación de datos clave que son esenciales para la simulación. Entre estos datos se incluye la evolución de la temperatura de la batería a lo largo del tiempo, la acción de control que se ejecuta por cada uno de los algoritmos en respuesta a las variaciones de temperatura, así como el tiempo que cada uno de los algoritmos tarda en alcanzar la temperatura de estabilización objetivo. Esta información es de suma importancia, ya que permite comprender de manera profunda el comportamiento de los controladores en diferentes puntos de operación y bajo diversas condiciones ambientales.

A partir de estos datos recopilados, se llevarán a cabo una serie de mediciones significativas que proporcionarán información valiosa sobre el rendimiento de los

controladores. En primer lugar, se evaluará la estabilidad del sistema, lo que implica verificar la existencia de oscilaciones en la temperatura de la batería. Esto es crucial, ya que un sistema estable debe ser capaz de llevar la temperatura hacia la referencia de 25°C y mantenerla en ese nivel sin experimentar oscilaciones severas que puedan comprometer su funcionamiento. En segundo lugar, se calculará el tiempo de estabilización, que se define como el período de tiempo necesario hasta que el sistema no muestre variaciones significativas en la temperatura desde el inicio de la simulación. Este parámetro es fundamental, ya que refleja la rapidez y eficacia de cada controlador en respuesta a diferentes temperaturas ambientales y demandas de carga, como las que se presentan durante los ciclos de conducción.

Por último, es importante destacar que el controlador actual también será considerado en el análisis. Esta inclusión es esencial, ya que permitirá revelar no solo cuál es el mejor controlador en términos de mantener la temperatura de la batería dentro de los límites deseados, sino también cuál de ellos lo hace de una manera más eficiente desde el punto de vista energético. Además, se evaluará la facilidad de incorporación de cada controlador dentro del sistema existente, lo que es un aspecto clave para su implementación práctica. Para ilustrar los resultados de este estudio, se generarán curvas de respuesta que mostrarán tanto el desarrollo de la temperatura de la batería como la acción de control en función del tiempo. Asimismo, se elaborará una tabla comparativa que resumirá los tiempos de estabilización de cada controlador. Este estudio extenso y detallado permitirá determinar de manera concluyente cuál de las dos leyes de control, PID o MPC, proporciona los mejores resultados en términos de calidad en el control térmico de baterías para un vehículo eléctrico, especialmente en condiciones desafiantes como las que se pueden encontrar en una autopista durante el verano.

Figura 7*Diagrama de flujo de la metodología*

Capítulo IV

Resultados y Análisis de Datos

4.1 Análisis de la Eficiencia de las Baterías Bajo Diferentes Algoritmos de Control.

El sistema de control PID, que significa Proporcional, Integral y Derivativo, se desarrolló por primera vez en el entorno de Simulink, una herramienta de modelado y simulación ampliamente utilizada en ingeniería y diseño de sistemas dinámicos.

En este contexto, se tomó como referencia un ciclo de conducción típico en carretera, el cual se caracteriza por una serie de condiciones que incluyen una pequeña cantidad de carga y descarga a la batería del vehículo. Este ciclo es fundamental para evaluar el rendimiento del sistema de control, ya que simula situaciones reales que un automóvil podría enfrentar durante su funcionamiento diario.

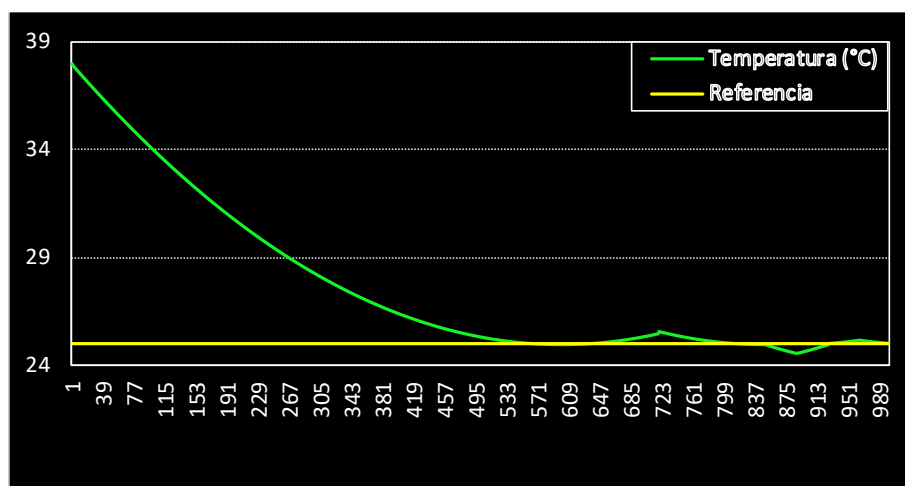
Se realizó el diseño del controlador de manera que pudiera mantener una respuesta eficiente y estable ante los cambios dinámicos del sistema. Para esto, se evaluaron los parámetros como el tiempo de respuesta, impulso y estado estacionario, con el fin de validar el comportamiento del controlador en las diferentes condiciones de operación.

Para el primer escenario analizado, se establecieron condiciones específicas en las que la temperatura ambiente, así como la temperatura inicial de la batería, se fijaron en 38°C. Esta temperatura es relevante, ya que puede influir significativamente en la eficiencia y el rendimiento de la batería.

Con la implementación del controlador PID en este escenario particular, se llevaron a cabo diversas pruebas y simulaciones para observar cómo respondía el sistema ante las variaciones de carga y temperatura. Los resultados obtenidos de estas simulaciones son los siguientes:

Gráfico 1

Temperatura de batería con controlador PID a temperatura ambiente de 38°C



A partir de la información del Gráfico 1, se puede concluir que el controlador PID tiene la capacidad de reducir de manera efectiva la temperatura de la batería, llevándola de un nivel inicial de 38 °C a un valor más óptimo de 25 °C, que es precisamente la temperatura de referencia establecida para su funcionamiento adecuado. Este proceso de regulación es crucial, ya que una temperatura controlada es fundamental para el rendimiento y la longevidad de la batería.

Sin embargo, es importante destacar que, durante los primeros minutos de funcionamiento, cuando la temperatura de la batería se encontraba por encima de los 25 °C, se puede observar un rendimiento notable del controlador PID. En este contexto, se registró que el controlador necesitó casi 600 segundos para lograr que la temperatura de la batería descendiera hasta alcanzar la temperatura de referencia deseada. Este tiempo de respuesta es significativo, ya que refleja la capacidad del controlador para adaptarse a condiciones iniciales desfavorables y trabajar hacia la estabilización de la temperatura.

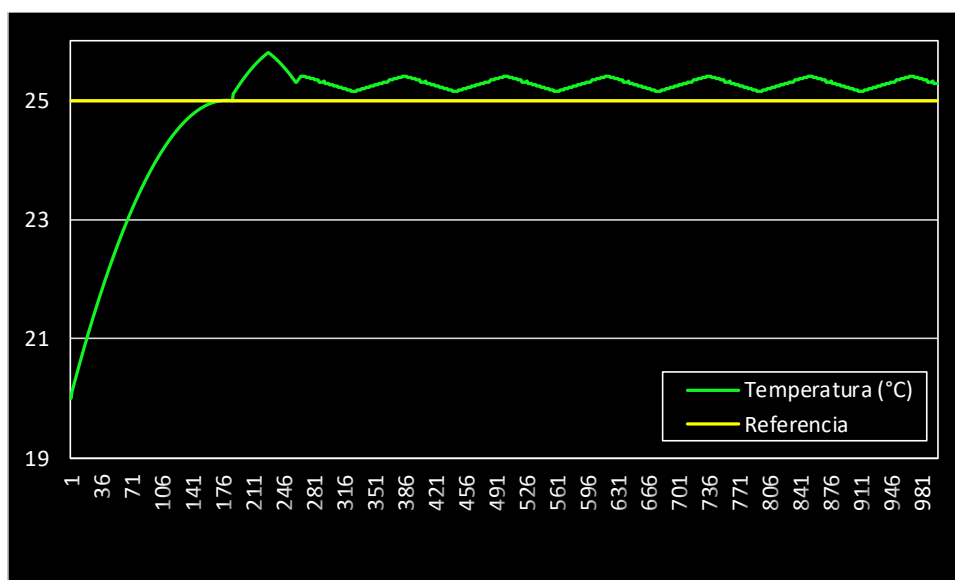
Por otro lado, también se ha observado un comportamiento interesante una vez que la temperatura alcanza el valor de referencia. En este punto, se presentan algunos picos en la gráfica que indican momentos en los que la temperatura experimenta aumentos y

disminuciones. Sin embargo, es relevante señalar que estas fluctuaciones no se desvían de manera considerable del valor deseado, lo que sugiere que, a pesar de las variaciones momentáneas, el controlador PID mantiene un control efectivo sobre la temperatura de la batería, asegurando que se mantenga dentro de un rango aceptable y seguro para su operación. Este comportamiento resalta la eficacia del controlador en la gestión térmica de la batería, lo que es esencial para su rendimiento óptimo y su durabilidad a largo plazo.

Una vez se realizó la simulación en el primer escenario, se procedió a realizar la simulación en el segundo escenario. En esta ocasión, la temperatura ambiental y de la batería tienen como valor inicial 20°C y así mismo se quiere lograr mantener la batería en una temperatura de 25°C en un ciclo de conducción de carretera. A continuación, se muestra la gráfica que se obtuvo en el segundo escenario.

Gráfico 2

Temperatura de batería con controlador PID a temperatura ambiente 20°C



En el Gráfico 2 se presenta de manera clara y detallada cómo el controlador PID ha logrado llevar la temperatura del sistema a alcanzar el punto de ajuste establecido de manera notablemente rápida, en un tiempo total de 180 segundos. Este rendimiento es un indicativo de la eficacia del controlador en la regulación de la temperatura. Sin embargo, es importante

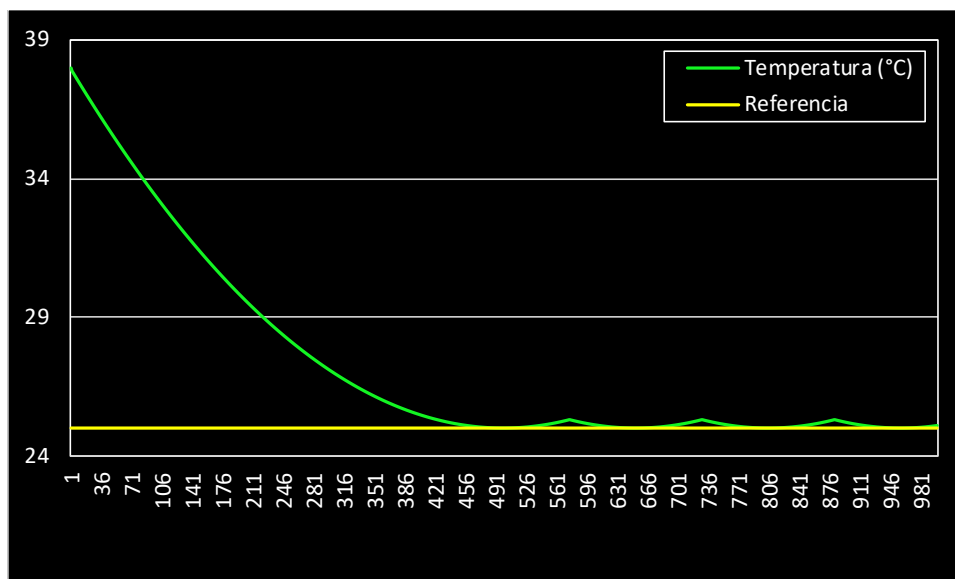
señalar que, a pesar de su capacidad para alcanzar rápidamente el punto de ajuste, el controlador no es capaz de mantener la temperatura exactamente en la referencia de 25°C que se ha establecido como objetivo. Esta dificultad se debe a que la temperatura de la batería tiende a aumentar debido al uso y la carga que se le aplica, lo que provoca que la temperatura supere el nivel deseado. A pesar de esta limitación, es relevante destacar que el controlador PID aún puede mantener la temperatura relativamente cerca de la referencia, aunque se observe que se sitúa un poco más alta de lo que se había planeado inicialmente. Esto sugiere que, aunque el sistema presenta ciertas variaciones, el controlador sigue desempeñando un papel crucial en la regulación de la temperatura, logrando un equilibrio aceptable en las condiciones de operación.

Después de llevar a cabo la simulación de los dos casos utilizando el controlador PID, se procedió a realizar la simulación con el controlador MPC, que es conocido por su capacidad para manejar sistemas dinámicos complejos. En primer lugar, se simuló la primera condición, en la cual se estableció una temperatura ambiente de 38°C . En este escenario, el controlador demostró su eficacia al mantener la temperatura del sistema en un nivel constante de 25°C , a pesar de las variaciones externas. Este proceso se llevó a cabo bajo un ciclo de conducción de carretera, lo que añade un nivel adicional de complejidad a la simulación, dado que las condiciones de operación pueden cambiar rápidamente.

A continuación, se presenta el gráfico con los datos obtenidos de la simulación. Este gráfico no solo muestra la respuesta del sistema a lo largo del tiempo, sino que también permite visualizar cómo el controlador MPC se adapta a las condiciones cambiantes, asegurando que la temperatura se mantenga dentro de los límites deseados. La información contenida en esta figura es crucial para entender el rendimiento del controlador en situaciones reales y para evaluar su efectividad en comparación con el controlador PID previamente utilizado.

Gráfico 3

Temperatura de batería con controlador MPC a temperatura ambiente 38°C



A partir del Gráfico 3, se puede concluir de manera clara y contundente que el controlador MPC (Controlador Predictivo Basado en Modelo) es el encargado de enfriar la temperatura de la batería, comenzando desde unos 38°C iniciales y logrando estabilizarse en la temperatura establecida de 25°C. Este proceso de enfriamiento es notable, ya que el controlador MPC requiere un tiempo promedio de aproximadamente 500 segundos en ambas situaciones analizadas para alcanzar la temperatura acordada. Este rendimiento ha demostrado ser una ventaja significativa en comparación con el controlador PID (Controlador Proporcional-Integral-Derivativo), que tiende a ser menos eficiente en este aspecto.

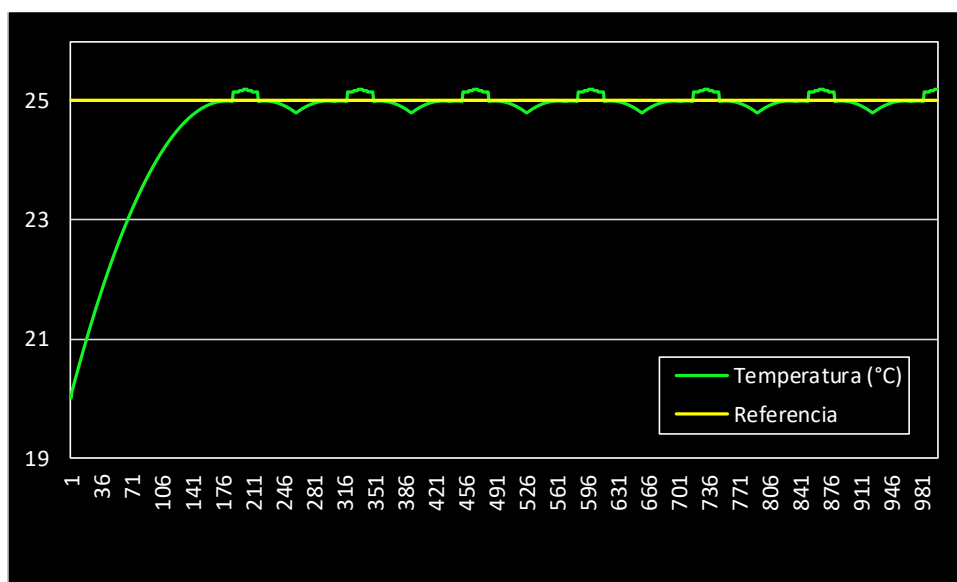
Es importante destacar que los efectos de este tipo de control, que se manifiestan en dos vías, deben ser aprendidos y comprendidos de manera adecuada para maximizar su efectividad. Además, resulta interesante observar en la figura que, al llegar a la referencia de temperatura deseada, la temperatura de la batería experimenta pequeños picos. Sin embargo, a pesar de estas fluctuaciones, se mantiene consistentemente cerca del valor objetivo establecido. Es relevante señalar que estos picos son considerablemente menos pronunciados en comparación con los que se observan en el controlador PID, lo que sugiere una mayor estabilidad y precisión.

en el control de la temperatura por parte del controlador MPC. Este comportamiento resalta la eficacia del controlador MPC en la gestión térmica de la batería, lo que puede tener implicaciones significativas en su rendimiento y durabilidad a largo plazo.

Tras haber realizado la simulación del primer escenario, se procedió a realizar la simulación en el segundo escenario. En esta ocasión, la temperatura ambiental y de la batería tienen como valor inicial 20°C y así mismo se quiere lograr mantener la batería en una temperatura de 25°C en un ciclo de conducción de carretera. A continuación, se muestra la gráfica que se obtuvo en el segundo escenario con el controlador MPC.

Gráfico 4

Temperatura de batería con controlador MPC a temperatura ambiente 20°C



En el Gráfico 4 se puede apreciar de manera clara y detallada cómo el controlador MPC logra que la temperatura del sistema alcance la referencia deseada en un tiempo notablemente más corto, específicamente en un intervalo de 180 segundos. Este rendimiento es comparable al del controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo), que también es conocido por su eficacia en el control de sistemas térmicos.

Por otro lado, como se puede observar en el mismo gráfico, el controlador MPC no solo se destaca por su rapidez en alcanzar la temperatura de referencia, sino que también demuestra

una capacidad superior para mantener la temperatura en o muy cerca de la referencia establecida de 25°C. Esto es especialmente relevante, ya que el controlador MPC es capaz de minimizar las variaciones y fluctuaciones en la temperatura, incluso en situaciones donde la temperatura de la batería tiende a aumentar debido al uso continuo del sistema. Esta característica es fundamental, ya que asegura un funcionamiento más estable y eficiente, evitando que la temperatura se desvíe significativamente de los valores óptimos.

Otra ventaja significativa que se deriva del uso del controlador MPC es que, a partir de ahora, es posible obtener la temperatura de referencia de manera más rápida y eficiente. Esto no solo mejora la respuesta del sistema ante cambios en las condiciones operativas, sino que también permite una mejor planificación y gestión del rendimiento térmico, lo que resulta en un funcionamiento más confiable y efectivo del sistema en su conjunto.

4.2 Comparación de los Rendimientos de PID y MPC

Bajo el primer escenario simulado, en el que la temperatura ambiente era notablemente alta, alcanzando los 38°C, podemos analizar los resultados obtenidos y afirmar que el controlador predictivo de modelo (MPC, por sus siglas en inglés) demostró un rendimiento sobresaliente en términos de tiempo requerido para alcanzar la temperatura deseada de 25°C. En este contexto, se registró que el MPC tardó 500 segundos en estabilizar la temperatura de la batería, mientras que el controlador PID, que es un método más tradicional, requirió un tiempo mayor, específicamente 600 segundos, para lograr el mismo objetivo. Esta diferencia de 100 segundos no es trivial; en realidad, subraya la capacidad del MPC para anticipar el comportamiento del sistema y actuar con estrategias de control más proactivas. Esto se traduce en una limitación efectiva de los tiempos de respuesta, lo que resulta en una gestión más eficiente en un entorno de temperatura severa, donde las condiciones pueden ser desafiantes y donde cada segunda cuenta.

En el segundo escenario, donde la temperatura ambiente se encontraba en un nivel más moderado de 20°C, ambos controladores, tanto el MPC como el PID, lograron estabilizar la temperatura de la batería después de un tiempo de 180 segundos. Sin embargo, se observó una diferencia significativa en el comportamiento de ambos controladores durante este proceso. El controlador PID mostró más fluctuaciones en la temperatura, lo que indica una menor capacidad para mantener la estabilidad en comparación con el controlador MPC. Este último, por su parte, logró mantener la temperatura con casi ninguna fluctuación, lo que es un indicador de su eficacia. La implicación de estos resultados es clara: el MPC no solo se desempeña mejor en escenarios de condiciones adversas, sino que también demuestra ser más preciso y consistente en su funcionamiento, incluso en situaciones donde el entorno es menos desafiante. La menor fluctuación de voltaje que se observó con el MPC es un aspecto crucial, ya que es fundamental para mantener la estabilidad y prolongar la vida útil de la batería, un factor que no debe subestimarse en aplicaciones críticas.

Sin embargo, es importante señalar que el controlador MPC, a pesar de su superioridad en velocidad y precisión, presenta un mayor consumo de energía. Esta característica se debe a que el MPC fue diseñado y programado para actuar de manera más agresiva en su búsqueda de equilibrar rápidamente la temperatura, lo que, aunque efectivo, implica un mayor requerimiento energético. Este aumento en el consumo de energía es un aspecto que debe ser cuidadosamente considerado, especialmente en aplicaciones donde la eficiencia energética es de suma importancia. En contraste, el controlador PID, aunque más lento en su respuesta, se benefició de una reducción en el consumo de energía en comparación con el MPC. Esta característica puede ser vista como una ventaja en situaciones donde el ahorro energético es una preocupación mayor que la rapidez en la respuesta del sistema.

En términos de implementación, el controlador PID es conocido por su simplicidad tanto en programación como en su puesta en marcha. Su diseño sencillo significa que es

fácilmente comprensible y modificable, lo que lo convierte en una opción atractiva en contextos donde la facilidad de operación es una prioridad. Sin embargo, esta simplicidad también implica limitaciones, ya que restringe su aplicación a sistemas más complejos, como la gestión térmica de baterías, donde es necesario considerar una amplia gama de variables y restricciones simultáneamente.

Por otro lado, el controlador MPC se destaca por su capacidad para satisfacer mejor las restricciones y ofrecer una mayor flexibilidad en el modelado del sistema. Esto le permite un rendimiento significativamente superior en el caso de sistemas complejos, como las baterías de vehículos eléctricos, donde las condiciones de operación pueden variar drásticamente. No obstante, esta funcionalidad mejorada conlleva una complejidad considerable en la programación y el ajuste del controlador, lo que puede resultar en un desarrollo más costoso y que requiere más tiempo. A pesar de estas limitaciones, el MPC sigue siendo una opción altamente favorable para aplicaciones donde la precisión, la robustez y la eficiencia energética son factores críticos que considerar.

Conclusiones

En conclusión, en este estudio encontramos que a partir de la comparación del PID con el controlador MPC se muestra que, ambos logran alcanzar la temperatura objetivo de 25°C; sin embargo, el MPC demuestra una precisión y repetitividad superiores. Los resultados muestran que, cuando el vehículo eléctrico se opera en temperaturas ambientales dinámicas, el MPC es capaz de mantener la temperatura de la batería más cercana al valor deseado con menores variaciones. Esta característica posiciona al MPC como una alternativa idónea para asegurar la estabilidad térmica y prolongar la vida útil del sistema de baterías en vehículos eléctricos.

En cuanto al tiempo de estabilización los resultados demostraron que el control MPC tiene una mayor ventaja frente a las fuertes demandas térmicas, ya que este controlador es más rápido en alcanzar la temperatura establecida que el PID. Sin embargo, este aumento de velocidad implica un mayor consumo de energía. El controlador PID, aunque ligeramente más lento para calentarse, es más eficiente energéticamente y puede ser beneficioso para los casos en donde el gasto de energía es una preocupación.

Esto muestra una mayor adaptabilidad y eficiencia del controlador MPC en aplicaciones prácticas, ya que en casos reales a menudo se encuentran sistemas complejos y diferentes condiciones de operación. Este tipo de controlador destaca en condiciones operativas complejas donde es necesario gestionar restricciones y optimizar el rendimiento de los vehículos eléctricos. Por otro lado, el controlador PID, dada su simplicidad y bajo costo, resulta una alternativa viable en aplicaciones donde la velocidad y la precisión absoluta no son prioritarias, siendo más relevantes la eficiencia energética y la facilidad de implementación.

Recomendaciones

Se sugieren investigaciones adicionales utilizando un ciclo de conducción urbana para estudiar el rendimiento de regulación de temperatura de la batería de los controladores PID y MPC en condiciones de conducción más dinámicas y diversas.

Un ciclo urbano tiene un perfil intermitente de encendido/apagado y esta complejidad debería darnos una comprensión de cómo los modelos se adaptan y mantienen la temperatura de la batería bajo cambios rápidos. Si bien las simulaciones pueden ofrecer una visión inicial del comportamiento de los controladores, los resultados deben complementarse con pruebas experimentales. Es por esto que, se recomienda realizar pruebas en un entorno de laboratorio y comparar los datos de la simulación con el comportamiento real del sistema.

Esta prueba permitirá validar la calidad de los modelos empleados en la simulación y ajustar los controladores para que funcionen mejor en condiciones operativas reales. Además, es importante considerar que el sistema de enfriamiento, tiene un impacto en los controladores, ya que dependen de este. Por tal razón, se deben estudiar y probar diversas tecnologías de enfriamiento, que sean compatibles con los controladores PID y MPC.

Sistemas como el enfriamiento líquido, intercambiadores de calor avanzados, o incluso nuevas tecnologías, como los sistemas de enfriamiento basados en materiales de cambio de fase, que aún deben madurar, pueden impactar significativamente las capacidades de los controladores para mantener la temperatura de la batería dentro de los límites deseados y, por lo tanto, maximizar el rendimiento general del sistema térmico.

Bibliografía

- Chong, Y. (2018). *Análisis de la batería de alta tensión del Toyota Prius 4G*. Facultad de Mecánica Automotriz. UIDE. Guayaquil.
- Green, M., & Newman, D. (2021). *Sustainable Practices in Electric Vehicle Production and Lifecycle Management*. Environmental Science & Technology.
- He, H., Liu, X., & Zhao, J. (2019). *A review on key issues and challenges in devising a remaining driving range prediction for electric vehicles*. Energy, 172, 135-145.
- Jeréz Mayorga, D. A., & Puente Moromenacho, E. G. (2018). *Análisis del proceso de recuperación de la batería de alta tensión del vehículo Hyundai Sonata Híbrido*. INNOVA Research Journal, 3(10.1), 150–162.
<https://doi.org/10.33890/innova.v3.n10.1.2018.905>
- Jones, B. (2011). *Control of temperature*. In *Handbook of Systems and Control Engineering* (pp. 767-794). Elsevier.
- Jossen, A. (2006). *Fundamentals of battery dynamics*. Journal of Power Sources, 154(2), 530-538.
- Law, A. M. (2007). *Simulation modeling and analysis*. McGraw-Hill.
- MathWorks. (2020). *Introduction to MATLAB and Simulink*. The MathWorks Inc.
- Muenzel, V., Mareels, I., Brazil, M., de Hoog, J., Vishwanath, A., Kallapur, A., ... & Hitihami-Mudiy, G. (2015). *Battery cycle life prediction for automotive applications*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 20(1), 84-93.
- Plett, G. L. (2004). *Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 1. Background*. Journal of Power Sources, 134(2), 252-261.
- Plett, G. L. (2004). *Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 2. Modeling and identification*. Journal of Power Sources, 134(2), 262-276.

- Saidur, R., Mekhilef, S., & Ali, M. B. (2009). *A review on worldwide energy savings in building sector*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(6-7), 1584-1592.
- Shi, P., Li, L., Ni, X., & Yang, A. (2022) *Intelligent Vehicle Path Tracking Control Based on Improved MPC and Hybrid PID*. IEEE Access
- Smith, K., Wang, C. Y., Dahn, J. R., & Srinivasan, V. (2011). *Internal resistance of lithium-ion cells*. Journal of The Electrochemical Society, 158(5), A496-A502.
- Tarascon, J. M., & Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. Nature, 414(6861), 359-367.
- Turner, J., & Lee, H. (2020). *Comparative Analysis of Control Strategies in Electric Vehicle Systems*. Systems Control Engineering Journal.
- Wang, Q., Luo, G., & Wang, J. (2015). *A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries*. Journal of Power Sources, 306, 178-193.
- Wang, J., & Yuan, C. (2020). *Thermal Management of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles*. International Journal of Energy Research.