

**Escuela Superior Politécnica Del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Diseño y evaluación de un sistema de gestión y control energético para  
un vehículo híbrido

**Proyecto Integrador**

Previo a la obtención del Título de:

**Ingenieros en Mecatrónica**

Presentado por:

Jean Carlos Mejía Bedor

Pedro Alejandro Rendón Pantoja

Guayaquil – Ecuador

Año: 2023

## DEDICATORIA

---

Dedico este trabajo a mis padres que me han proporcionado las herramientas, guía, cariño infinito e inspiración para culminar con éxito este largo camino recorrido.

A mi novia que me ayudó en cada etapa del trabajo y me apoyó en todo momento.

A mis gatas que me ayudaron en los momentos de mayor estrés con su eterna disposición al juego y al ronroneo que eliminó toda carga de encima.

A Dios que me iluminó con su sabiduría y me brindó la esperanza para continuar.

**Pedro Alejandro Rendón**

Dedico este proyecto de tesis a los pilares de mi vida, para comenzar, mi amada familia, que me brindó todo el amor que un universitario pudo jamás esperar.

A mis leales mascotas, cuyas travesuras me alegraron en mis días de estudio, en los más estresantes y en aquellos que casi me daba por vencido.

A mis queridos amigos, por su compañía y palabras de ánimo en cada etapa de este viaje, para aquellos que me acompañaron desde el colegio, y para los que un día conocí en el preuniversitario y se volvieron una parte esencial de mi vida.

Y a mis profesores, cuya sabiduría y guía me han llevado hasta aquí. Sin su orientación y amistad e inspiración este logro no sería posible.

**Jean Mejia Bedor**

## **AGRADECIMIENTOS**

---

Agradezco en primer lugar a Dios por ayudarme a que cada puerta de conocimiento sea abierta.

Agradezco a mis padres que me dieron el apoyo y su amor incondicional.

Agradezco a mis profesores por brindarme las herramientas necesarias para culminar esta etapa.

**Pedro Alejandro Rendón**

Este gran capítulo de mi vida no puede terminar sin agradecer a quienes han sido una fuente constante de apoyo y aliento.

Le doy gracias a mi familia por tenerme paciencia y comprenderme en todo mi trayecto académico. Cada logro que consigo fue gracias a ellos y, por tanto, es un logro de todos nosotros.

A mis queridos amigos, que me han llenado de alegría, risas y compañía, me han dado ánimos y me han motivado. Su presencia es un alivio que siempre guardaré en mi corazón.

A mis adoradas mascotas, cuyas ocurrencias y muestras de cariño han iluminado, e inspirado, mis días de estudio.

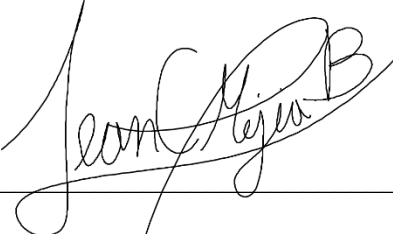
Y a las ventajas tecnológicas con las que cuentan las nuevas generaciones, una fuente de inagotable conocimiento, orientación y entretenimiento, capaz de otorgar información precisa a cualquier momento.

**Jean Mejia Bedor**

## DECLARACIÓN EXPRESA

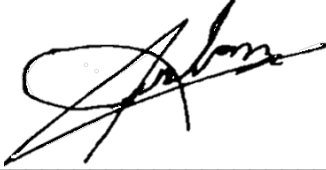
---

“Los derechos de titularidad y explotación nos corresponden conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Mejía Bedor Jean Carlos y Rendón Pantoja Pedro Alejandro y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



---

Mejia Bedor Jean Carlos



---

Rendón Pantoja Pedro Alejandro

## EVALUADORES

---

Ph. D. Carlos Xavier Saldarriaga Mero

Profesor de Materia

---

Ph. D. Gonzalo Almeida Pazmiño

Tutor de Proyecto

## RESUMEN

La limitada autonomía y vida útil de los vehículos híbridos han sido ineficientes en comparación con las alternativas del mercado actual. En este trabajo, se propone el diseño de un sistema de propulsión para un vehículo híbrido liviano tipo Go-kart, cuya fuente principal es la batería y las celdas de combustible de hidrógeno las secundarias. La evaluación de los componentes del vehículo se hace con el nuevo ciclo de manejo europeo (NEDC). En este proceso, se aplica una arquitectura en paralelo, con un banco de baterías de 12 kW, tres celdas de 2 kW y un motor de 16 kW. El modelo del vehículo se construyó en Matlab/Simulink con los parámetros de diseño. Además, se desarrolló el sistema de gestión y control energético fundamentado en aprendizaje reforzado respaldado por inteligencia artificial. Por lo tanto, al compararse el enfoque de aprendizaje reforzado con enfoques previos de ADVISOR y programación dinámica, se observó una mejora del 47% en la vida útil de la batería y un ahorro de \$3751,46 dólares, además de un 34% en la vida útil y \$1488,58 dólares respectivamente. Por otra parte, el agente de aprendizaje reforzado entrenado con aprendizaje reforzado se evaluó en un contexto ecuatoriano con resultados de eficiencia similares a los del NEDC. Esto respalda la eficiencia del sistema de gestión energética basado en aprendizaje reforzado diseñado para un vehículo que usa hidrógeno como combustible, siendo capaz de cumplir con la demanda de potencia y preservando la vida útil de sus componentes.

Este trabajo se distribuye así: el primer capítulo introduce el contexto y objetivos del proyecto, el segundo se enfoca en la metodología para modelar la solución, el tercero aborda los análisis de los resultados y el cuarto las conclusiones del trabajo y recomendaciones a futuro.

**Palabras Clave:** Diseño, Modelado, Sistema de Gestión Energética, Aprendizaje Reforzado, Rentabilidad.



## ABSTRACT

*The limited autonomy and lifespan of hybrid vehicles have proven to be inefficient compared to current market alternatives. This paper proposes the design of a propulsion system for a lightweight hybrid vehicle, like a Go-kart, with the primary power source being the battery and hydrogen fuel cells serving as secondary sources. The vehicle components were evaluated using the New European Driving Cycle (NEDC). In this process, a parallel architecture was applied, featuring a 12-kW battery bank, three 2-kW fuel cells, and a 16-kW motor. Subsequently, the vehicle model was constructed in MATLAB/Simulink using the design parameters. Additionally, an energy management and control system based on reinforcement learning supported by artificial intelligence was developed. When comparing the reinforcement learning approach with previous methods such as ADVISOR and dynamic programming, a 47% improvement in battery lifespan and a savings of \$3751.46 were observed, along with a 34% increase in lifespan and \$1488.58 in savings, respectively. Furthermore, the agent was evaluated in an Ecuadorian context, where similar efficiency results to those of the NEDC were found. Given the results, the efficiency of the reinforcement learning-based energy management system designed for an emissions-free fuel-using vehicle, capable of meeting power demand and preserving the lifespan of its components, is supported.*

*The chapters of this paper are distributed as follows: Chapter 1 introduces the context and research objectives, Chapter 2 focuses on the method for modeling the solution, Chapter 3 addresses the analysis of the obtained results, and Chapter 4 supplies the conclusions for the current work and recommendations for future research.*

**Keywords:** *Design, Modeling, Energy Management System, Reinforcement Learning, Rentability.*

**ÍNDICE GENERAL**

RESUMEN .....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS .....	VII
SIMBOLOGÍA .....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIV
CAPÍTULO 1 .....	1
1.1    Introducción .....	2
1.2    Descripción del Problema .....	2
1.3    Justificación del Problema .....	3
1.4    Objetivos .....	4
1.4.1    Objetivo General.....	4
1.4.2    Objetivos Específicos .....	4
1.5    Marco Teórico .....	5
1.5.1    Ciclos de Manejo.....	5
1.5.2    Vehículos Híbridos .....	5
1.5.3    Baterías de Litio.....	7
1.5.4    Celdas de Combustible .....	8

1.5.5 Frenado Regenerativo.....	9
1.5.6 Sistemas de Gestión Energética.....	10
CAPÍTULO 2.....	12
2.1 Metodología .....	13
2.2 Alternativas de Solución .....	14
2.2.1 Power Follower (ADVISOR).....	14
2.2.2 Dynamic Programming.....	15
2.2.3 Reinforcement Learning.....	17
2.2.4 Selección de Alternativa .....	18
2.3 Diseño de Concepto .....	19
2.4 Selección y Modelado del Motor/Generador .....	21
2.5 Selección y Modelado del Sistema de Transmisión.....	23
2.6 Selección y Modelado del Cuerpo del Vehículo .....	26
2.7 Selección y Modelado de las Baterías.....	29
2.8 Selección y Modelado del Controlador del Motor .....	31
2.9 Selección y Modelado del Convertidor DC/DC.....	34
2.10 Selección y Modelado de la Celda de Combustible.....	36
2.11 Requerimientos Aerodinámicos .....	39
2.12 Requerimientos Térmicos.....	41
2.13 Sistema de Gestión y Control Energético.....	41

2.13.1 Función de Costo .....	41
2.13.2 Selección del Método para Actualizar las Recompensas.....	42
2.13.3 Algoritmo para DQN .....	44
2.13.4 Modelado para DQN .....	46
CAPÍTULO 3.....	49
3.1 Resultados y Análisis .....	50
3.1.1 Comparativa entre el Ciclo de Manejo Real y el Modelado.....	51
3.1.2 Potencia Generada por la Batería para Cumplir el NEDC .....	52
3.1.3 Potencia Generada por el FCP para Cumplir el NEDC .....	54
3.1.4 Comparativa entre el SOC de los EMS .....	56
3.1.5 Comparativa entre el Consumo de Hidrógeno de los EMS.....	58
3.1.6 Curva de Recompensa para el Entrenamiento de RL .....	60
3.1.7 Torque de Entrada y Salida del Motor. ....	63
3.1.8 Fuerzas Normales de las Ruedas .....	65
3.1.9 Análisis Aerodinámico .....	67
3.1.10 Análisis de Disipación Térmica.....	69
3.1.11 Comportamiento del Agente en el Ciclo DMQ .....	71
3.2 Análisis de Tiempo de Vida Útil .....	73
3.2.1 Ciclos de Carga/Descarga de la Batería.....	73
3.3 Análisis de Costos .....	74

3.3.1 Costo de Componentes .....	74
3.3.2 Análisis de la Vida Útil de la Batería y el Consumo de Combustible .....	76
CAPÍTULO 4.....	79
4.1 Conclusiones y Recomendaciones .....	80
4.1.1 Conclusiones.....	80
4.1.2 Recomendaciones .....	81
REFERENCIAS.....	82
APÉNDICES.....	89

**ABREVIATURAS**

ICE	Internal Combustion Engine
CV	Conventional Vehicle
EV	Electric Vehicle
HEV	Hybrid Electric Vehicle
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
FCHEV	Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle
FCPHEV	Fuel Cell Plug-in Hybrid Electric Vehicle
FCP	Fuel Cell Pack
PEMFC	Proton-Exchange Membrane Fuel Cell
NEDC	New European Drive Cycle
WLTP	World Harmonized Light-Duty Vehicle Test Procedure
DMQ	Distrito Metropolitano de Quito
SOC	State of Charge
EMS	Energy Management System
DP	Dynamic Programming
RL	Reinforcement Learning
DQN	Deep Q Network

IA	Inteligencia Artificial
CTF	Cycles To Failure
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
CERA	Centro de Energías Renovables y Alternativas

**SIMBOLOGÍA**

-	Adimensional
kg	Kilogramo
g	Gramo
L	Litro
m	Metro
s	Segundo
min	Minuto
km	Kilometro
W	Vatio
kW	Kilovatio
J	Julio
kWh	Kilovatio-Hora
V	Voltio
A	Amperio
Ah	Amperio-Hora
atm	Atmosfera
Pa	Pascal



kPa	Kilopascal
H <sub>2</sub> O	Agua
H <sub>2</sub>	Hidrógeno gaseoso diatómico
Li-ion	Iones de litio
pH	Potencial de hidrógeno
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Clasificación de HEV .....	6
Figura 1.2 Funcionamiento de una batería de litio .....	7
Figura 1.3 Funcionamiento de una PEMFC .....	9
Figura 1.4 Diagrama de flujo de potencia en EV.....	10
Figura 1.5 HEV con 3 fuentes de energía .....	11
Figura 2.1 Metodología de diseño .....	14
Figura 2.2 Flujograma de aplicación para DP .....	16
Figura 2.3 Diagrama de RL .....	17
Figura 2.4 Diagrama esquemático de la arquitectura de propulsión.....	20
Figura 2.5 Circuito equivalente para el motor DC.....	22
Figura 2.6 Potencia de diseño transmitida en función de la velocidad del piñón .....	24
Figura 2.7 Representación del Go-Kart escogido para el cuerpo del vehículo.....	26
Figura 2.8 Diagrama de cuerpo libre del modelo del cuerpo del vehículo .....	27
Figura 2.9 Modelo dinámico de la batería .....	30
Figura 2.10 Circuito equivalente para el puente H .....	33
Figura 2.11 Circuito equivalente para el convertidor DC/DC .....	35
Figura 2.12 Circuito equivalente para la celda de combustible .....	38
Figura 2.13 Metodología de interacción para una DQN.....	44
Figura 2.14 Diagrama de flujo de DQN.....	47
Figura 2.15 Arquitectura de DQN.....	48
Figura 3.1 Comparativa entre la velocidad del ciclo de manejo real y la generada por el modelo .....	51

Figura 3.2 Potencia generada de la batería según ADVISOR, DP y RL .....	52
Figura 3.3 Potencia generada de la batería según ADVISOR, DP y RL .....	54
Figura 3.4 Curvas de SOC .....	56
Figura 3.5 Curvas de consumo de hidrogeno.....	58
Figura 3.6 Curva de entrenamiento.....	60
Figura 3.7 Torques del vehículo.....	63
Figura 3.8 Fuerzas normales del vehículo .....	65
Figura 3.9 Gráfica de los valores de Re del aire .....	67
Figura 3.10 Fuerza de arrastre del vehículo.....	68
Figura 3.11 Potencia generada de la batería según ADVISOR, DP y RL.....	69
Figura 3.12 Graficas obtenidas con el ciclo DMQ .....	71
Figura A1 Modelado ADVISOR.....	22
Figura A2 Modelado de DP .....	22
Figura A3 Modelado de RL .....	23
Figura B1 Subsistema Regenerative Motor Control.....	23
Figura B2 Subsistema Vehicle .....	25
Figura B3 Subsistema Aereodynamics .....	26
Figura B4 Subsistema Fuel Cell .....	27
Figura B5 Subsistema Battery .....	29
Figura B6 Subsistema SOC Calculation.....	30
Figura B7 Subsistema Converter Control.....	30
Figura B8 Subsistema Reinforcement Learning.....	31
Figura C1 Configuración bloque: Motor DC.....	32

Figura C2 Configuración bloque: Battery.....	33
Figura C3 Configuración bloque: Controlled PWM.....	34
Figura C4 Configuración bloque: H Bridge.....	35
Figura C5 Configuración bloque: DC/DC Converter .....	36
Figura C6 Configuración bloque: Fuel Cell.....	37
Figura C7 Configuración bloque: Vehicle .....	38
Figura C8 Configuración bloque: Tire.....	39
Figura C9 Configuración bloque: Disc Brake .....	39
Figura C10 Configuración bloque: Simple Gear .....	40
Figura C11 Configuración bloque: Temperature Source .....	40
Figura D1 Diagrama de cuerpo libre del vehículo.....	41
Figura E1 Curva de entrenamiento .....	44

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 2.1 Matriz de decisión para seleccionar la alternativa de solución.....	19
Tabla 2.2 Parámetros de diseño del motor/generador.....	21
Tabla 2.3 Número de dientes del piñón y engrane para eliminar la interferencia.....	25
Tabla 2.4 Descripción de las variables del modelo del cuerpo del vehículo .....	27
Tabla 2.5 Parámetros de diseño de la batería.....	29
Tabla 2.6 Características del controlador del motor .....	31
Tabla 2.7 Parámetros de diseño del convertidor.....	34
Tabla 2.8 Parámetros de la celda de combustible Stack Horizon H-200.....	37
Tabla 2.9 Condiciones de operación del vehículo.....	39
Tabla 2.10 Especificaciones geométricas de los elementos del vehículo .....	40
Tabla 2.11 Matriz de decisión del algoritmo de RL.....	43
Tabla 3.1 Comparativa de valores de ciclos de carga/descarga hasta el fallo de la batería .....	74
Tabla 3.2 Detalle de costo de componentes seleccionados .....	75
Tabla 3.3 Detalle de costo de vida útil.....	77

# **CAPÍTULO 1**

## **1.1 Introducción**

En esta sección se expone la problemática del proyecto, indicando sus causas y consecuencias, se detalla la justificación de este con datos estadísticos de ventas, emisiones, velocidades y eficiencias de vehículos en el mercado. Además, se especifica el objetivo general y los objetivos específicos. Finalmente, en el marco teórico se exponen los principales conceptos que sirven de apoyo en la realización de este trabajo.

## **1.2 Descripción del Problema**

Grandes avances tecnológicos en materia eléctrica, mecánica y de control han permitido que los vehículos eléctricos híbridos enchufables con celdas de combustible (Plug-in Hybrid Electric Vehicle - FCPHEV) se muestren como grandes competidores en el mercado automotriz presentando cualidades como gran autonomía, carga rápida, entre otras. Las celdas de combustible y las baterías son las fuentes energéticas de dichos vehículos, cuyo comportamiento de consumo de combustible y estado de carga permite el análisis de la eficiencia del vehículo. Hoy, esa eficiencia está en rangos de valores que restan competitividad en el mercado con relación a otras opciones eléctricas o de combustión interna. Esta baja eficiencia, además, produce un impacto medio ambiental negativo al aumentarse los desechos de baterías. Como consecuencia, los FCPHEV, a pesar de sus cualidades, no muestran competitividad en cuanto al gasto energético con relación a otras opciones del mercado.

Aunque el sistema de gestión energético es importante para la eficiencia energética, un dimensionamiento inadecuado de los componentes también reduce la eficiencia y autonomía del vehículo, por lo que es necesario que en la problemática también se considere el dimensionamiento y selección de los componentes mecatrónicos del FCPHEV. Finalmente, para el Centro de Energías Renovables y Alternativas (CERA) de ESPOL, que desarrolla investigación, transferencia e

innovación tecnológica en energías renovables, eficiencia y sostenibilidad energética, los FCPHEV muestran un sistema de gestión energética y un dimensionamiento de componentes insuficiente, lo que resulta en una menor autonomía de la batería y un elevado consumo de combustible de hidrogeno.

### **1.3 Justificación del Problema**

El interés por el uso de vehículos híbridos ha ido en aumento en los últimos años, las ventas anuales de este tipo de vehículos superarán los 6,5 millones de unidades en 2027. Además, el valor del mercado mundial de los vehículos híbrido-eléctricos (HEV), estimado en USD \$256.000 millones en 2020, se espera que crezca a \$2 billones para 2026.[1]

La movilidad eléctrica es fundamental para reducir las emisiones en el sector del transporte, responsable de aproximadamente el 24% de las emisiones de CO<sub>2</sub> en 2020. Se espera que la adopción de vehículos eléctricos y otras soluciones de movilidad sostenible desempeñen un papel crucial en la reducción de las emisiones y en la transición hacia un transporte más limpio y respetuoso con el medio ambiente.[2]

Una comparativa entre vehículos híbridos y convencionales, muestra que los híbridos, como el Toyota Yaris, reducen el consumo de combustible hasta un 50% a velocidades bajas (20 km/h); sin embargo, a velocidades superiores a 90 km/h el consumo es similar. Por otro lado, diferencias, en la capacidad regenerativa de los motores afectan la eficiencia; el Prius recupera el 27,6% de la energía durante el frenado, mientras que el Yaris solo el 14,3%.[3]

El costo de vida útil de cada tipo de vehículo presenta gran importancia durante la comparación entre ellos. En la investigación de T. Markel y A. Simpson [4], se concluyó que los HEV demuestran tener un costo de propiedad más bajo en comparación con los vehículos



convencionales (CV) después de aproximadamente 10 años. No obstante, debido a los elevados costos de las baterías y los precios bajos del combustible a corto plazo, los vehículos híbrido-eléctricos enchufables (PHEV) no logran alcanzar un costo de propiedad inferior al de los CV o los HEV durante toda la vida útil del vehículo, que suele ser de 15 años.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo General***

Diseñar y evaluar distintas estrategias de gestión y control energético para un vehículo híbrido liviano mediante modelado y simulación siguiendo condiciones del ciclo de manejo para la mejora del desempeño, eficiencia, durabilidad, costos y sustentabilidad de la celda de combustible, batería y motor en general.

### ***1.4.2 Objetivos Específicos***

- Diseñar, modelar y simular un vehículo híbrido del tipo FCPHEV para el análisis de estrategias de gestión energética bajo distintos ciclos de manejo.
- Desarrollar la base metodológica de control para un sistema de gestión energético que emplee y aproveche los recursos de Inteligencia Artificial (IA) para su desarrollo y posterior evaluación.
- Calcular los requerimientos mecánicos y eléctricos del vehículo según las cargas obtenidas bajo las condiciones del ciclo de manejo para dimensionar las baterías, la transmisión, motor y celdas de combustible, así como determinar sus cargas aerodinámicas y fuerzas de arrastre, según la estrategia energética que otorgue mayor rendimiento.

## **1.5 Marco Teórico**

### **1.5.1 Ciclos de Manejo**

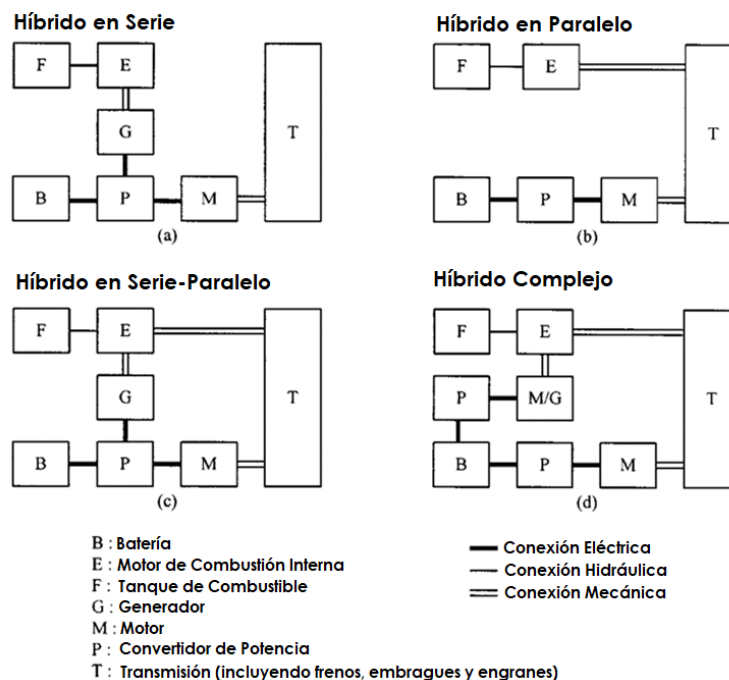
El ciclo de manejo se refiere al conjunto de velocidades ponderadas de una forma de conducir que es representativa de una región, la cual puede ser desde un país hasta una autopista. En este se evalúan aspectos relacionados al tráfico de la ciudad, clima durante el viaje, carreteras por la que se circula, altitud de la zona, tipo de transporte (personal o público), entre otras.[5]

Existen muchos ciclos de manejo que se usan alrededor del mundo, en la Unión Europea está el New European Drive Cycle (NEDC) y ARTEMIS, en EE. UU. se usa el FTP-75, en Japón están el 10-15 y JC-08, de manera Global se encuentra el World Harmonized Light-Duty Vehicle Test Procedure (WLTP), el cual cuenta con una mejor comprensión sobre las emisiones y el consumo de combustible, por lo que se está volviendo mucho más aceptado alrededor del mundo.[6]

Así mismo, el trabajo realizado por Eduardo Quinchimbla y Javier Solís [6], dio como resultado el Ciclo de Conducción del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). No obstante, según indican Santiago Pérez y Christian Quito [7], en Ecuador se usan las normativas NTE INEN 2204 y 2207 para estimar el límite de gases de efecto invernadero. Estas se basan en el ciclo FTP-75 y el ECE EUDC, respectivamente, siendo este último el que dio origen al NEDC que, por consiguiente, también sería aplicable en este país.

### **1.5.2 Vehículos Híbridos**

El término “*híbrido*” se emplea para referirse a vehículos que cuenten con 2 o más fuentes de energía, como pueden ser: motor de combustión interna, ultra capacitores, baterías, celdas de combustible, entre otras. Debido a la conexión de sus fuentes, se pueden clasificar en 4 tipos, híbridos en serie, en paralelo, en serie-paralelo y de conexión compleja.[8]

**Figura 1.1***Clasificación de HEV [8]**Nota. Traducido al español.*

Según M.A. Hannan, F.A. Azidin y A. Mohamed [9], la celda de combustible en comparación al motor de combustión interna (ICE) es más eficiente energéticamente y sin emisión de gases contaminantes. Pero representa un alto costo económico frente a cambios de velocidad y aceleración, lo que las baterías son capaces de sobrellevar de buena manera. Al combinar ambos se tienen los Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle (FCHEV).

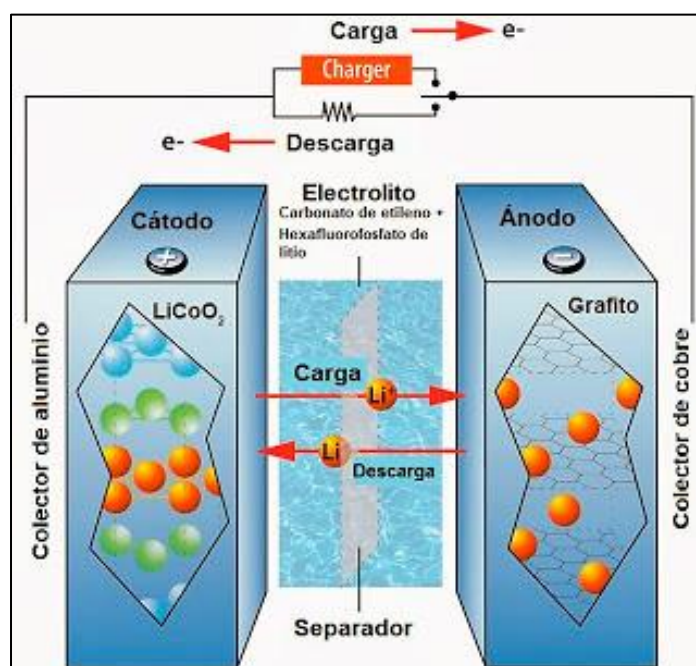
Los HEV tienen una propulsión mecánica idéntica a un vehículo eléctrico (EV), emplean un motor eléctrico para generar la potencia que permite moverse. En el mercado se pueden encontrar vehículos eléctricos con motores DC de escobillas, de inducción, o sincrónicos de imán permanentes. Estos son usados por su alta eficiencia, pero requieren de componentes adicionales

como conmutadores mecánicos o controladores de velocidad para su implementación en los vehículos.[10]

### 1.5.3 Baterías de Litio

**Figura 1.2**

*Funcionamiento de una batería de litio [11]*



Las baterías de litio almacenan un potencial eléctrico durante un tiempo (depende de las características que tenga), mediante un cátodo de litio, un ánodo hecho de un compuesto que inserta iones  $\text{Li}^+$ , y un electrolito o disolución de estos iones en un solvente. Cuando los terminales de la batería son conectados, el cátodo envía iones de litio hacia el ánodo a través del electrolito, generando una corriente eléctrica que, a su vez, va descargando la batería. Por otra parte, en el proceso de carga la corriente suministrada permite que los iones fluyan en sentido contrario.[12]

En los vehículos híbridos es común encontrar baterías como fuente de energía, pues, generalmente, su peso es menor y cuentan con una alta eficiencia en ciclos de carga y descarga.

#### **1.5.4 Celdas de Combustible**

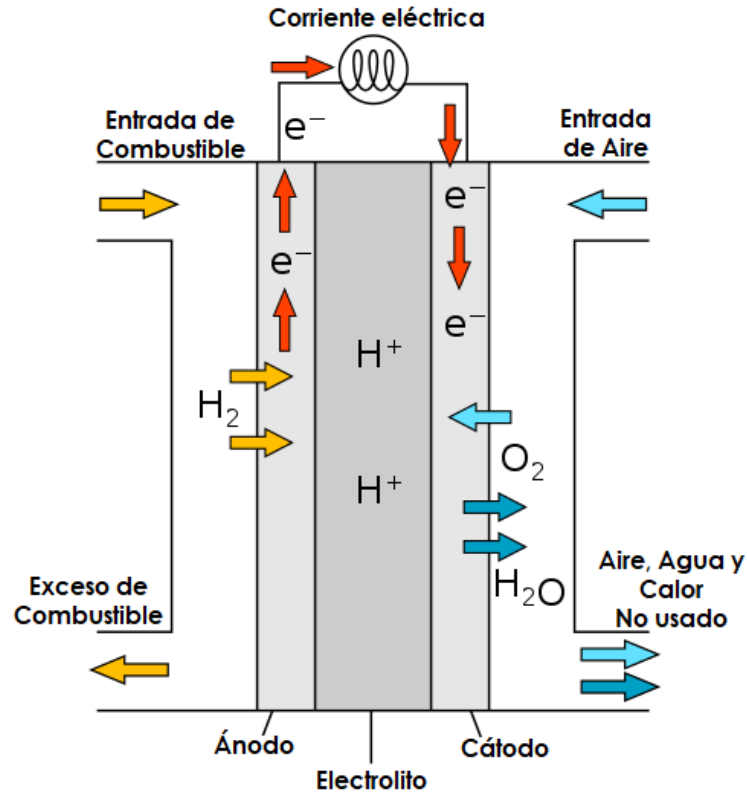
Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que transforman una reacción de hidrógeno y oxígeno en energía eléctrica. Al igual que las baterías, éstas cuentan con un cátodo, un ánodo y el electrólito, aunque su funcionamiento es diferente. En el ánodo, el hidrógeno se oxida liberando iones ( $H^+$ ) y electrones. Simultáneamente, el electrolito transporta los protones hacia el ánodo, mientras que los electrones circulan por un circuito externo conductor para aprovechar la electricidad. En el cátodo, el oxígeno se reduce para generar agua.[13]

El uso de estas celdas se ha visto en aumento en los últimos años, gracias a la generación de electricidad con bajas emisiones de gases de efecto invernadero. Según Alvarado Flores [13], en su revisión entre distintos tipos de celdas de combustible, aquella que resulta óptima en lo que respecta al transporte es la celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC).

El funcionamiento de las PEMFC no es diferente al descrito previamente. Además, cuentan con placas bipolares que permiten la reacción adecuada de hidrogeno con oxígeno y la conexión eléctrica de más celdas, las capas de difusión del gas que son las encargadas de suministrar equitativamente los gases a los electrodos, la membrana de intercambio protónico, un plástico aislante capaz de conducir protones, y la capa catalizadora que inicia la oxidación del hidrogeno en el ánodo.[14]

**Figura 1.3**

*Funcionamiento de una PEMFC [11]*



*Nota. Traducido al español.*

### 1.5.5 Frenado Regenerativo

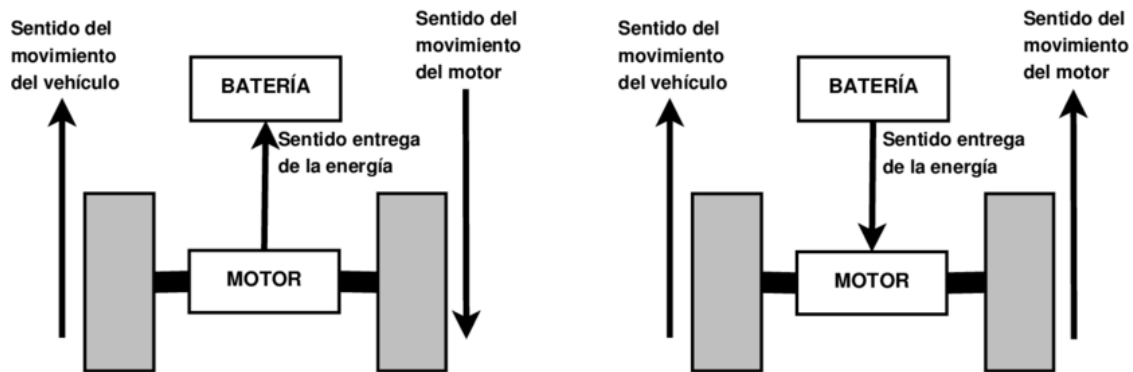
El frenado regenerativo es un concepto aplicable a vehículos eléctricos e híbridos. Esta se basa en la aplicación del motor eléctrico como un generador que se activa durante el frenado, así la energía cinética es aprovechada lo que aumenta el rendimiento energético, pues no es disipada completamente en forma de calor y vibraciones.[15]

Su funcionamiento consiste en invertir el sentido de giro del motor eléctrico cuando se presiona el pedal del freno. Durante este trayecto, el eje gira en el sentido contrario al de las llantas y el motor actúa como generador hasta que el vehículo se detenga, y la electricidad obtenida

alimenta a la batería. Luego, en la operación normal del vehículo, eje del motor y llantas giran en el mismo sentido y la batería suministra potencia al motor.[16]

**Figura 1.4**

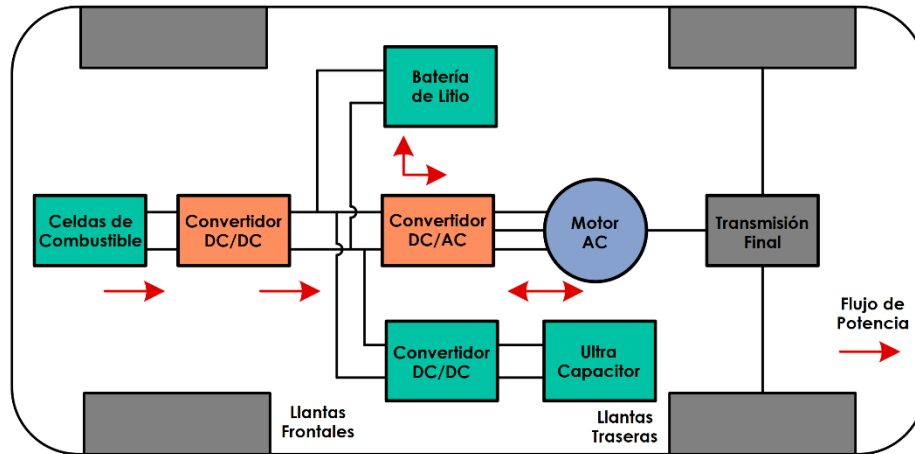
*Diagrama de flujo de potencia en EV [16]*



### 1.5.6 *Sistemas de Gestión Energética*

Uno de los principales inconvenientes de los vehículos híbridos es el control ineficiente de sus fuentes de energía. Por ello, es necesario desarrollar estrategias de gestión energética (EMS por sus siglas en inglés) teniendo en cuenta que mientras más fuentes tenga el vehículo, más complejo será el controlador.[17]

El controlador depende en gran medida del convertidor DC-DC para las fuentes. Este dispositivo permite gestionar el voltaje de modo que se garantice que el sistema eléctrico opere lo más eficientemente posible.[9]

**Figura 1.5***HEV con 3 fuentes de energía [17]**Nota. Traducido al español.*

El EMS en un vehículo híbrido optimiza el uso de cada fuente disponible para alcanzar una velocidad o un ciclo de manejo según una metodología específica. De hecho, ésta se puede clasificar en dos grandes grupos: las de reglas y las de optimización.[18]

Dongxu Li, Bing Xu, Jie Tian y Zeshu Ma [19] presentaron un sistema basado en la metodología de reglas Fuzzy Logic, consiguiendo mejores resultados en comparación de una estrategia convencional de Power Following Control (que buscaba mantener el estado de carga de la batería (SOC) entre un par de valores. Por otra parte, Changqing Du, Shiyans Huang, Yuyao Jiang, Dongmei Wu y Yang Li [20] analizaron una estrategia basada en la optimización con Dynamic Programming (DP), con la cual se consiguió reducir el consumo de hidrógeno en un FCHEV frente a distintos valores iniciales de SOC y empleando más de un ciclo de manejo.



## **CAPÍTULO 2**

## 2.1 Metodología

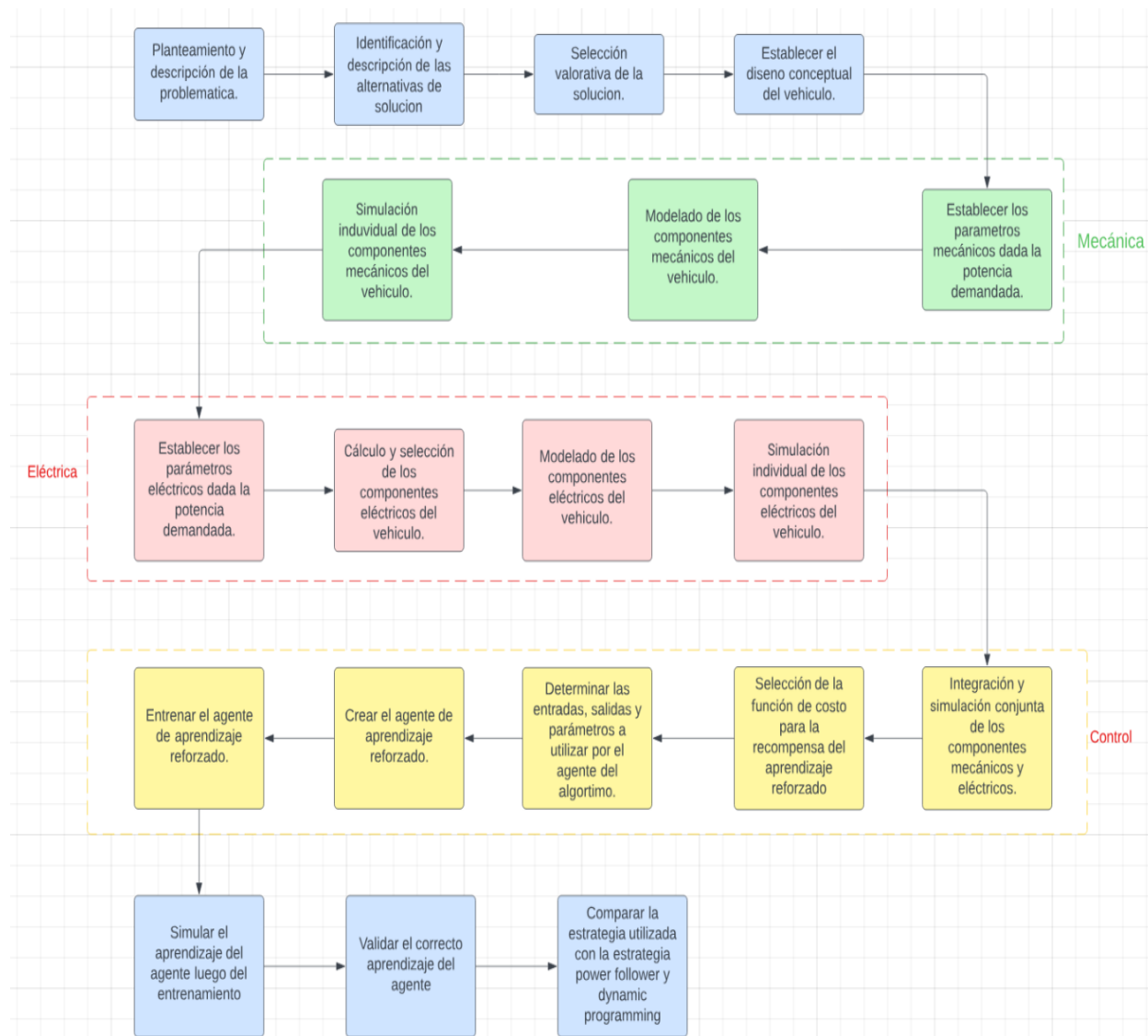
La selección de la alternativa de solución es el primer y principal aspecto que se debe realizar, pues es necesario analizar entre éstas para verificar que un EMS basado en una IA entrenada por Reinforcement Learning (RL) sea capaz de mejorar la eficiencia energética del vehículo. Estas selecciones se realizan con base en matrices de decisión. Además, hay que considerar que, si se decide realizar el RL, se necesitará una selección adicional del algoritmo que se empleará para ello.

Luego, el diseño conceptual del FCPHEV Go-Kart se realiza siguiendo los parámetros ya establecidos en el trabajo de S. Guillermo García Tovar y S. Vicente Espinosa Ortiz [21], donde se escogió una disposición en paralelo pues de este modo se puede realizar una comparación con sus resultados en términos de eficiencia, estado de carga de la batería, consumo de combustible de hidrógeno, potencia demanda del motor y otras características. Incluye también la selección de cada componente importante del vehículo, es decir, el motor/generador, las baterías, el controlador del motor, el convertidor DC/DC, la celda de combustible, el tanque de hidrógeno y el EMS.

Adicionalmente, en Simulink se precisa de una configuración para cada uno de estos bloques, la cual no solo se ve afectada por los parámetros de los elementos ya seleccionados, sino que, la simulación se realiza con base en las ecuaciones de su modelo matemático, por lo que es necesario analizarlos para configurar adecuadamente cada bloque. Esta misma información se presenta para los demás elementos que conforman la simulación en las secciones “*Apéndice C – Configuración y Bloques de Simulink*” y “*Apéndice D – Modelos Matemáticos*” (los más relevantes, si un bloque no es descrito es porque sus valores se toman por defecto).

Figura 2.1

## Metodología de diseño



## 2.2 Alternativas de Solución

### 2.2.1 Power Follower (ADVISOR)

El programa ADVISOR administra la energía usando una estrategia de control llamada Power Follower. Cuando el motor está encendido, esta estrategia ajusta la potencia generada por la celda de combustible según la demanda del bus de tránsito. Esto se logra a través de una Línea

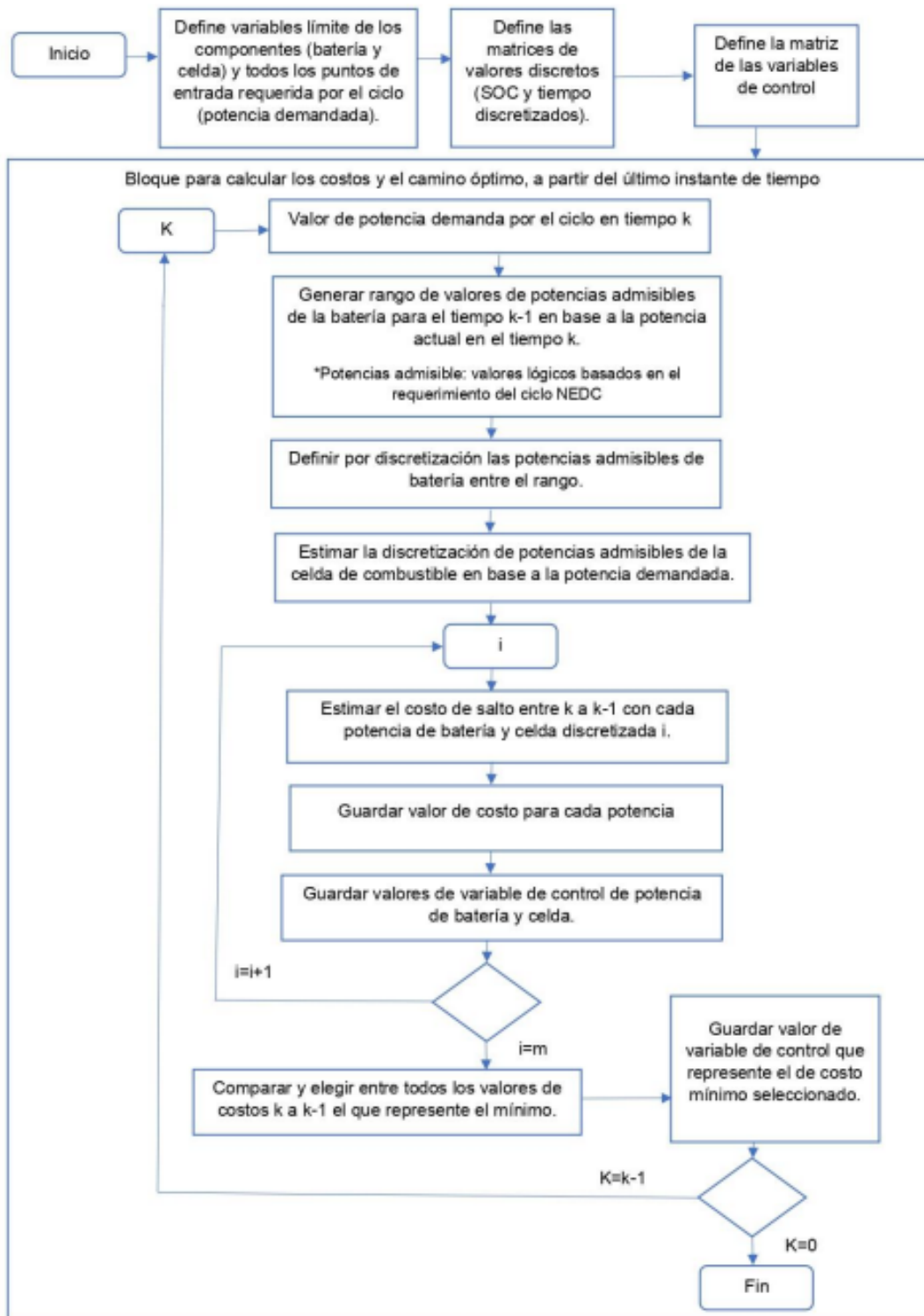
de Operación Óptima, manteniendo siempre un equilibrio entre el estado de carga de la batería y la potencia de la celda de combustible. Como resultado, la potencia de salida y la corriente de operación disminuyen juntas.[22]

### **2.2.2 *Dynamic Programming***

El algoritmo funciona en intervalos de tiempo discretos y tiene en cuenta cómo se almacena la energía. Esto se hace para crear un conjunto de posibles estados para la carga de la batería. El algoritmo utiliza una función que calcula el precio o costo de cambiar del estado actual a un estado siguiente. La eficacia de esta función depende de las variables de control o flujo representadas por la potencia de la celda y la potencia demandada. En cada instante de tiempo discreto, el algoritmo elige la transición de menor costo. Luego, repite este proceso para todos los instantes. Después de considerar todas las opciones, el algoritmo suma el costo mínimo, determinando así la ruta completa para alcanzar el objetivo.

Figura 2.2

Flujograma de aplicación para DP [21]

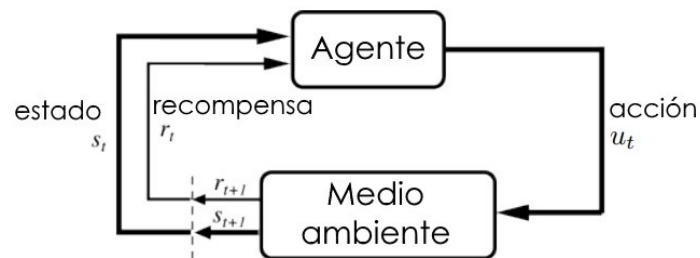


### 2.2.3 Reinforcement Learning

La estrategia de RL se basa en la interacción entre el agente, el entorno, la recompensa, la acción y el estado lo cual se describe en [23]. El agente se encargará de seleccionar el camino óptimo para maximizar la recompensa  $r_t$ , cuyo valor se evaluará usando el costo instantáneo de la ecuación 2.31. Mientras tanto, el entorno recibe la acción del agente y genera la señal de recompensa, provocando un nuevo estado  $s_t$ . Lo anterior es descrito en la siguiente figura:

**Figura 2.3**

*Diagrama de RL [23]*



El camino óptimo por seguir para maximizar la recompensa se describe como política óptima que se basa en la función óptima de acción-valor ( $q_*(s, a)$ ), la cual expresa la recompensa total esperada del estado actual  $S_t$  tomando la acción actual  $A_t$  dada por Richard S. Sutton y Andrew G. Barto [23]:

$$q_*(S_t, A_t) = \max_{\pi} q_{\pi}(S_t, A_t) \quad (2.1)$$

$q_*(S_t, A_t)$ : función óptima de acción-valor

$q_{\pi}(S_t, A_t)$ : función óptima de acción-valor para una política específica

$S_t$ : estado actual

$A_t$ : recompensa actual

Para determinar el algoritmo de iteración se usa la ecuación óptima de Bellman para  $q_*$ :

$$q_*(s, a) = \mathbb{E}[R_{t+1} + \gamma \max_{a'} q_*(S_{t+1}, a') \mid S_t = s, A_t = a] \quad (2.2)$$

$R_{t+1}$ : recompensa siguiente

$S_{t+1}$ : estado siguiente

$\gamma$ : factor de descuento que pertenece a valores entre 0 y 1

#### 2.2.4 Selección de Alternativa

Dada la información anterior, se procede a determinar los criterios de selección:

- **Eficiencia energética:** Evalúa la capacidad de un EMS para maximizar el rendimiento y minimizar el consumo de energía mediante el análisis del estado de carga de la batería y el consumo de combustible.
- **Adaptabilidad a diferentes situaciones:** Evalúa la capacidad del EMS para ajustarse y responder de manera óptima a diversas condiciones de manejo y demandas de potencia.
- **Costo computacional:** Estima los recursos computacionales y el tiempo de procesamiento requerido para implementar y ejecutar un EMS, tomando en cuenta la eficiencia y complejidad de los algoritmos utilizados.
- **Facilidad de implementación:** Evalúa la sencillez y factibilidad técnica de implementar un EMS en FCPHEV, considerando aspectos como la integración, adaptación y compatibilidad con los sistemas existentes.
- **Estabilidad y confiabilidad:** Evalúa la capacidad de un EMS para mantener un funcionamiento estable y confiable a lo largo del tiempo, minimizando las averías y asegurando un rendimiento constante y seguro del vehículo.

**Tabla 2.1**

*Matriz de decisión para seleccionar la alternativa de solución*

Criterio	Peso	Alternativas					
		Power Follower		Dynamic Programming		Reinforcement Learning	
		Nota/10	Valor/10	Nota/10	Valor/10	Nota/10	Valor/10
<b>Eficiencia energética</b>	35%	6,00	2,10	7,00	2,45	8,00	2,80
<b>Adaptabilidad a diferentes situaciones</b>	10%	4,00	0,40	4,00	0,40	8,00	0,80
<b>Costo Computacional</b>	15%	7,00	1,05	5,00	0,75	4,00	0,60
<b>Facilidad de Implementación</b>	10%	8,00	0,80	5,00	0,50	7,00	0,70
<b>Estabilidad y confiabilidad</b>	30%	6,00	1,80	7,00	2,45	8,00	2,40
<b>Total</b>	100%		6,15		6,55		7,33

Tomando en cuenta los criterios anteriores la alternativa de solución seleccionada corresponde a RL que obtuvo una puntuación de 7,33/10.

### 2.3 Diseño de Concepto

Siguiendo el enfoque simplificado propuesto por Song, K., Zhang, J., & Zhang, T. [24], se desarrolló la idea central de un sistema de propulsión para un vehículo híbrido. Los componentes principales son: un motor con regenerador, las fuentes de energía que incluyen un paquete de baterías recargables como fuente principal y celdas de combustible de hidrógeno como secundarias, el sistema de gestión energética y el controlador para el motor. Al tratarse de un enfoque simplificado, las cargas secundarias provenientes de elementos externos, como el aire acondicionado o las luces, se consideran nulas en ADVISOR y no se incorporan en el modelo.

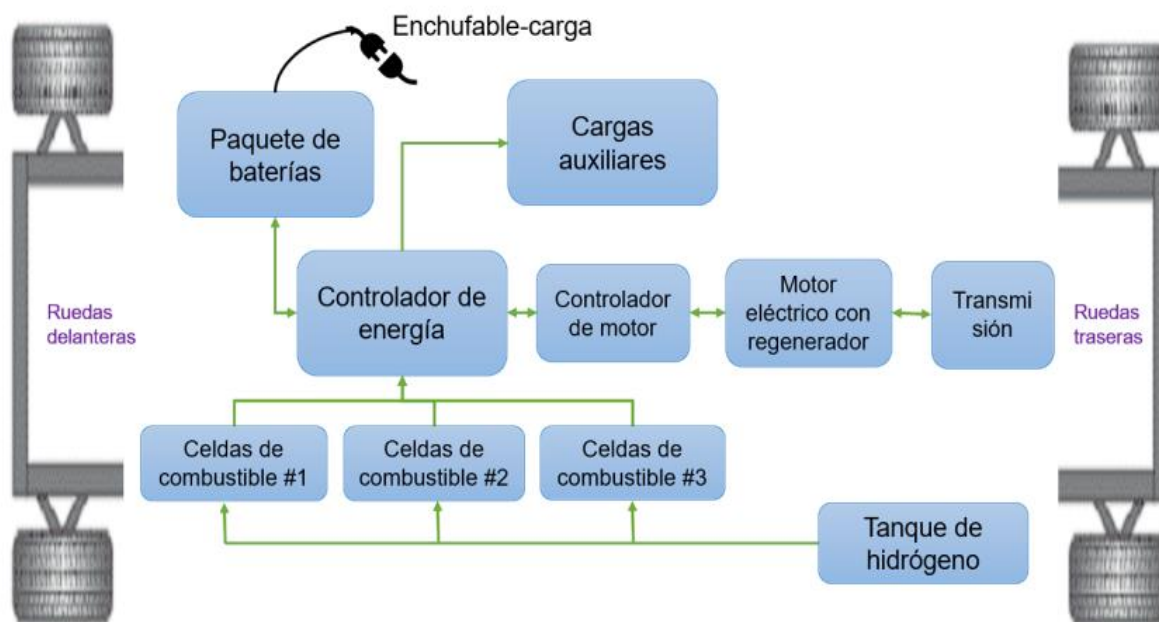
Se implementó una configuración paralela para el tren de potencia, por la existencia de un flujo directo de corriente entre potencia, energía y motor. Esta elección tiene la ventaja de prevenir



pérdidas ocasionadas por conversiones ineficientes de energía entre la celda de combustible, la batería y el motor. Además, esta disposición permite la independencia entre las fuentes de energía, lo cual resulta beneficioso cuando una fuente llega al final de su ciclo de vida o agota su carga. Con base en estos fundamentos, se llegó al diseño conceptual basado en el presentado por S. Guillermo García Tovar y S. Vicente Espinosa Ortiz [21].

**Figura 2.4**

*Diagrama esquemático de la arquitectura de propulsión [21]*



## 2.4 Selección y Modelado del Motor/Generador

**Tabla 2.2**

*Parámetros de diseño del motor/generador*

<b>Parámetros de diseño</b>	<b>Valor</b>	<b>Magnitud</b>
<b>Radio de las ruedas</b>	0,330	m
<b>Eficiencia de transmisión motor-ruedas motrices</b>	0,900	-
<b>Masa total que se necesita impulsar</b>	260,000	kg
<b>Constante de gravedad</b>	9,810	m/s <sup>2</sup>
<b>Coefficiente de resistencia a la rodadura</b>	0,016	-
<b>Densidad del aire</b>	1,290	kg/m <sup>3</sup>
<b>Coefficiente de resistencia aerodinámica</b>	0,935	-
<b>Área frontal del vehículo</b>	0,629	m <sup>2</sup>
<b>Velocidad máxima del vehículo (velocidad de crucero)</b>	115,000	km/h
<b>Grado máximo de pendiente por superar a una velocidad</b>	7,000	grados
<b>Velocidad constante para superar el grado máximo de pendiente</b>	40,000	km/h
<b>Factor de inercia rotacional del vehículo</b>	0,650	-
<b>Velocidad base del motor</b>	20,000	km/h
<b>Velocidad final alcanzada desde 0 para una aceleración en un tiempo determinado</b>	35,000	km/h
<b>Tiempo de aceleración de 0 hasta una velocidad final</b>	8,000	s
<b>Potencia de tracción P1 para alcanzar la máxima velocidad</b>	15,188	kW
<b>Potencia de tracción P2 para superar la pendiente máxima</b>	4,916	kW
<b>Potencia de tracción P3 necesaria para la aceleración</b>	1,781	kW
<b>Relación de transmisión máxima</b>	4,100	-
<b>Torque mínimo del motor</b>	31,421	Nm

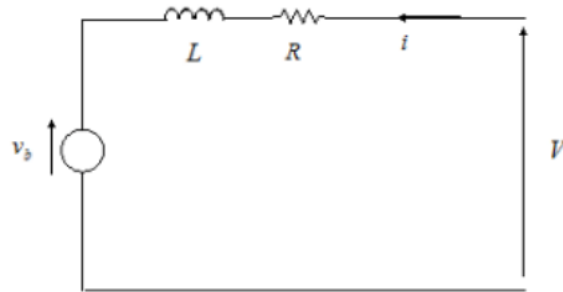
*Nota. Datos tomados de [21].*

En el estudio realizado en [21], se establecen los parámetros para seleccionar el motor/generador (ver tabla 2.2). Luego de comparar tres motores en términos de precio, eficiencia máxima, peso y rango de potencia nominal-pico, se opta por el motor LEM 200-D135RAG LEMCO 96 VDC, el cual obtiene una puntuación de 8,08/10 en la evaluación. Este motor satisface

los requisitos de diseño establecidos y se destaca por su rendimiento y calidad, especialmente en aplicaciones que demandan una tensión de 96 VDC.

### Figura 2.5

*Circuito equivalente para el motor DC [25]*



$R$  [ $\Omega$ ]: resistencia de armadura.

$L$  [ $H$ ]: inductancia de armadura.

Para la generación del campo magnético la fuerza contra electromotriz ( $v_b$ ) es:

$$v_b = kv\omega \quad (2.3)$$

$kv$ : constante contra electromotriz.

$\omega$  [ $rpm$ ]: velocidad angular.

El torque producido ( $T_E$ ) se conoce que es proporcional a la corriente del motor  $i$ :

$$T_E = k_t i \quad (2.4)$$

$k_t$ : constante de torque.

Al asumirse que no hay pérdidas electromagnéticas entonces:  $k_v = k_t$ .

Para determinar el torque de salida se tiene la siguiente ecuación que considera nula la inercia y el amortiguamiento del motor:

$$T_E = \frac{k_t}{R}(V - kv\omega) \quad (2.5)$$

En el cálculo de  $k_t$  y  $R$ , el bloque utiliza la velocidad del motor cuando no tiene carga y el torque nominal, el cual se calcula a partir de la velocidad y la potencia nominal.[25]

Finalmente, dados los parámetros de diseño y consideraciones adicionales se obtuvo la configuración para el bloque del motor que se encuentra en la sección “*Apéndice C – Configuración y Bloques de Simulink*”.

## 2.5 Selección y Modelado del Sistema de Transmisión

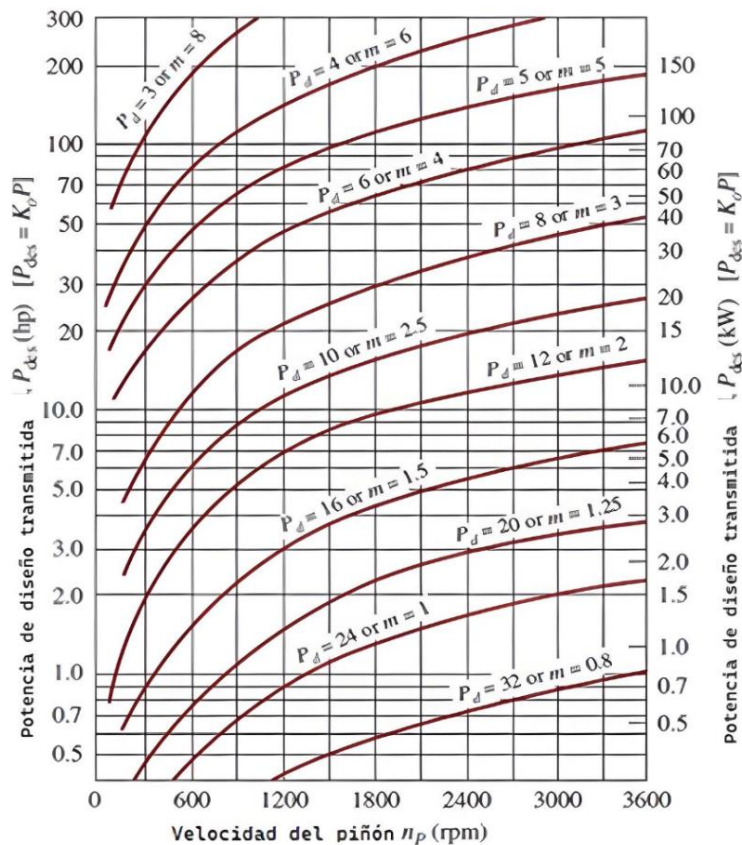
Se escoge un sistema de transmisión de una única velocidad, el cual es común para los motores en los vehículos eléctricos. Dicho sistema de transmisión poseerá engranajes los cuales se seleccionan del catálogo [26] cuyo proceso de dimensionamiento y selección se basan en las especificaciones iniciales mostradas a continuación:

- **Potencia:** 21,46 HP
- **Velocidad angular de entrada máxima:** 1163,10 rpm
- **Velocidad angular de salida máxima:** 283,68 rpm

La norma AGMA recomienda un engranaje recto de presión 20°, por lo cual se escoge dicho engranaje recto. Para el paso diametral tentativo se escogerá uno de 8 pulgadas y un módulo de tamaño de diente cercano a 3 lo cual se escoge de la siguiente figura:

Figura 2.6

Potencia de diseño transmitida en función de la velocidad del piñón [26]



Nota. Para engranes rectos con distintos pasos y diámetros – Traducido al español.

Según AGMA el ancho de cara del diente debe estar en un rango de  $16m < F < 8m$  lo que se traduce en un rango de  $24 \text{ mm} < F < 48 \text{ mm}$ , escogiéndose por lo tanto un valor intermedio de 36 mm.

Para escoger el número de dientes del piñón se elige de la figura 2.6 un valor que permita la relación de 4,1 a 1 debido a la relación entre las velocidades angulares de salida y entrada.

**Tabla 2.3**

*Número de dientes del piñón y engrane para eliminar la interferencia [26]*

<b>Número mínimo de dientes en el piñón</b>	<b>Número máximo de dientes en el engrane</b>
17	1309
16	101
15	45
14	26
13	16

*Nota. A profundidad total con 20°. Datos tomados de [26].*

Luego se escogió el número de dientes para el engrane  $N_g=88$  y el número de dientes para el piñón  $N_p = 20$  debido a lo disponible en el catálogo [26]. Después se obtienen los valores de diámetro del piñón ( $D_p$ ), diámetro del engranaje ( $D_g$ ) y distancia entre centros ( $C$ ) usando las siguientes ecuaciones:

$$D_p = mN_p = 60 \text{ mm} \quad (2.6)$$

$$D_g = mN_g = 264 \text{ mm} \quad (2.7)$$

$$C = \frac{N_p + N_g}{2P_d} = 171,45 \text{ mm} \quad (2.8)$$

Finalmente, del catálogo en línea se escogieron para el piñón el TS820 GEAR SPUR 20 DEG STEEL y para el engrane el TC888 GEAR SPUR 20 DEG CAST.

Para el modelado de la transmisión se utilizó el bloque “Simple Gear” mostrado en el Apéndice C cuyo funcionamiento se rige por las siguientes expresiones:

$$r_F \omega_F = r_B \omega_B \quad (2.9)$$

$r_F$  [mm]: radio del engranaje.

$\omega_F$  [rpm]: velocidad angular del engranaje.

$r_B [mm]$ : radio del piñón.

$\omega_B [rpm]$ : velocidad angular del piñón.

La relación entre el piñón y el engranaje se representa por:

$$g_{FB} = \frac{r_F}{r_B} = \frac{N_F}{N_B} \quad (2.10)$$

$N_B [ad]$ : número de dientes del piñón.

$N_{BF} [ad]$ : número de dientes del engranaje.

Finalmente, se obtiene la relación reducida a dos grados de libertad para el torque de salida:

$$g_{FB}\tau_B + \tau_F - \tau_{\text{loss}} = 0 \quad (2.11)$$

$\tau_B [Nm]$ : torque de entrada.

$\tau_F [Nm]$ : torque de salida.

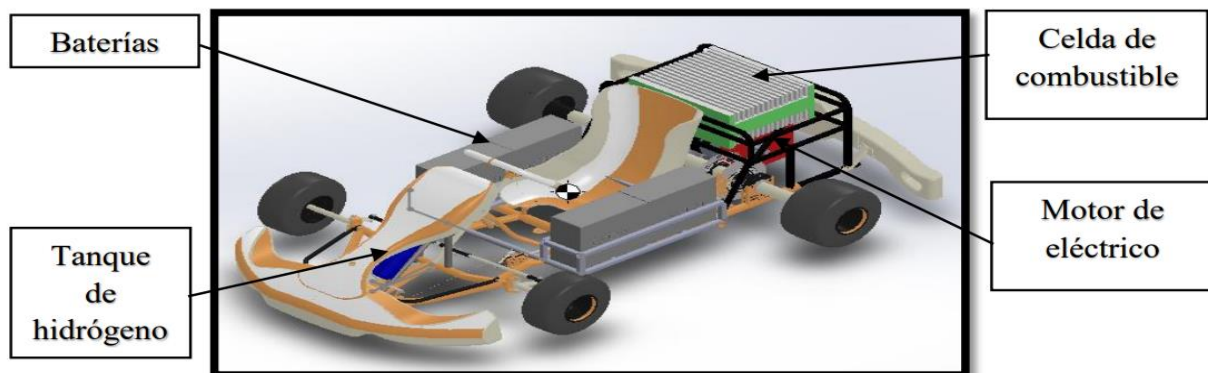
$\tau_{\text{loss}} [Nm]$ : pérdida de torque por fricción  $\tau_{\text{loss}} = 0$  debido a que es el caso ideal.

## 2.6 Selección y Modelado del Cuerpo del Vehículo

Se diseñó el cuerpo de un vehículo utilizando los parámetros de la tabla 2.2, los cuales se extrajeron de [21]. A continuación, se seleccionó la alternativa que pudiera resistir los esfuerzos, cargas y deformaciones requeridos, la cual se muestra en la siguiente figura:

**Figura 2.7**

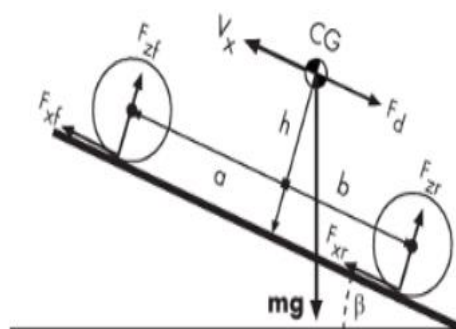
*Representación del Go-Kart escogido para el cuerpo del vehículo [27]*



Para el modelado del cuerpo del vehículo se utilizó el bloque “Vehicle Body”, cuya dinámica se basa en el siguiente diagrama:

**Figura 2.8**

*Diagrama de cuerpo libre del modelo del cuerpo del vehículo [28]*



**Tabla 2.4**

*Descripción de las variables del modelo del cuerpo del vehículo*

Símbolo	Descripción
$g$	Aceleración gravitacional.
$\beta$	Ángulo de inclinación.
$m$	Masa del vehículo.
$h$	Altura del centro de gravedad (CG) del vehículo sobre el suelo.
$a, b$	Distancia de los ejes delantero y trasero, respectivamente, desde el punto de proyección normal del CG del vehículo sobre el plano común del eje.
$Vx$	Velocidad del vehículo. Cuando $Vx > 0$ , el vehículo se mueve hacia adelante. Cuando $Vx < 0$ , el vehículo se mueve hacia atrás.
$Vw$	Velocidad del viento. Cuando $Vw > 0$ , el viento es de frente. Cuando $Vw < 0$ , el viento es de cola.
$n$	Número de ruedas en cada eje.
$Fxf, Fxrf$	Fuerzas longitudinales en cada rueda en los puntos de contacto delanteros y traseros con el suelo, respectivamente.
$Fzf, Fzrf$	Fuerzas normales en cada rueda en los puntos de contacto delanteros y traseros con el suelo, respectivamente.
$A$	Área frontal efectiva de la sección transversal del vehículo.
$Ca$	Coefficiente de arrastre aerodinámico.
$\rho$	Densidad de masa del aire.
$Fd$	Fuerza de arrastre aerodinámico.

*Nota. Datos tomados de [28].*



Entonces, dado lo anterior, el movimiento del vehículo se debe al efecto neto de las fuerzas y torques que actúan sobre él, donde las fuerzas longitudinales dependientes de las fuerzas normales permiten moverse gracias al peso del vehículo que actúa sobre su centro de gravedad. Se tiene además una fuerza de resistencia aerodinámica que desacelera el vehículo.[27]

La dinámica del vehículo se describe en las siguientes expresiones:

$$m\dot{V}_x = F_x - F_d - mg \cdot \sin \beta \quad (2.12)$$

$$F_x = n(F_{xf} + F_{xr}) \quad (2.13)$$

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A (V_x + V_w)^2 \cdot \text{sgn}(V_x + V_w) \quad (2.14)$$

$$F_{zf} = \frac{-h(F_d + mg \sin \beta + m\dot{V}_x) + b \cdot mg \cos \beta}{n(a+b)} \quad (2.15)$$

$$F_{zr} = \frac{+h(F_d + mg \sin \beta + m\dot{V}_x) + a \cdot mg \cos \beta}{n(a+b)} \quad (2.16)$$

$$F_{zf} + F_{zr} = mg \frac{\cos \beta}{n} \quad (2.17)$$

Resolviendo las ecuaciones anteriores se obtiene las representaciones gráficas de las salidas del bloque que se muestra en el “CAPÍTULO 3”.

## 2.7 Selección y Modelado de las Baterías

**Tabla 2.5**

*Parámetros de diseño de la batería*

<b>Parámetros de diseño</b>	<b>Valor</b>	<b>Magnitud</b>
<b>Eficiencia de conversión eléctrica-mecánica del motor</b>	0,93	-
<b>Eficiencia de transmisión motor-ruedas motrices</b>	0,90	-
<b>Voltaje nominal del motor eléctrico</b>	96,00	V
<b>Potencia nominal de tracción del motor</b>	16,00	kW
<b>Potencia eléctrica del motor</b>	17,20	kW
<b>Redondeo de potencia eléctrica del motor</b>	18,00	kW
<b>Potencia nominal de las celdas de combustible</b>	6,00	kW
<b>Potencia eléctrica del banco de baterías</b>	12,00	kW
<b>Tiempo de uso del banco de baterías promedio</b>	12,00	min
<b>Energía del banco de baterías</b>	2,40	kWh
<b>Energía del banco de baterías (DOD 80%)</b>	3,00	kWh
<b>Carga eléctrica de las baterías</b>	31,25	Ah
<b>Amperaje máximo del sistema de baterías</b>	179,21	A

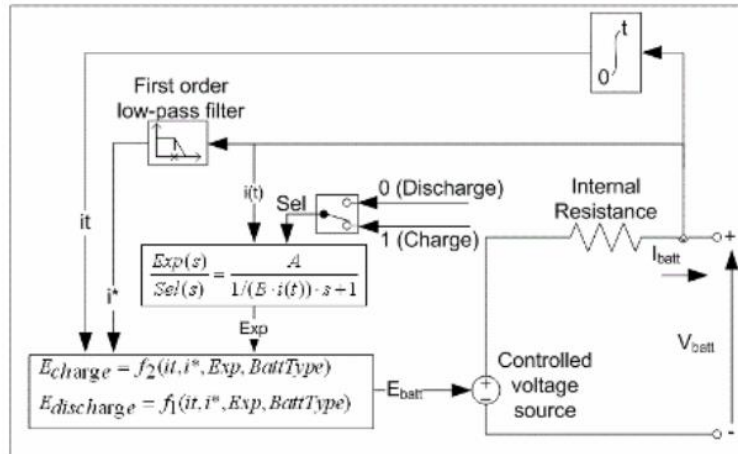
*Nota. Datos tomados de [21].*

De acuerdo con [21], se definen los criterios para seleccionar la batería (ver tabla 2.5). Tras analizar tres opciones de baterías en términos de precio, durabilidad en ciclos, peso, capacidad nominal excedida y protección contra sobrevoltajes, se elige la batería CX35 - 12V 35 Ah de ion de litio. Se conectarán ocho baterías en serie para lograr un voltaje final de 102.4 V y una capacidad total de 37.84 Ah.

Con base en los parámetros de diseño, se modela la batería utilizando el bloque "Battery" de Simulink. Este bloque representa un comportamiento dinámico genérico y toma como referencia el funcionamiento de los tipos más comunes de baterías recargables.

Figura 2.9

Modelo dinámico de la batería [29]



Su funcionamiento se basa en las siguientes ecuaciones matemáticas para carga y descarga de una batería de ion-litio:

- Modelo de descarga ( $i^* > 0$ )

$$f_1(i_t, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{Q - i_t} i^* - K \frac{Q}{Q - i_t} i_t + A \exp(-B i_t) \quad (2.18)$$

- Modelo de carga ( $i^* < 0$ )

$$f_2(i_t, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{i_t + 0.1Q} i^* - K \frac{Q}{Q - i_t} i_t + A \exp(-B i_t) \quad (2.19)$$

$E_0[V]$ : constante de voltaje.

$K \left[ \frac{V}{Ah} \text{ o } \Omega \right]$ : constante de polarización o resistencia de polarización.

$i^* [A]$ : corriente en baja frecuencia.

$i [A]$ : corriente de la batería.

$i_t [Ah]$ : capacidad de extracción.

$Q[Ah]$ : capacidad máxima de la batería.

$A [V]$ : voltaje exponencial.

$B [Ah^{-1}]$ : capacidad exponencial.[29]

Para el cálculo del estado de carga (SOC) se utiliza la siguiente expresión:

$$SOC = SOC_m - \frac{\int i(t)}{Q} \quad (2.20)$$

$i(t)$ : corriente de la batería.

SOC[%]: estado de carga.

$SOC_m$  [%]: estado de carga máximo.

$Q$ [As]: capacidad máxima de la batería.[29]

## 2.8 Selección y Modelado del Controlador del Motor

El controlador es responsable de decidir cuándo y cuánta energía debe suministrarse al motor para que este se ajuste a las necesidades del ciclo de manejo. Un aspecto clave al elegir el controlador es su capacidad para manejar corrientes en sentido negativo, lo que permite que las baterías se carguen durante el frenado. Esta funcionalidad es conocida como frenado regenerativo. Además de esta función regenerativa, el controlador también debe cumplir con los requerimientos de potencia tanto del motor como de las baterías.[21]

**Tabla 2.6**

*Características del controlador del motor*

Nombre	Controlador de Motor SIGMADRIVE
<b>Marca</b>	Electric Motors
<b>Modelo</b>	PMT835M
<b>Rango de voltaje de baterías (V)</b>	72 - 80
<b>Corriente de salida máxima (A)</b>	120 (tasa en 1 hora)
<b>Peso total (kg)</b>	5,3
<b>Asistente de potencia eléctrica (72 a 80V)</b>	
<b>Dimensiones (mm)</b>	225(L)*200(W)*56(H)
<b>Precio (\$)</b>	640

*Nota. Datos tomados de [21].*

De acuerdo con [21], por razones de compatibilidad, se elige el controlador proporcionado por el fabricante del motor previamente seleccionado. Las especificaciones de este controlador se detallan en la tabla 2.6. Dado que su atributo más importante es la capacidad de manejar potencia negativa, se representa en Simulink mediante un puente H y un controlador PWM.

Para simular la aceleración, se ingresó la señal al controlador PWM a través de un bloque de voltaje controlado. El controlador transformó esta señal de aceleración en una forma de onda PWM, la cual se conectó al Puerto PWM del puente H. Por otra parte, para simular la desaceleración, se utilizó la señal adecuada generada por el sistema de frenado. Esta señal se introdujo en el puerto BRK del puente H mediante un bloque de voltaje controlado.

El funcionamiento matemático del controlador PWM se rige por la siguiente ecuación:

$$DC = 100 * \frac{V_{ref} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \quad (2.21)$$

DC[%]: ciclo de trabajo

$V_{ref}$  [V]: voltaje de referencia por los puertos  $ref +$  y  $ref -$ .

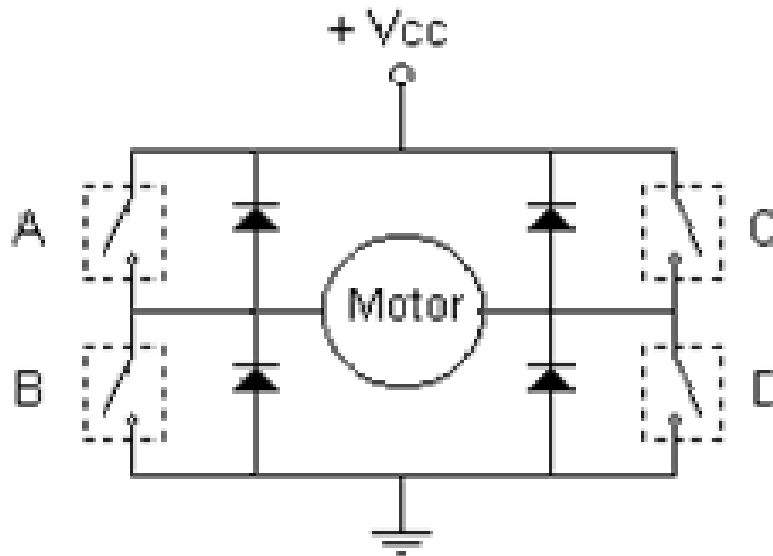
$V_{min}$  [V]: voltaje mínimo de referencia.

$V_{max}$  [V]: voltaje máximo de referencia.[30]

El puente H usa el siguiente circuito equivalente:

**Figura 2.10**

*Circuito equivalente para el puente H [31]*



Donde  $+V_{cc}$  corresponde al voltaje de entrada y los terminales del motor corresponden al voltaje de salida que se rige por la siguiente ecuación dado el modo de simulación Averaged y las suposiciones de carga:

$$M_{out} = \frac{V_o V_{pwm}}{A_{pwm}} - I_{OUT} R_{ON} \quad (2.22)$$

$V_o$  [V]: valor del parámetro de la amplitud de voltaje de salida

$V_{pwm}$  [V]: valor del voltaje del puerto PWM.

$A_{pwm}$  [V]: valor del parámetro de la amplitud de la señal PWM.

$I_{OUT}$  [A]: valor de la corriente de salida.

$R_{ON}$  [ $\Omega$ ]: valor del parámetro de la resistencia del puente de encendido.[31]

Cuando el voltaje que llega al puerto BRK es superior al voltaje de frenado del puente, el puente H entra en modo de frenado. En este modo, se agrega una configuración de dos resistencias conectadas en serie donde:

$R_1$  que es la resistencia de brazo individual correspondiente a la mitad del valor de  $R_{ON}$ .

$R_2$  que es la resistencia de brazo individual en paralelo con una resistencia de diodo  $R_d$ .

Su valor es:  $\frac{R_1 R_d}{R_1 + R_d}$ . [31]

## 2.9 Selección y Modelado del Convertidor DC/DC

Para que las fuentes de energía del vehículo reciban y envíen el voltaje de manera correcta al motor cumpliendo con el ciclo de manejo, se requiere de un convertidor DC/DC bidireccional.

**Tabla 2.7**

*Parámetros de diseño del convertidor*

Parámetros de diseño	Valor	Magnitud
Rango de tensión de salida y entrada	10-30	V
Potencia máxima de salida	2,2	kW
Corriente máxima de carga	25	A
Tensión máxima de entrada	30	V

*Nota. Datos tomados de [21].*

En el estudio detallado en [21], se definen los criterios para seleccionar los parámetros necesarios del convertidor DC/DC (ver tabla 2.7). De acuerdo con estos parámetros, se eligió el Buck-Boost DC to DC Converter 25 A de la marca Victron Energy. Esta elección se realizó luego de comparar tres convertidores en términos de precio, capacidad de programación, peso y consumo de potencia cuyo costo final es de \$600.

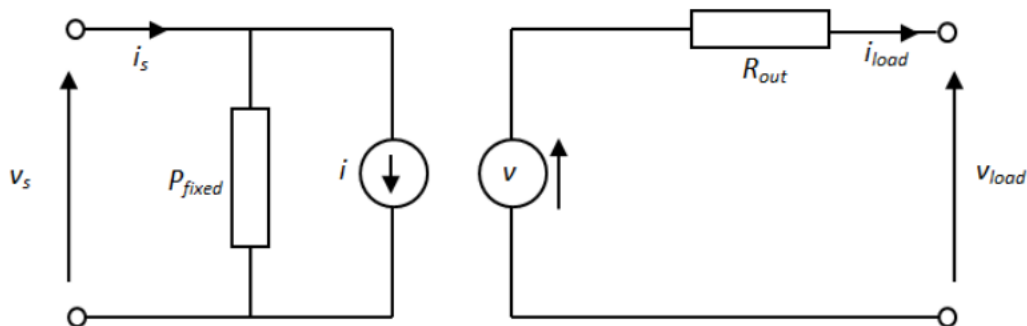
El convertidor debe ser capaz de ser bidireccional y permitir que el voltaje correcto sea distribuido por las fuentes de energía primaria y secundarias, por lo cual se modeló en Simulink un DC/DC Converter bidireccional, teniendo en cuenta los parámetros de diseño.

El bloque “DC/DC Converter” opera según un modelo de convertidor de potencia regenerativa, que ajusta el voltaje del lado de la carga para que sea compatible con las propiedades del lado de la fuente. Para simplificar el modelo, se asumió que las pérdidas son insignificantes.[32]

El circuito del comportamiento se describe a continuación:

**Figura 2.11**

*Circuito equivalente para el convertidor DC/DC [32]*



En el anterior circuito,  $P_{fixed}$  representa una constante de potencia consumida dada por el parámetro de pérdida del convertidor a una potencia de salida de cero.  $P_{fixed}$  está relacionada con las pérdidas independientes de la corriente de carga del convertidor. Por otro lado,  $R_{out}$  hace referencia a las pérdidas que están vinculadas al parámetro de eficiencia, expresado en porcentaje respecto a la potencia de salida nominal. Estas pérdidas aumentan a medida que la corriente de carga se incrementa.

La fuente de voltaje se define con la siguiente ecuación:



$$V = V_{ref} - i_{load}D + i_{load}R_{out} \quad (2.23)$$

$V_{ref}$  [V]: valor del voltaje de carga.

$D$ [V]: valor del voltaje de caída.

El valor de corriente  $i$  de la fuente se calcula de tal manera que la potencia de circulación interna sea igual a la externa más las pérdidas del convertidor.[32]

## 2.10 Selección y Modelado de la Celda de Combustible

La celda de combustible es la fuente secundaria de energía que posee el vehículo híbrido. Para su selección es crucial tener definida previamente a la batería (fuente principal), debido a que deben trabajar en paralelo. Con ello, se conoce que la celda deberá proporcionar máx. 6kW al momento que el banco de baterías sobrepase su potencia máxima, o no posea carga. Según [21], para alcanzar los vatios necesarios se hará uso de tres celdas Stack Horizon H-2000 (ver tabla 2.8), pues cada una cuenta con 2 kW. Con ello no solo se consigue la máxima potencia demanda, sino que también se puede realizar un control entre ellas, para emplear una, dos, o las tres a la vez.

**Tabla 2.8***Parámetros de la celda de combustible Stack Horizon H-200*

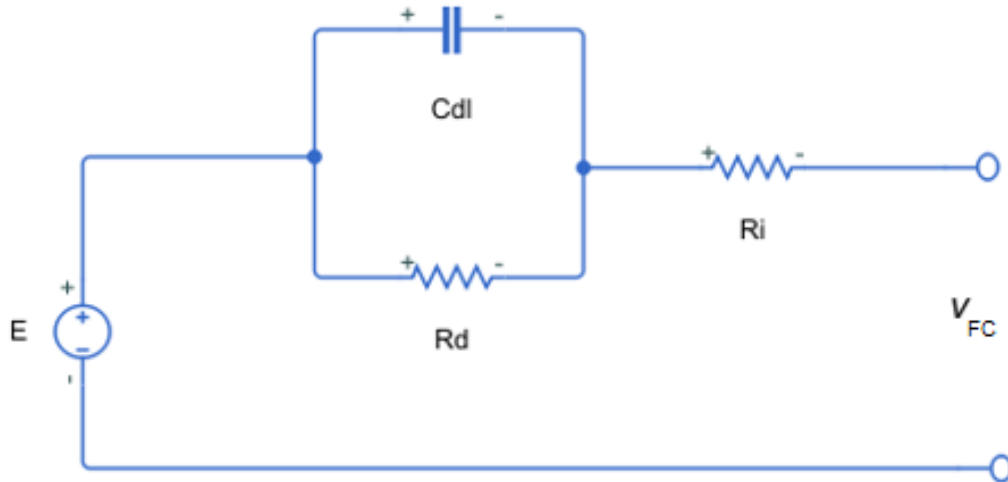
<b>Características</b>	<b>Valores</b>
<b>Tipo de celda</b>	PEMFC
<b>Número de celdas</b>	48
<b>Potencia nominal [W]</b>	2000
<b>Desempeño</b>	28,8V a 70A
<b>Voltaje de válvula H2 [V]</b>	12
<b>Voltaje de válvula de purga [V]</b>	12
<b>Voltaje de ventilador [V]</b>	12
<b>Reactivos</b>	Hidrógeno y Aire
<b>Temperatura externa [°C]</b>	5 a 30
<b>Máxima temperatura Stack [°C]</b>	65
<b>Presión H2 [bar]</b>	0,45 a 0,55
<b>Pureza de H2</b>	>= 99,995%
<b>Humidificación</b>	Auto humidificado
<b>Enfriamiento</b>	Ventilador (aire)
<b>Peso [kg]</b>	10
<b>Peso del controlador [kg]</b>	2,5
<b>Dimensiones [mm]</b>	303x350x183
<b>Flujo de máxima descarga [L/min]</b>	26
<b>Tiempo de encendido [s]</b>	<= 30 (temp. ambiente)
<b>Eficiencia Stack</b>	40% a 28,8 V
<b>Suministro de potencia externa</b>	13V, 5ª a 8ª
<b>Precio por unidad [\$]</b>	\$1000

*Nota. Datos tomados de [21].*

Este bloque cuenta con el siguiente circuito equivalente:

**Figura 2.12**

*Circuito equivalente para la celda de combustible [33]*



Donde:

$V_{FC}$ : voltaje de la celda.

$R_i$ : resistencia interna.

$R_d$ : suma de las resistencias de activación y concentración.

$C_{dl}$ : capacitancia paralela que aplica dinámica del tiempo a la celda.

Este bloque se puede configurar para usar una fidelidad simplificada del modelo, cuyas ecuaciones se presentan a continuación:

$$E = E_{oc} - N A \ln \left( \frac{i_{FC}}{i_o} \right) \quad (2.24)$$

$$v_{FC} = N_{unit} E - R_i i_{FC} - v_d \quad (2.25)$$

$$\frac{1}{R_d} \left( \tau \frac{dv_d}{dt} + v_d \right) = i_{FC} \quad (2.26)$$

$E_{oc}$ : voltaje de circuito abierto.

$N$ : número de celdas por módulo.

$i_{FC}$ : corriente generada por la celda de combustible.

$v_{FC}$ : voltaje generado por la celda de combustible.

$N_{unit}$ : número de unidades (en serie).

$v_d$ : voltaje que cae por la dinámica de la celda de combustible.

$A$ : pendiente de Tafel, en voltios.

$i_o$ : corriente de intercambio nominal.

## 2.11 Requerimientos Aerodinámicos

Para obtener resultados precisos en la aerodinámica del vehículo hay que establecer sus condiciones de operación y las especificaciones geométricas de los elementos más importantes, esta información se presenta en las siguientes tablas:

**Tabla 2.9**

*Condiciones de operación del vehículo*

Parámetros de diseño	Valores
Temperatura inicial	25 °C
Presión	1 atm
Conductividad Térmica (del Acero)	50 W/K.m
Coefficiente de Transferencia de Calor (del Aire)	18 W/K.m <sup>2</sup>
Velocidad del Viento	0,1 m/s
Densidad del Aire	1,29 kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de resistencia aerodinámica	0,2
Viscosidad Dinámica del Aire	17,894 μPa.s

*Nota. Viscosidad dinámica obtenida de ANSYS Resource Library [34].*

**Tabla 2.10***Especificaciones geométricas de los elementos del vehículo*

<b>Características</b>	<b>Valores</b>
<b>Área frontal del Vehículo</b>	0,629 m <sup>2</sup>
<b>Longitud Característica del Vehículo</b>	2 m
<b>Dimensiones de la Batería</b>	6,88 x 4,09 x 6,49 in
<b>Dimensiones de la Celda de Combustible</b>	30,3 x 35,0 x 18,3 cm
<b>Dimensiones del Motor</b>	L = 139,6, D = 194 cm

Estos valores serán usados para calcular el número de Reynolds del aire cuando el vehículo lo esté atravesando, de modo que se conozca si este fluido va a actuar como laminar, turbulento, o en transición.

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot L}{\mu} \quad (2.27)$$

$v[m/s]$ : velocidad relativa del vehículo con respecto al viento.

$\rho[kg/m^3]$ : densidad del aire.

$L[m]$ : longitud característica del vehículo.

$\mu[kg/m \cdot s]$ : viscosidad dinámica del aire.

En un aspecto similar, es necesario calcular la fuerza de arrastre del vehículo, que corresponde a esa resistencia que siente el cuerpo al atravesar un fluido, en este caso, el aire.

$$Fa = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 \quad (2.28)$$

$v[m/s]$ : velocidad relativa del vehículo con respecto al viento.

$A[m^2]$ : área frontal del vehículo.

$C_d$ : coeficiente de arrastre del vehículo.

## 2.12 Requerimientos Térmicos

Para un aspecto térmico se va a obtener la disipación térmica de los principales elementos del vehículo, los cuales son las 2 fuentes de energía (baterías y celdas de combustible) y el motor.

Se vuelve a hacer uso de las tablas 2.9 y 2.10, así como las ecuaciones de transferencia de calor por conducción (2.29) y por convección (2.30).

$$q_k = k \cdot \frac{A}{D} (T_A - T_B) \quad (2.29)$$

$$q_c = h \cdot A (T_A - T_B) \quad (2.30)$$

$q_k [W]$ : Tasa de flujo de calor por conducción.

$q_c [W]$ : Tasa de transferencia de calor por convección.

$k [W/(K \cdot m)]$ : conductividad térmica del material.

$h [W/(K \cdot m^2)]$ : coeficiente de transferencia de calor por convección.

$A [m^2]$ : área superficial.

$D [m]$ : espesor del material.

$T_A$  y  $T_B [K]$ : temperaturas entre los cuerpos.

## 2.13 Sistema de Gestión y Control Energético

### 2.13.1 Función de Costo

La estrategia de control energética basada en RL tiene como objetivo la optimización de la potencia de las fuentes energéticas del FCPHEV. Esto requiere de una función de costo para evaluar la recompensa la cual se obtiene de la investigación de Han, J., Park, Y., y Kum, D [35].

$$g_{ECMS} = m_{H_2} \cdot LHV_{H_2} + s \cdot (P_{BT} + P_{BT \cdot loss}) \quad (2.31)$$

$$g_{ECMS} = (s\mu_3 + \mu_2) \cdot P_{FC \cdot req}^2 + (\mu_1 - 2s\mu_3 P_{dem} - s) \cdot P_{FC \cdot req} + (sP_{dem} + s\mu_3 P_{dem}^2) \quad (2.32)$$

$$\mu_1 = \frac{N_{FC} \cdot M_{H_2} \cdot LHV_{H_2}}{n_e \cdot F \cdot V_{FC \cdot OC}}, \quad \mu_2 = \frac{N_{FC} \cdot M_{H_2} \cdot LHV_{H_2} \cdot R_{FC}}{n_e \cdot F \cdot V_{FC \cdot OC}^3}, \quad \mu_3 = \frac{R_{BT}}{V_{BT \cdot OC}^2} \quad (2.33)$$

$m_{H_2}$  [kg]: masa gastada de hidrógeno gaseoso

$LHV_{H_2}$   $\left[\frac{J}{kg}\right]$ : poder calorífico inferior del hidrógeno gaseoso

$s$  [-]: valor ponderado de costo de la energía y utilización de la batería

$P_{BT}$  [W]: potencia de la batería

$P_{BT \cdot loss}$  [W]: potencia de la batería pérdida con las pérdidas por resistencia

$P_{dem}$  [W]: potencia demanda por el ciclo de conducción

$P_{FC \cdot req}$  [W]: potencia demandada que cubre la celda de combustible

$N_{FC}$  [-]: número de celdas totales

$M_{H_2}$   $\left[\frac{kg}{mol}\right]$ : masa molar del hidrógeno gaseoso

$n_e$  [-]: número de electrones del hidrógeno gaseoso

$F$   $\left[\frac{C}{mol}\right]$ : constante de Faraday

$V_{FC \cdot OC}$  [V]: voltaje nominal de la celda de combustible

$R_{BT}$  [ $\Omega$ ]: resistencia interna de la batería

$R_{FC}$  [ $\Omega$ ]: resistencia total de la celda de combustible en la región de pérdida óhmica de la curva de polarización

$V_{BT \cdot OC}$  [V]: voltaje de circuito abierto de la batería

### 2.13.2 Selección del Método para Actualizar las Recompensas

Dada la naturaleza del problema, se escogen 5 criterios de selección y 3 algoritmos de diferencias temporales para RL:

- **Convergencia:** capacidad de un algoritmo para alcanzar una política óptima estable dentro de un número razonable de eventos o pasos de tiempo.
- **Eficiencia computacional:** capacidad de un algoritmo para manejar de manera eficiente el procesamiento de datos y el uso de los recursos informáticos.

- **Estabilidad y robustez:** capacidad de un algoritmo para mantener un rendimiento constante y resistir las perturbaciones ambientales o los cambios en los parámetros del problema.
- **Equilibrio de exploración/explotación:** capacidad de un algoritmo para encontrar un equilibrio entre explorar el entorno para descubrir nuevas acciones y explotar el conocimiento adquirido para maximizar la recompensa.
- **Aplicabilidad y casos de uso:** capacidad del algoritmo para adaptarse y resolver de manera efectiva varios problemas en distintos entornos, y su historial de éxito en casos similares.

**Tabla 2.11**

*Matriz de decisión del algoritmo de RL*

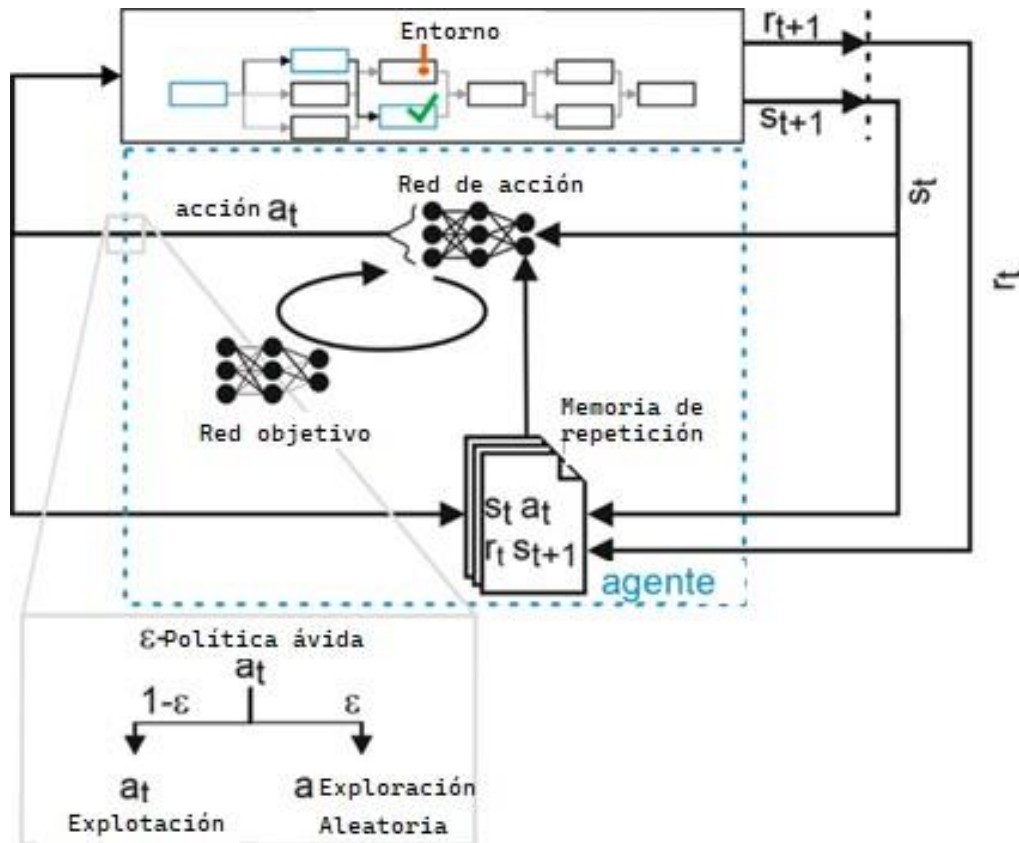
Criterio	Peso	Alternativas					
		Sarsa		Deep Q- Network		Expected Sarsa	
		Nota /10	Valor /10	Nota /10	Valor /10	Nota /10	Valor /10
<b>Convergencia</b>	30%	8,00	2,40	10,00	3,00	9,00	2,70
<b>Eficiencia computacional</b>	20%	7,00	1,40	9,00	1,80	7,00	1,40
<b>Estabilidad y robustez</b>	20%	8,00	1,60	8,00	1,60	8,00	1,60
<b>Equilibrio de exploración/explotación</b>	15%	7,00	1,05	8,00	1,20	7,00	1,05
<b>Aplicabilidad y casos de uso</b>	15%	8,00	1,20	9,00	1,35	9,00	1,35
<b>Total</b>	100%		7,65		8,95		8,10

Finalmente, se escoge la opción de Deep Q Network (DQN) cuya calificación fue de 8,95 y cuya metodología específica de interacción se describe en la siguiente imagen:



Figura 2.13

Metodología de interacción para una DQN [36]



### 2.13.3 Algoritmo para DQN

$$q_*(s, a) = \mathbb{E}[R_{t+1} + \gamma \max_{a'} q_*(S_{t+1}, a') \mid S_t = s, A_t = a] \quad (2.34)$$

La ecuación 2.34 muestra la solución óptima para espacios de acción-valor que contienen un número reducido de elementos. No obstante, para aplicaciones con mayor cantidad de elementos y dimensiones, es necesario agregar un parámetro  $\theta$  que representa la definición de los valores  $Q$  (potencia de la batería), lo cual se representa a continuación:

$$q_*(s, a; \theta_k) = \mathbb{E}[R_{t+1} + \gamma \max_{a'} q_*(S_{t+1}, a'; \theta_k) \mid S_t = s, A_t = a] \quad (2.35)$$

Para la actualización en cada iteración del valor  $Q$  con un valor objetivo  $y_k$  se utiliza la siguiente expresión:

$$y_k = r + \gamma \max_{a'} Q(s', a'; \theta_k) \quad (2.36)$$

Este nuevo parámetro es actualizado en la red neuronal profunda donde, mediante el gradiente descendente, se obtiene la salida de los valores  $Q$  para cada par estado-acción con respecto a la entrada de los estados. A continuación, se presenta la ecuación para la actualización de  $\theta_k$ :

$$L = (Q(s, a; \theta_k) - y_k)^2 \quad (2.37)$$

Luego, para iterar los valores de  $\theta_t$  para la siguiente iteración se aplica:

$$\theta_{t+1} = \theta_t + \gamma(Q_t - Q(s, a; \theta_t)) \nabla_{\theta_t} Q(s, a; \theta_t) \quad (2.38)$$

Además, Deep Q-Network usa una red objetivo con los parámetros  $\theta^-_k$  que se actualizan con cada  $\theta_k$  previniendo divergencias e inestabilidades de los valores  $Q$  aprendidos. Lo cual se muestra a continuación:

$$y_k = r + \gamma \max_{a'} Q(s', a'; \theta^-_k) \quad (2.39)$$

El algoritmo de operación para el sistema de gestión energético usando DQN se muestra a continuación:

- **Entrada:** Estados observados (Potencia demandada y de las celdas)
- **Salida:** Valores óptimos  $Q$  de acción-valor (Potencia de la batería actual) que determinan la política para ejecutar la acción.
- Inicializar la red  $Q$  con valores aleatorios de  $\theta$

- Inicializar la red  $Q$  objetivo con  $\theta^- = \theta$

Según lo mencionado, se destaca la principal diferencia de esta aplicación con respecto a otras que usan el mismo algoritmo para sistemas de gestión y control. En este caso, el agente de control recibe entrenamiento considerando una función de recompensa que está vinculada a cuán bien se desempeña el agente en relación con las potencias generadas por las celdas de combustible y la potencia requerida por el ciclo de manejo.

Por cada iteración:

Siguiendo  $\epsilon$ -greedy policy, se elige la acción:

$$a_t = \begin{cases} \text{Accion random del pot\_bat; con probabilidad } \epsilon \\ \text{argmax}_a x_a Q(s_t, a; \theta); \text{ de lo contrario} \end{cases}$$

Ejecutar la acción y observar el estado junto con la recompensa siguiente:

$$y_k = \begin{cases} r_k; \text{ si alcanza el estado terminal} \\ r_k + \gamma \max_{a'} Q(s_{k+1}, a'; \theta^-); \text{ de lo contrario} \end{cases}$$

Ejecutar el paso de gradiente descendente  $(y_k - Q(s_k, a_k; \theta))^2$  con respecto a los parámetros de la red  $Q$ .

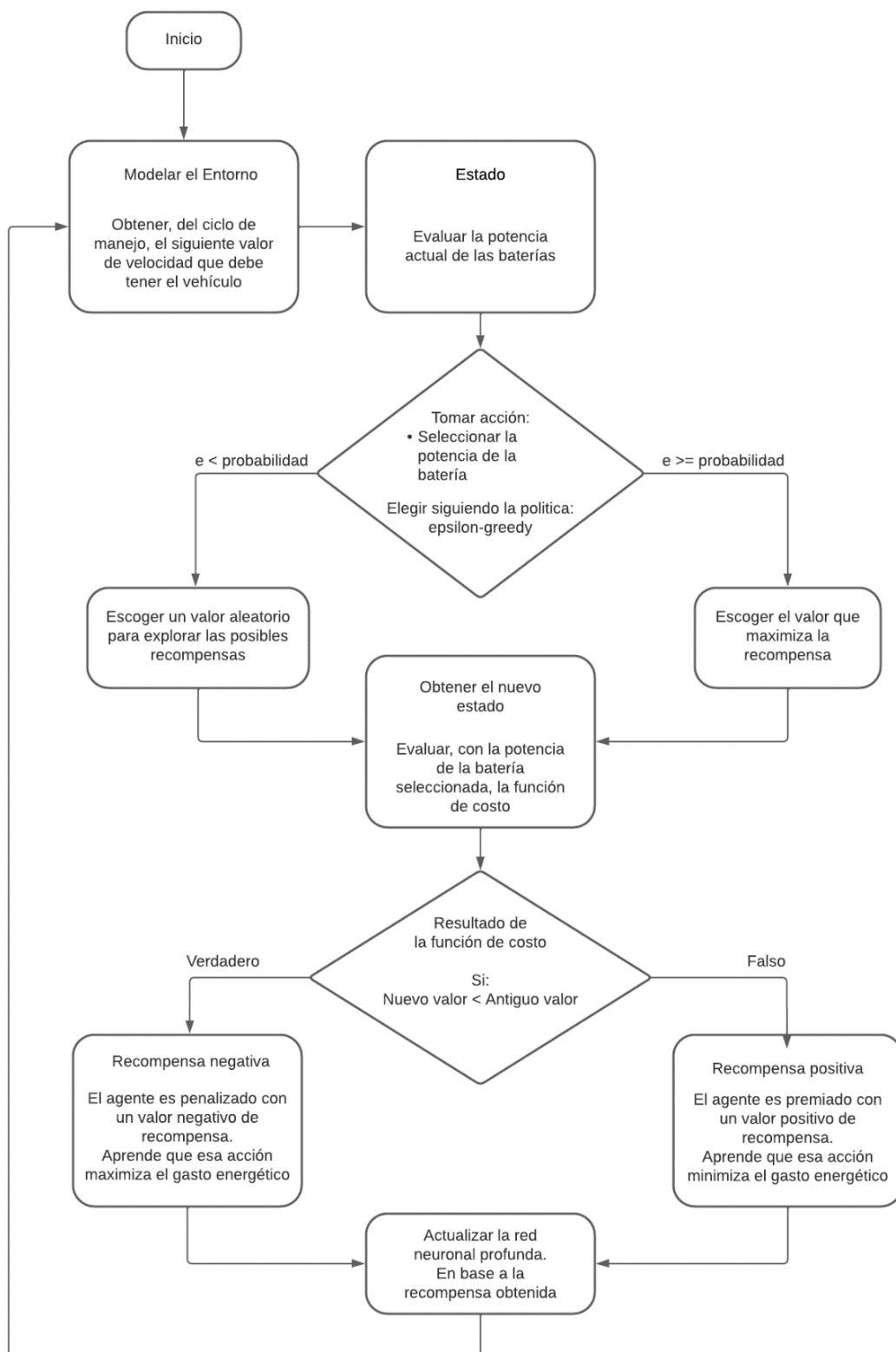
Definir:  $\theta^- = \theta$  en todos los pasos.

#### 2.13.4 Modelado para DQN

A continuación, se describe el diagrama de flujo para la problemática utilizando el algoritmo descrito:

Figura 2.14

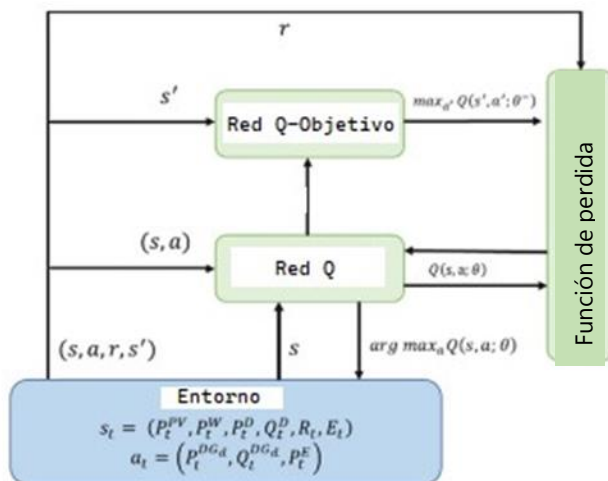
Diagrama de flujo de DQN



Ahora, se describe la arquitectura de la DQN para la problemática utilizando el algoritmo descrito:

**Figura 2.15**

*Arquitectura de DQN*



En la figura 2.15 se muestra el modelado del agente DQN para la problemática descrita, donde la recompensa se mide con la función de costo descrita en la ecuación 2.31, la señal del observador es la potencia de la batería actual y la potencia de la batería anterior.

## **CAPÍTULO 3**

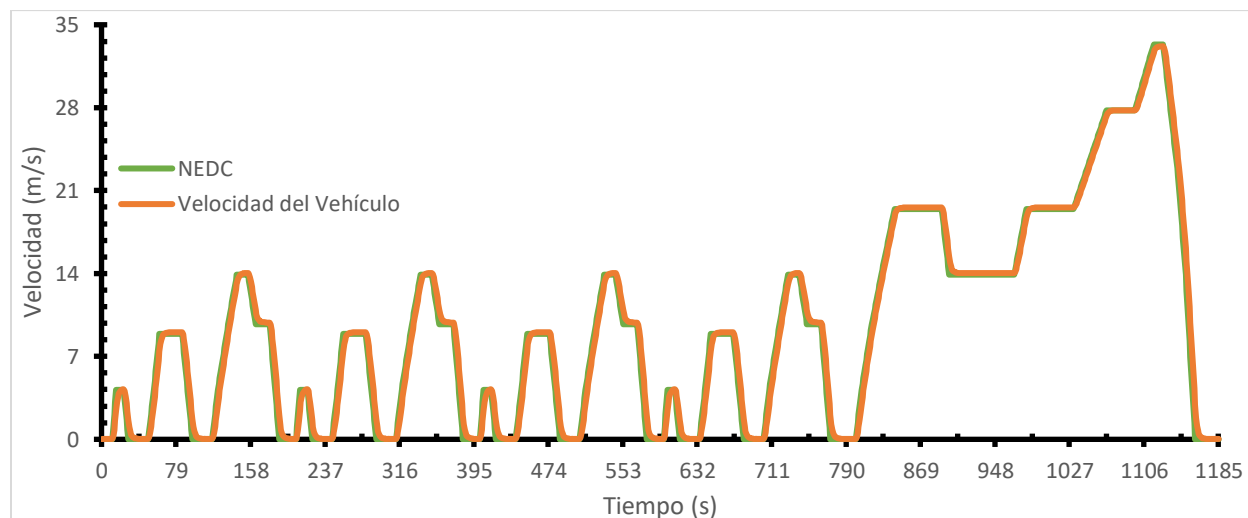
### 3.1 Resultados y Análisis

En esta sección se exhiben los resultados de las simulaciones del modelo del vehículo con cada EMS (ADVISOR, DP y RL). Primero, se evalúan con el ciclo de manejo NEDC, lo que permite realizar los análisis de las potencias generadas por la batería y las celdas de combustible, así como también comparar los SOC y consumos de hidrógeno. Además, con el mismo ciclo se presenta y describe la curva del entrenamiento con RL. Por otro lado, también se analizan los aspectos mecánicos (torques y fuerzas normales), aerodinámicos y térmicos del EMS. Luego, se utiliza el ciclo de manejo DMQ para comparar únicamente a DP con RL donde se analizan tanto el SOC como el consumo de  $H_2$ . Con todos los resultados previamente descritos se realiza el análisis del tiempo de vida útil y costos del vehículo abarcando la obtención de los ciclos de carga/descarga de la batería, costos individuales de los componentes y, finalmente, la comparación de los costos por ciclos de la batería con el costo del combustible. De este modo, se obtienen los costos totales del tiempo de vida del vehículo para cada EMS (detallado en la tabla 3.3) y así se resalta cuál EMS tiene la mayor rentabilidad con respecto a los otros dos.

### 3.1.1 Comparativa entre el Ciclo de Manejo Real y el Modelado

**Figura 3.1**

*Comparativa entre la velocidad del ciclo de manejo real y la generada por el modelo*



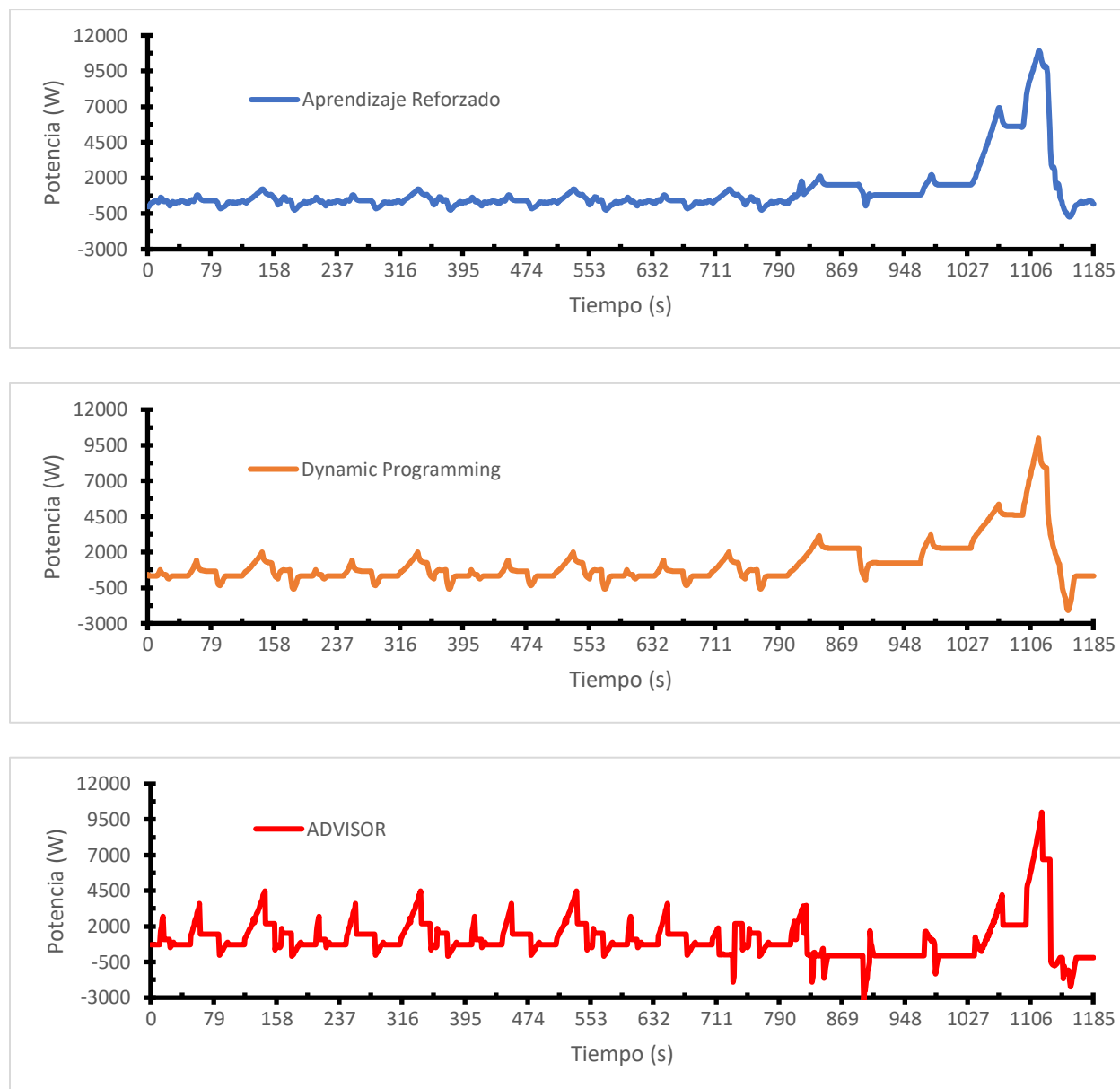
La figura 3.1 ilustra dos gráficos que representan el ciclo de manejo real y el ciclo de manejo simulado por el modelo completo del vehículo. Es evidente que, en cada punto temporal, la curva generada por el modelo (velocidad del vehículo) sigue de cerca a la curva del NEDC. Esto respalda la validez del modelo del FCPHEV.



### 3.1.2 Potencia Generada por la Batería para Cumplir el NEDC

**Figura 3.2**

*Potencia generada de la batería según ADVISOR, DP y RL*



La potencia de la batería refleja las características principales del NEDC, sus cambios de velocidad y valores constantes hacen que los tres EMS tengan un parecido notable en la región urbana del ciclo ( $t < 780$  s). No obstante, en la región extraurbana ( $t > 780$  s) se aprecian las

diferencias ya que en ésta existe la mayor demanda de potencia y cada sistema de gestión energética cuenta con sus propias estrategias, lo que cambia drásticamente la potencia entregada. No obstante, un patrón que siguen todos sin excepción, es que alcanzan una potencia máxima cercana a los 10000 W en el momento que el NEDC demanda mayor velocidad ( $t = 1100$  s).

La gráfica del EMS con ADVISOR alcanza potencias negativas de 60 W a 2200 W, sobre todo en la región extraurbana, porque la demanda de potencia del ciclo hace que se activen las celdas de combustible y se aporta energía al vehículo y a la batería. Sin embargo, los excesivos aumentos de velocidad vuelven a elevar la potencia de demanda de la batería por picos. Además, tras empezar a frenar luego de alcanzar la máxima velocidad ( $t > 1100$  s), la batería se vuelve a recargar no solo por las celdas de combustible, sino que el efecto del frenado regenerativo se vuelve más apreciable.

Por otro lado, con DP la potencia de la batería es menor que sus valores correspondientes con ADVISOR en la región urbana del ciclo (cerca de la mitad), aunque esto deja de cumplirse en el momento que se alcanza la región extraurbana. Aquello se debe a que DP busca mantener el SOC lo más estable posible con ayuda de la energía que aporten las celdas de combustible. El máximo valor de potencia que alcanza son los 9988 W a los 1116 s, tras lo cual, se presenta una reducción de velocidad en el ciclo de manejo que continua hasta detener el vehículo, lo que ocasiona que el efecto del frenado regenerativo se vuelve más notorio y, por esta razón, se obtienen nuevamente potencias negativas con rangos de 120 W a 2000 W.

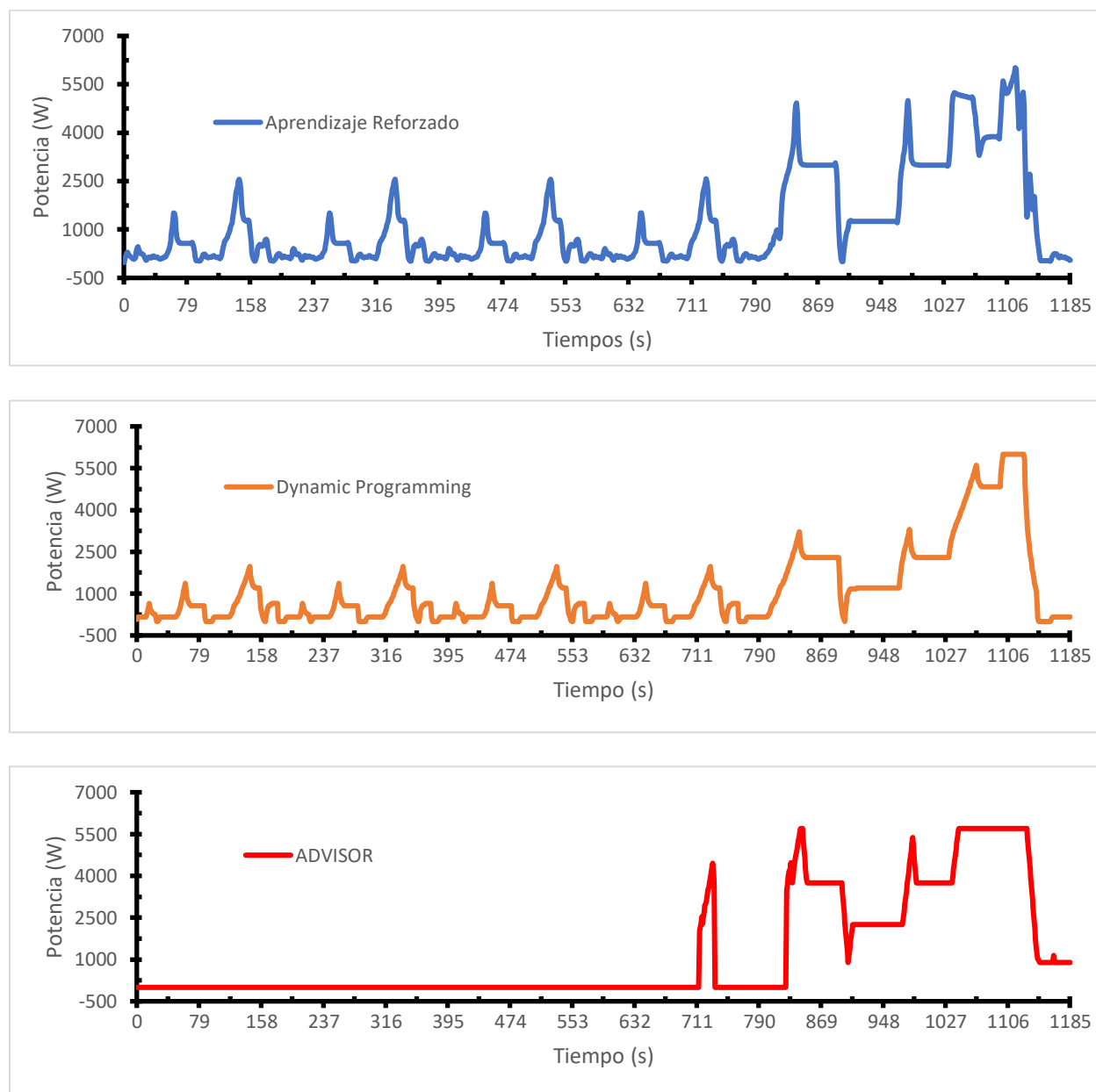
Finalmente, con RL se tiene la menor potencia de la batería, con valores 3 veces menores que con ADVISOR y 1,5 veces menores que con DP, abarcando únicamente la región urbana del ciclo. En la región extraurbana, su pico de potencia es 10912 W en los 1117 s, tras lo cual el

frenado regenerativo vuelve a incrementar su efecto, aunque con valores de potencia negativa ligeramente inferiores, pues corresponden a los rangos de 35 W a 740 W.

### 3.1.3 Potencia Generada por el FCP para Cumplir el NEDC

**Figura 3.3**

*Potencia generada de la batería según ADVISOR, DP y RL*



La potencia del Fuel Cell Pack (FCP) tiene características muy especiales entre los sistemas de gestión energéticos, la más notoria es ADVISOR, que tiene potencia cero (no usa la celda de combustible) hasta estar cerca de la región extraurbana del ciclo, lo que explicaría por qué la potencia de la batería es tan elevada en la región urbana, pues es sostenida en su totalidad por la batería. Esto se debe a que ADVISOR no activa las celdas hasta que el SOC de la batería se vea reducido en un 10%, lo cual ocurre en los segundos 711 y 825 respectivamente. Además, en los últimos 30 s del ciclo, en el que el carro ya se encuentra estacionado, se observa como la potencia de la celda de combustible se estabiliza casi en los 1000 W, de este modo, ADVISOR emplea las celdas para recargar la batería mientras el vehículo está estacionado.

Por otra parte, el código DP y el RL sí usan la celda de combustible desde la región urbana y con este aporte energético la potencia de la batería disminuye. En el caso de DP, la potencia de las celdas tiene valores similares a los de la batería, es decir, sus primeros picos son similares (700 W en  $t = 18$  s, 1400 W en  $t = 64$  s y 2000 W en  $t = 145$  s), indicando que se busca mantener el SOC con la mayor estabilidad posible (en la región urbana) usando ambas fuentes de energía. Pero al llegar a la región extraurbana se tienen los valores pico de la potencia de la celda, incluso alcanzando el límite de los 6000 W al momento de máxima velocidad. Además, cuando el vehículo llega el final del ciclo, su potencia es cero, y por ende ya ha dejado de consumir combustible.

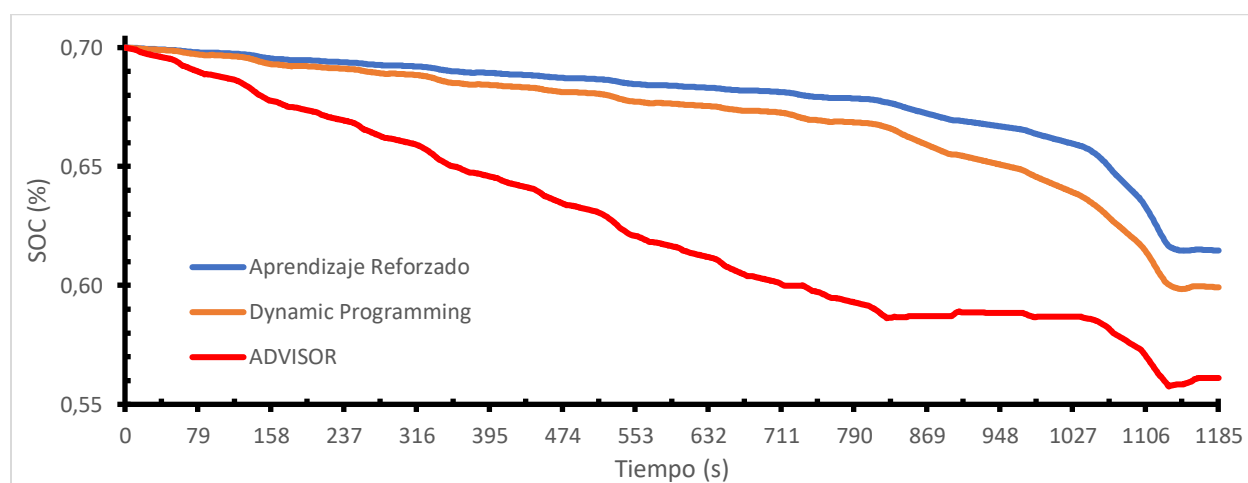
Finalmente, al comparar la curva de potencia de RL con DP se observa que, en la región urbana, sus valores picos son más elevados, alrededor de +500 W en los cuatro picos ( $t = 145$  s, 340 s, 536 s, 730 s), indicando así que RL emplea más potencia del Paquete de Celdas de Combustible (FCP) que DP en casi todo el ciclo, incluyendo el primer pico de la región extraurbana. En los dos últimos acelerones de los 1030 y 1100 s, las celdas apenas alcanzan el límite de los 6000 W, corresponde con el sector con mayor potencia de la batería, o sea, que RL

busca aprovechar la potencia del FCP todo lo posible durante el ciclo de manejo, excepto cuando la demanda de velocidad alcance los 20 m/s (correspondiente a la región extraurbana), pues ante este suceso el EMS empleará más potencia de la batería.

### 3.1.4 Comparativa entre el SOC de los EMS

**Figura 3.4**

*Curvas de SOC*



El SOC de la batería es uno de los principales aspectos que prioriza un conductor, ya que le permite asumir rápidamente cual será el tiempo de vida útil que pueda llegar a tener con el vehículo. Las diferencias entre los EMS son bastante notables, como ya se mencionó, RL prioriza el uso del FCP sobre la batería en casi todo el ciclo, razón por la cual el SOC mantiene una alta estabilidad. Sin embargo, al llegar a los picos de velocidad ( $1030 \text{ s} > t > 1100 \text{ s}$ ), el SOC desciende rápidamente desde 66% a 62% esto debido a que la demanda del ciclo es tan alta que se prioriza el uso de la batería. En la figura 3.4 se aprecia que esta caída tiene una pendiente mayor que las otras dos, pero, aun así, el SOC al final ciclo es cercano al 61,5%, el valor más elevado de los tres EMS.

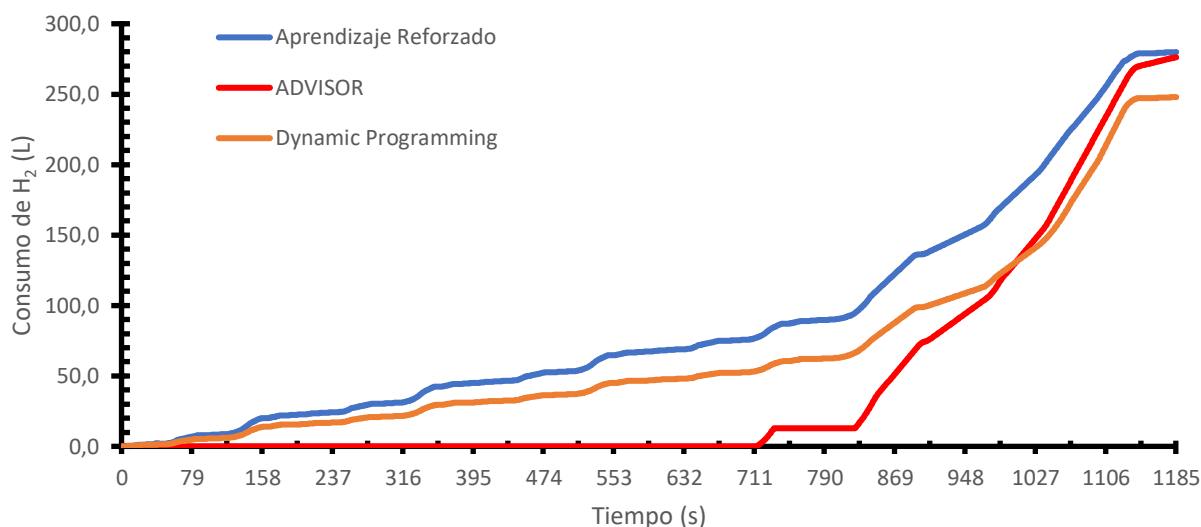
Con ADVISOR se aprecia cómo el uso único de la batería en la región urbana afecta mucho al SOC, pues al no usar celdas de combustible su porcentaje disminuye de 70 % a 60 % con una pendiente casi constante. Como ya se describió previamente, esta reducción se alcanza a los 711 s, momento en que el EMS activa las celdas por 24 s, haciendo que el SOC se mantenga constante. Sin embargo, la demanda del ciclo disminuye el porcentaje de la batería hasta 58,6% a los 825 s, haciendo que se activen nuevamente las celdas de combustible, y de nuevo el SOC se mantiene casi constante, al menos hasta el primer pico de velocidad ( $t = 1030$  s). Con el último acelerón ( $t = 1100$  s) el SOC desciende hasta el 55,75% y debido al frenado regenerativo, más notorio de los 1130 s a los 1160 s, se tiene un pequeño aumento hasta el 56%.

Finalmente, con DP se tiene una gráfica media entre las dos anteriores. Claramente DP mantiene un mayor SOC que el de ADVISOR debido a su optimización en el uso de las fuentes, obteniendo así un valor de 60% cuando termina las demandas de velocidad del ciclo. No obstante, el frenado regenerativo, correspondiente al último tramo, tiene un aporte casi nulo en la recarga de la batería por lo que se mantiene el mismo valor de SOC.

### 3.1.5 Comparativa entre el Consumo de Hidrógeno de los EMS

**Figura 3.5**

*Curvas de consumo de hidrogeno*



El consumo del hidrógeno se refleja altamente en el uso de las celdas de combustible, lo que a su vez se vincula con la potencia del FCP, pues con más hidrógeno consumido, más potencia se obtiene de las celdas. Esto se aprecia fácilmente con ADVISOR, pues no usa las celdas y, por tanto, no hay consumo durante los primeros 711 s, como desde los 735 s hasta los 825 s, lo que corresponde con la potencia de las celdas para este mismo EMS. Luego, al llegar a la región extraurbana su consumo aumenta, la potencia del FCP apoya a la batería y la acumulación progresiva de todos estos consumos de hidrógeno (incluso mientras el vehículo está detenido luego de los 1130 s) hace que al final se gasten cerca de 275 L de H<sub>2</sub>.

Con DP la potencia del FCP se usa a la vez que la batería, haciendo que se consuma hidrógeno desde el inicio y por tanto la gráfica aumenta con el tiempo y hasta llegar a la región extraurbana. En este punto, el consumo de hidrógeno es más elevado pues la potencia de la celda de combustible aumenta hasta alcanzar el límite de los 6000 W en la máxima velocidad (t = 1100

s) y así continua hasta que el vehículo se detiene ( $t = 1130$  s), momento a partir del cual el consumo se mantiene sin cambios, pues ambas fuentes del vehículo ya no son usadas, obteniéndose como resultado final 247,5 L de  $H_2$  consumidos.

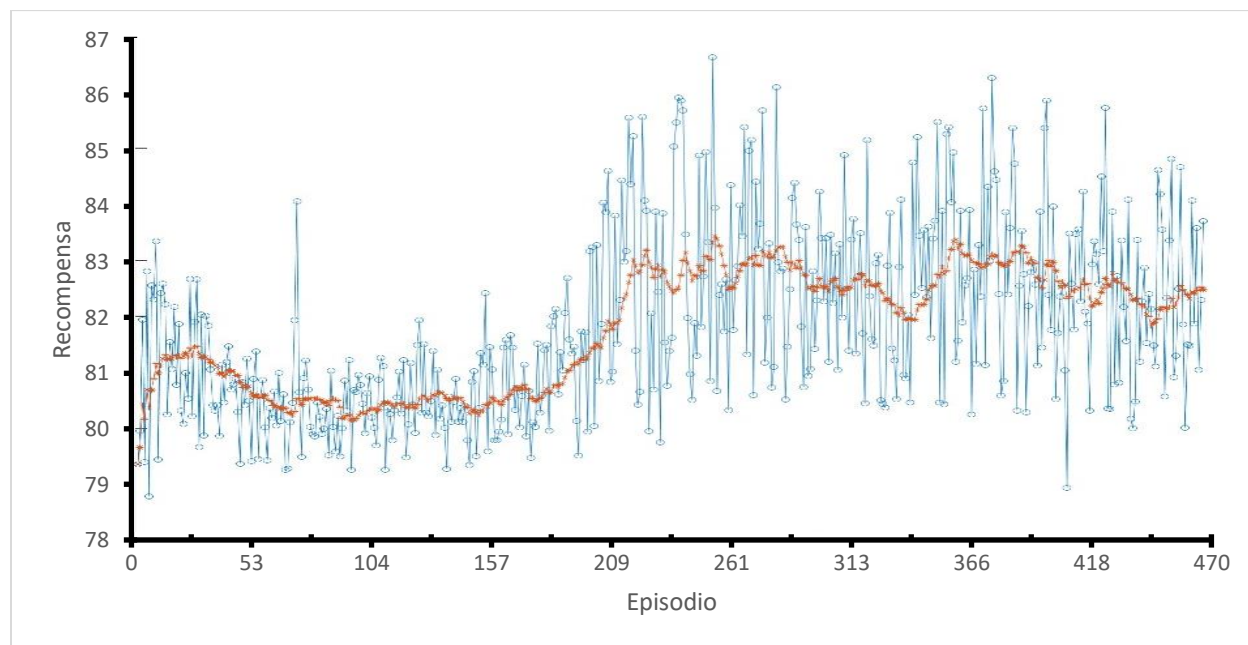
De una forma similar se analiza la gráfica correspondiente a RL. Como las celdas son usadas desde un inicio, su valor también incrementa poco a poco. Sin embargo, se sabe que en la región urbana con RL se aprovecha más el FCP haciendo que la gráfica se eleve con mayor rapidez al compararla con DP, al menos hasta llegar a la región extraurbana. Al realizar los dos últimos acelerones del ciclo ( $t = 1030$  s y  $t = 1100$  s) el consumo no aumenta con la misma tendencia que ya tenía antes, porque RL prioriza el uso de la batería en las celdas, por lo que las gráficas de RL y DP comienzan a aproximarse. Con esto, el consumo de  $H_2$  se detiene a los 280 L, un valor semejante al de ADVISOR. Por tanto, con RL el sistema aprende que es mejor usar las celdas que la batería, al menos durante la región urbana, y si bien esto implica un gasto adicional por hidrógeno, permite un mayor número de ciclos de vida para la batería, como se analiza después.



### 3.1.6 Curva de Recompensa para el Entrenamiento de RL

**Figura 3.6**

*Curva de entrenamiento*



RL se centra en maximizar las recompensas obtenidas. Este enfoque cobra particular relevancia cuando se emplea el algoritmo DQN, donde las recompensas están estrechamente relacionadas con los parámetros que actualizan la red neuronal profunda, además de su vinculación a la función de recompensa representada en la ecuación 2.31.

La figura 3.6 proporciona una perspectiva de cómo la recompensa evoluciona a lo largo de todo el entrenamiento de 470 episodios, es decir, las 470 veces que el agente repitió el ciclo de manejo hasta aprender qué valores de potencia de la batería minimizan la función de costo (2.33). En la gráfica, los círculos azules son la recompensa obtenida de cada episodio, mientras que las cruces naranjas indican la recompensa promedio, siendo esta última el principal indicativo del aprendizaje del agente.

En los primeros 25 episodios, es evidente que la recompensa aumenta. Esto se debe a que el modelo se encuentra en una fase inicial de exploración. En esta etapa, el sistema está descubriendo nuevos estados (valores de potencia demanda del vehículo y de las celdas de combustible) y acciones (valores de potencia de la batería), influenciados por el parámetro  $\epsilon$  que cuantifica el grado de exploración y los resultados generados por la función de recompensa. Es decir, se está consiguiendo los primeros valores que minimizan la función de costo, de ahí que su valor promedio de aprendizaje se eleva rápidamente.

Posteriormente, después de superar la fase exploratoria inicial (episodio 25), se evidencia que la recompensa empieza a disminuir. Esto ocurre porque el modelo sigue explorando diferentes valores, pero sin llegar a un valor óptimo de recompensa que refleje un rendimiento ideal en términos de consumo de combustible y estado de carga, como lo describe la función de recompensa, por lo que la curva naranja va decayendo.

No obstante, en el episodio 76 se consigue minimizar la función de costo con un valor elevado por lo que la recompensa obtenida es de 84, siendo que sus valores adyacentes rodean al 81. Desde este episodio hasta el 175 se tiene una región casi constante para la curva naranja, indicando que el agente se ha estancado momentáneamente en su aprendizaje.

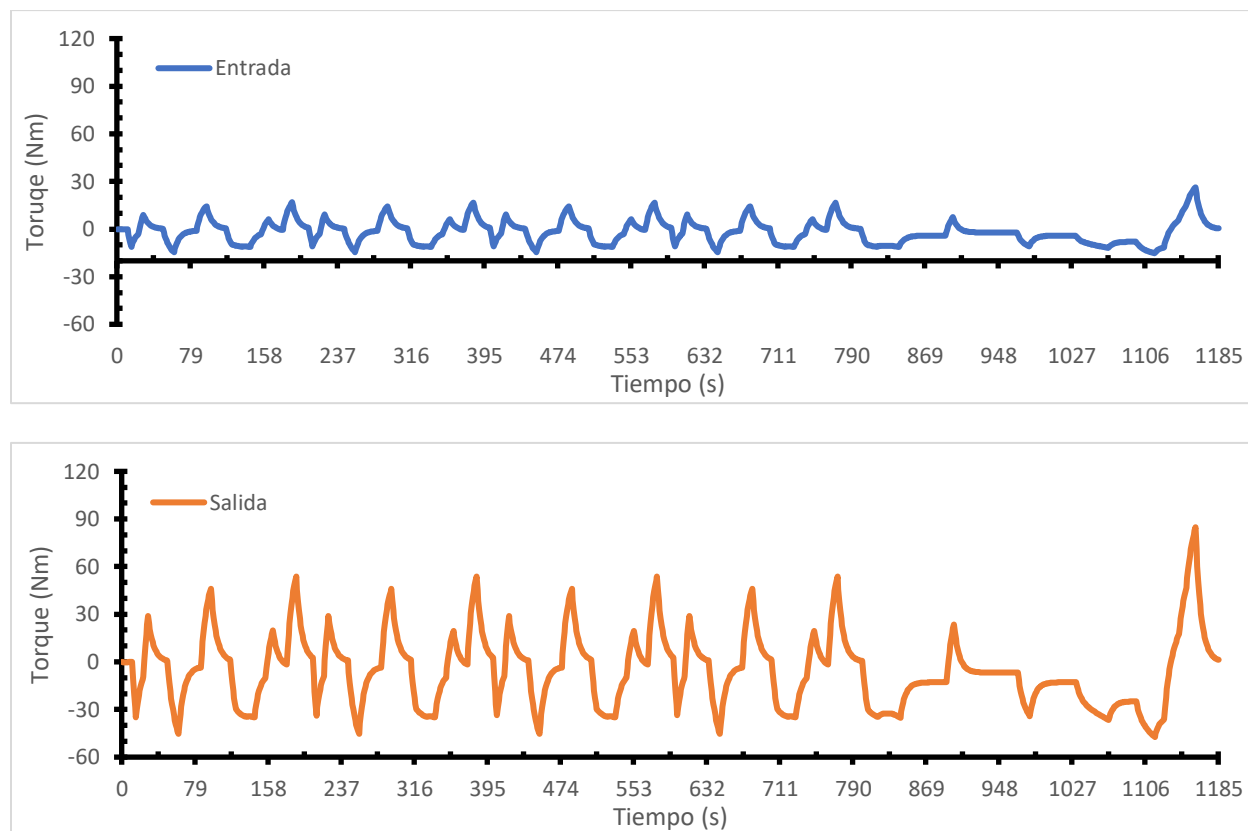
Por otro lado, en el episodio 176, se aprecia cómo la tendencia cambia y la recompensa comienza a aumentar nuevamente hasta alcanzar valores de recompensa de casi 86 unidades en el episodio 225. Por consiguiente, el agente ha retomado su fase exploratoria y está empezando a descubrir y seguir una política de acción más eficiente, donde los valores generados por el modelo están contribuyendo a una disminución notoria en la función de costo.

Finalmente, desde el siguiente episodio 226 hasta finalizar en el 470, se aprecia que la curva de recompensa alcanza un punto de convergencia. En esta región, debido a los factores que influyen en la recompensa como la función de costo y la actualización de la red neuronal, el modelo logra maximizar sus valores sin afectar negativamente la potencia de demanda de la batería y de las celdas de combustible ni el estado de carga. Esto ocasiona que la recompensa promedio alcance un valor elevado, relativamente constante, durante un largo número de episodios lo que significa que el agente ya cuenta con una política de acción que le permite minimizar la función de costo, misma que lo guiará a lo largo de los siguientes episodios y, por tanto, el entrenamiento puede concluir satisfactoriamente. Cabe destacar que este entrenamiento permite la gestión energética en otros ciclos de manejo gracias a que las entradas para el agente siguen siendo la observación de las potencias actual y anterior de la batería y la función de recompensa no cambia.

### 3.1.7 Torque de Entrada y Salida del Motor.

**Figura 3.7**

*Torques del vehículo*



La figura 3.7 presenta las gráficas de los torques de entrada y salida generados por el motor. Estos torques están influenciados por la velocidad angular de entrada y salida que el motor debe proporcionar para cumplir con los requisitos del ciclo de manejo. En la gráfica de torque de entrada se observa en la zona urbana ( $t < 800$  s) picos que alcanzan valores entre los -15 Nm y 15 Nm. Dado los máximos y mínimos, se justifica que los picos positivos representan a la aceleración mientras que los negativos a la desaceleración del vehículo siguiendo el ciclo de manejo. En contraste, la primera parte de la zona extraurbana ( $800$  s  $< t < 1100$  s) muestra una disminución del torque máximo a 21 Nm ya que el vehículo se mueve a mayores velocidades, lo que requiere

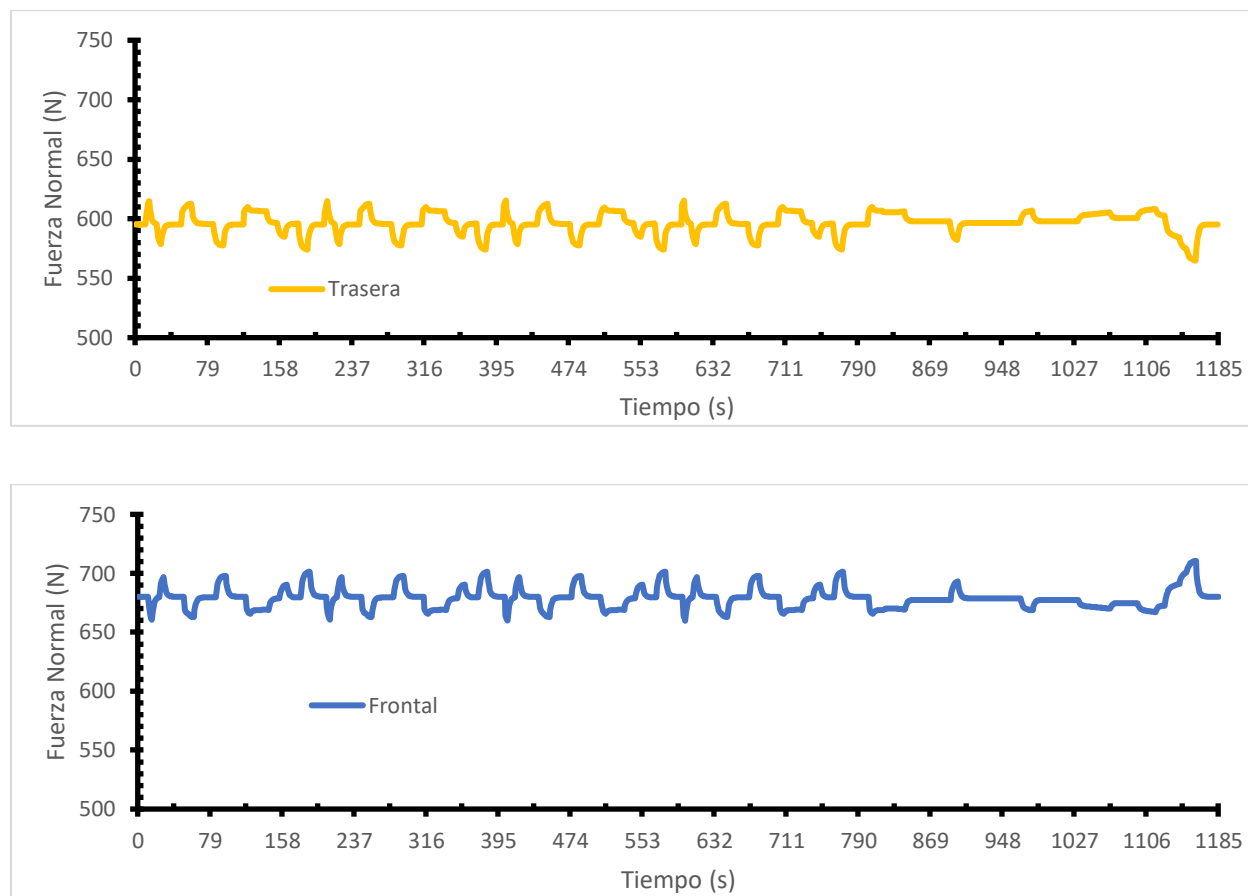
de un torque menor. Dicha relación inversa entre la velocidad de rotación y el torque se evidencia en la curva del motor. Finalmente, para la parte final de la zona extraurbana ( $t < 1100$  s) se observa un aumento del torque hasta 25 Nm. El mencionado aumento, es debido a la reducción de la velocidad angular del motor en consecuencia de que el vehículo reduce su velocidad hasta cero desde su máxima velocidad.

La gráfica de torque de salida muestra un aumento en la amplitud correspondiente a la relación dada por la velocidad de salida y la de entrada de 4 a 1. En dicha grafica se evidencian el mismo comportamiento que en la gráfica de torque de entrada ya que únicamente se busca cambiar la amplitud del torque de salida siguiendo el comportamiento de entrada para la zona urbana y extraurbana del ciclo de manejo. Finalmente, se observa un correcto desempeño del sistema de transmisión ya que la relación de velocidad permite el cumplimiento del ciclo de manejo siguiendo las condiciones de la curva del motor seleccionado.

### 3.1.8 Fuerzas Normales de las Ruedas

**Figura 3.8**

*Fuerzas normales del vehículo*



La figura 3.8 muestra las gráficas de las fuerzas normales en las ruedas del vehículo obtenidas desde la salida del bloque del cuerpo del vehículo. En ambas gráficas, para la zona urbana ( $t < 800$  s) se muestran varios picos y variaciones, de entre 580 N a 610 N para la fuerza normal de las ruedas traseras y de entre 660 N a 700 N para la fuerza normal de las ruedas delanteras. La transmisión para el vehículo utilizado es una de tipo delantera, ya que mayor potencia es transmitida del motor a las ruedas del vehículo. Dado lo anterior, se comprueba el uso de dicha tracción con los valores mayores mostrados para la fuerza normal delantera. Las

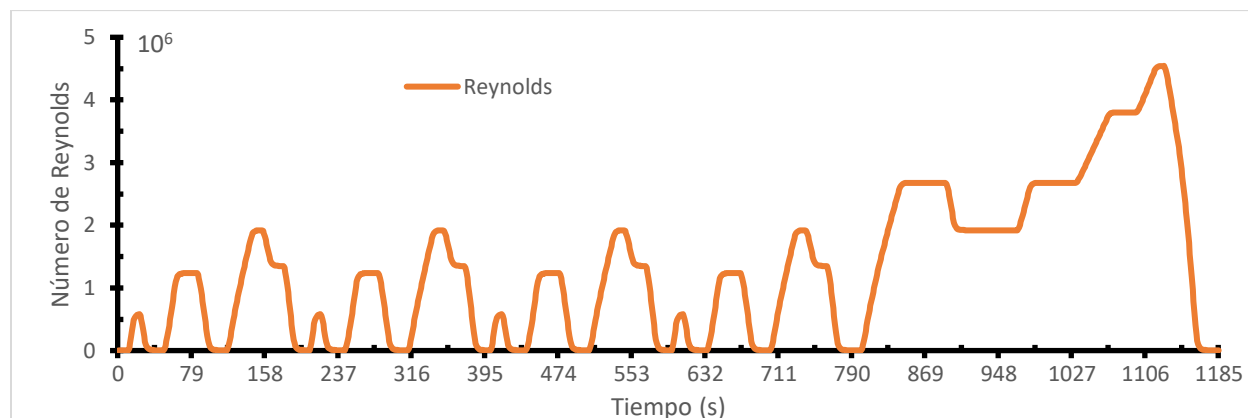
variaciones en los valores de las fuerzas representan los cambios súbitos de velocidad que realiza el vehículo según el ciclo de manejo para una zona urbana. En contraste, con lo observado en la zona extraurbana ( $t > 800$  s), el vehículo presenta variaciones de velocidad graduales, manteniéndose mayormente en su valor intermedio de 580 Nm para las fuerzas de las ruedas traseras y 680 Nm para las fuerzas de las ruedas delanteras.

Es importante destacar que las gráficas difieren notablemente durante la aceleración y la desaceleración como consecuencia del diseño de tracción delantera del vehículo. Se observa que en el primer pico de aceleración ( $t = 10$  s) la fuerza normal para las ruedas frontales disminuye a 660 N desde su valor promedio de 680 N mientras que la fuerza normal para las ruedas traseras aumenta desde su valor promedio de 595 N a 610 N. Luego, en el siguiente pico ( $t = 40$  s) se observa un comportamiento opuesto, es decir, la fuerza normal para las ruedas frontales aumenta desde 680 N a 698 N y la fuerza normal para las ruedas traseras disminuye desde 595 N a 580 N. El comportamiento anterior se repite para cada valor pico de ambas gráficas. Dicho comportamiento es debido a que, durante los momentos de aceleración, la inercia desplaza el peso hacia la parte trasera, disminuyendo las fuerzas normales en las ruedas delanteras y aumentándolas en las traseras, al contrario de lo que ocurre durante la desaceleración donde el peso se traslada hacia adelante durante el frenado, lo que conlleva a la disminución de las fuerzas normales en las ruedas traseras y al aumento en las delanteras. Por lo tanto, al aumentar la carga en las ruedas traseras durante la aceleración se mejora la tracción, lo que permite una salida más eficiente y rápida. Además, durante la desaceleración, el sistema evita el bloqueo de las ruedas traseras, lo que garantiza un frenado controlado y estable, incluso en superficies resbaladizas. Esta estrategia de diseño proporciona una experiencia de conducción más segura y eficaz, al equilibrar la distribución de peso y maximizar la tracción en momentos críticos de aceleración y frenado.

### 3.1.9 Análisis Aerodinámico

**Figura 3.9**

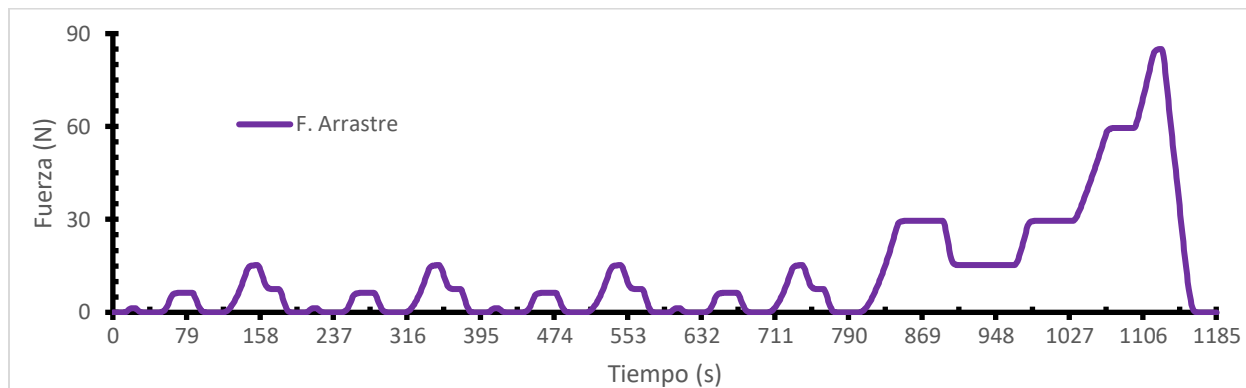
*Gráfica de los valores de Re del aire*



Dado que el flujo se considera turbulento cuando  $Re$  es superior a 4000, se puede apreciar que, en casi todo el trayecto, el vehículo atraviesa un flujo de estas características. Como consecuencia, existe una mayor resistencia del aire al vehículo, y esto conlleva a un aumento de la potencia que demanda el ciclo por la carga adicional. Como resultado, se prevé un aumento en el consumo de combustible, una reducción del estado de carga y una disminución en general de la eficiencia del vehículo, en especial en el mayor pico de velocidad del ciclo ( $1100 \text{ s} < t < 1130 \text{ s}$ ). Sin embargo, a estas velocidades, habrá una mayor transferencia de calor, lo que puede resultar beneficio para el control de las temperaturas de los componentes internos del vehículo.

No obstante, las regiones en que el vehículo se detiene ( $v=0\text{m/s}$ ) corresponden precisamente a valores de cero para  $Re$ , esto indica que existen tramos de flujo laminar, o de transición en los intervalos adyacentes a estos rangos de velocidad cero, por ejemplo, al iniciar y terminar el ciclo. Los efectos en estas regiones corresponderían a una menor resistencia del aire, a menor transferencia de calor, más estabilidad y menos ruido.



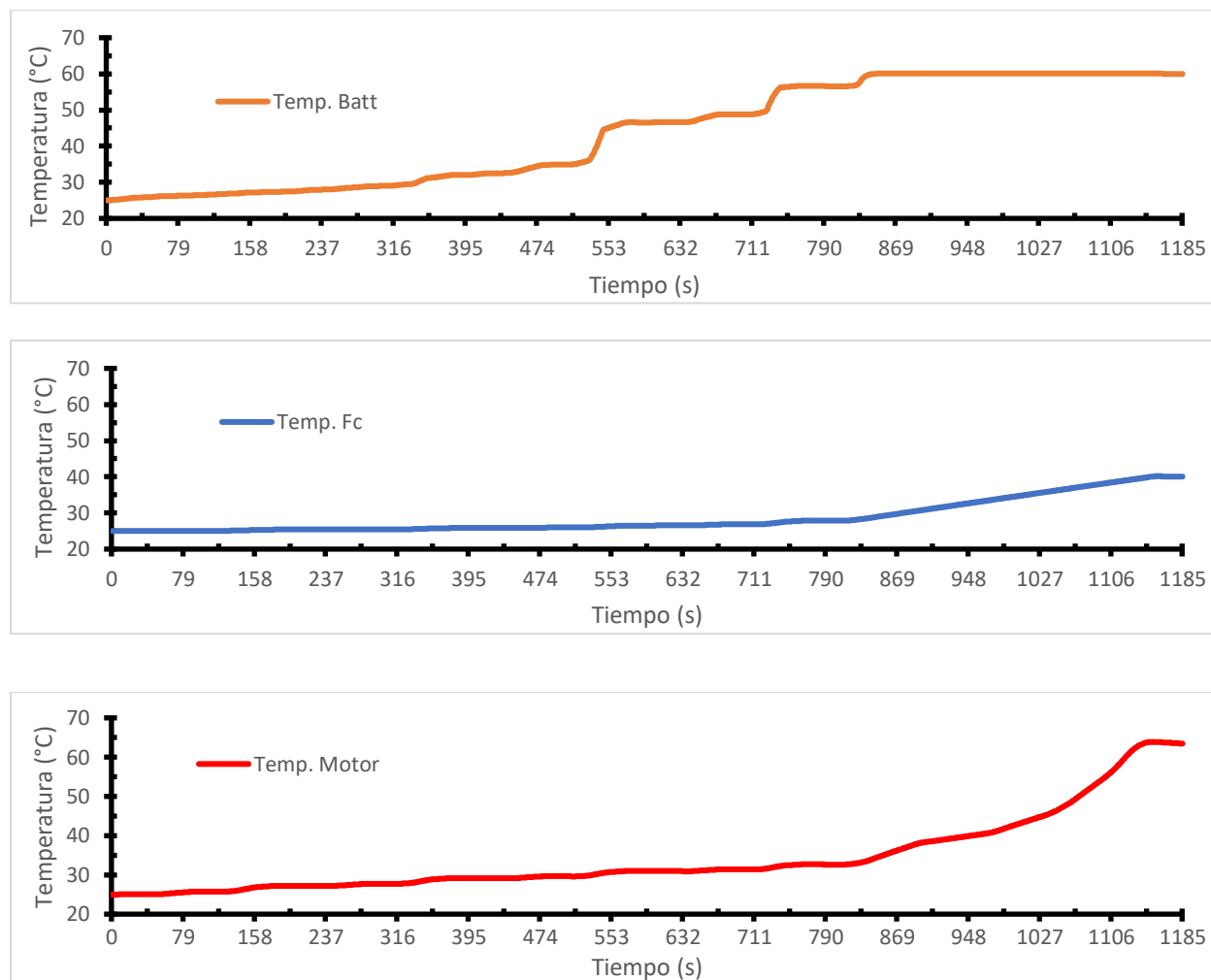
**Figura 3.10***Fuerza de arrastre del vehículo*

Debido a que se trata de un vehículo Go-Kart, cuyo coeficiente de arrastre es relativamente bajo (0,2), es de esperarse que tenga una fuerza de arrastre en magnitudes inferiores a los 100 N. No obstante, así como se mencionó con  $Re$ , esta fuerza ocasiona que las fuentes de energía entreguen más potencia en busca de que el motor sea capaz de superar esta resistencia. Esta carga adicional se vuelve notable con cada pico del NEDC; aunque los de la región urbana ( $t < 780$  s) sean menores a 25 N, su efecto es apreciable en las potencias de la batería y las celdas de combustible, explicando de este modo la razón de los picos tan pronunciados que se presentan en estas gráficas. Al continuar el ciclo más allá de los 800 segundos, la carga adicional va a ir escalando en magnitud hasta que se alcanza el pico de velocidad ( $1100 \text{ s} < t < 1130 \text{ s}$ ), correspondiente con el pico de la fuerza de arrastre. Toda esta carga adicional es gestionada por el EMS para determinar cuánta energía aportará la batería y las celdas de combustible con el objetivo de mantener un alto rendimiento.

### 3.1.10 Análisis de Disipación Térmica

**Figura 3.11**

*Potencia generada de la batería según ADVISOR, DP y RL*



La disipación térmica de la batería y las celdas de combustible influyen en sus respectivas potencias, del mismo modo, la temperatura del motor lo hará sobre la potencia aportada al vehículo. Para la batería se tiene un incremento progresivo hasta los 530 s, pues justo ahí la temperatura cambia de 36 °C a 45 °C en casi 20 s. Un comportamiento similar se vuelve apreciar a los 725 s. Esta vez, la temperatura aumenta desde los 50 °C hasta los 56,2 °C en casi 23 s. Por último, aunque menos significativa, a los 825 s, la temperatura cambia de 57 °C a 60 °C en 22 s,

para después mantenerse constante en lo que queda del ciclo, esto ocurre así porque el bloque Battery se configura con esa temperatura límite, misma que corresponde a la que advierte el fabricante para un correcto desempeño de la batería.

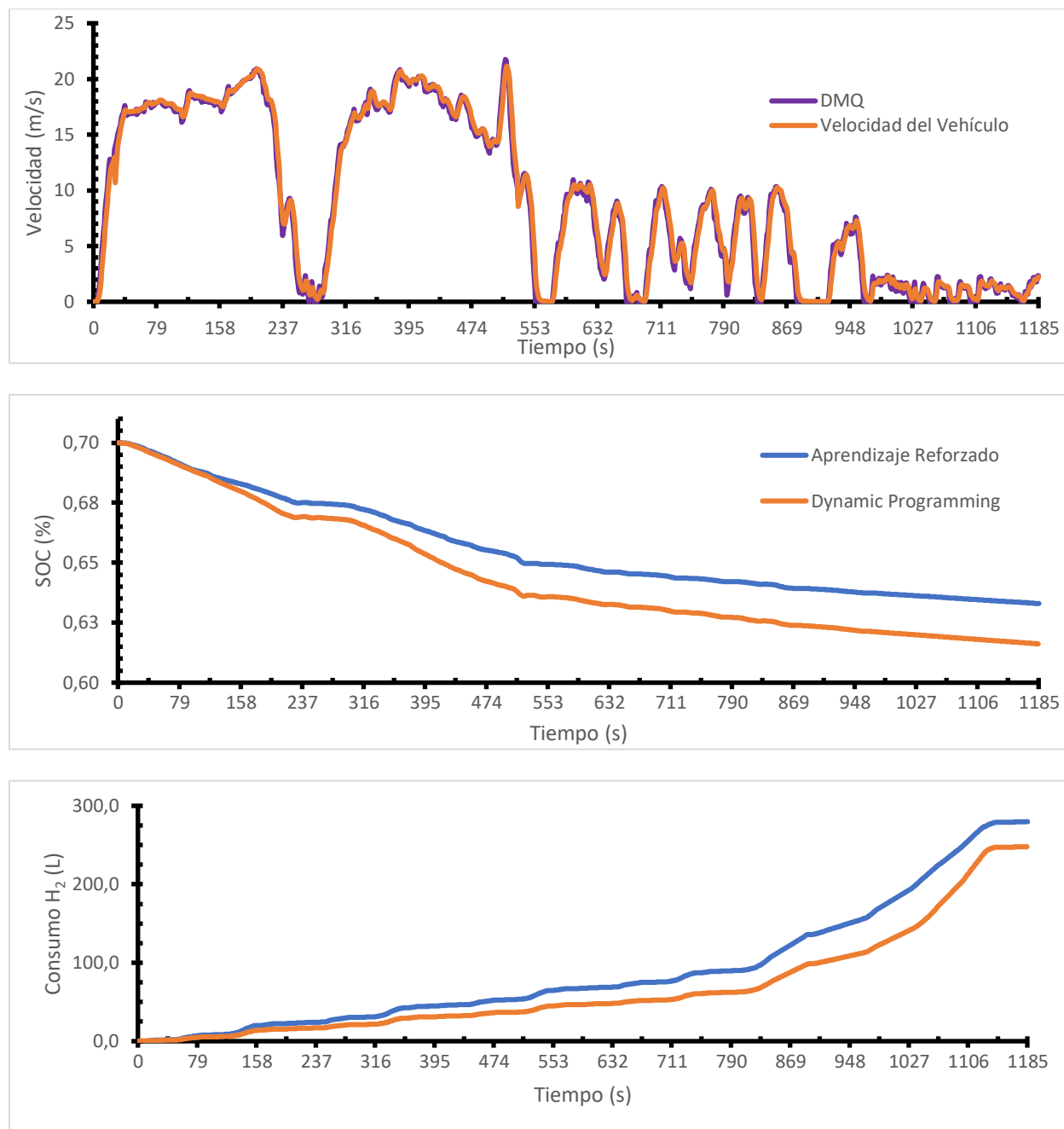
Por otra parte, la celda de combustible no alcanza valores tan altos de temperatura, incluso al terminar el ciclo su valor es 40 °C. No obstante, estos si pueden afectar a su funcionamiento pues, de acuerdo con el fabricante, este componente viene con un ventilador que se activa a una temperatura de 35 °C, precisamente para evitar que los grados Celsius sigan aumentando. Sin embargo, este aspecto tampoco fue considerado en la simulación, pero se esperaría que este elemento, en una situación real, no alcance esos valores al completar el ciclo NEDC.

Finalmente, la temperatura del motor alcanza valores relativamente similares a los de la batería. Sin embargo, esto se consigue progresivamente, no con saltos incrementales. En la gráfica se aprecia que luego de los dos últimos acelerones del ciclo de manejo ( $t = 1130$  s) la temperatura conseguida corresponde a un valor de 63,5 °C, lo que podría ocasionar un mal funcionamiento tanto de este, como de sus componentes mecánicos asociados, por ejemplo, la transmisión. Usualmente, los motores de los vehículos cuentan con un ventilador para su refrigeración, este fue omitido por motivos de simplicidad, pero, de contarse con uno de estos, se podría esperar que el motor no alcance temperaturas tan elevadas.

### 3.1.11 Comportamiento del Agente en el Ciclo DMQ

**Figura 3.12**

*Graficas obtenidas con el ciclo DMQ*



La figura 3.12 muestra los resultados de comprobar si el agente entrenado en el ciclo de manejo específico (NEDC) puede replicar su aprendizaje frente a un nuevo ciclo de manejo (DMQ), lo

que se conoce como Transfer Learning. En la primera grafica se observa cómo el ciclo de manejo modelado por el vehículo es capaz de mantener valores similares a los del ciclo real, lo que permite concluir que el dimensionamiento y selección de los componentes con los que cuenta el vehículo son capaces de adaptarse a este nuevo ciclo de manejo.

En la segunda curva se evidencia el cambio del SOC de la batería con dos EMS, resaltando sus diferencias de forma similar como en caso del ciclo NEDC. Se puede apreciar que RL consigue un mayor porcentaje de SOC de la batería que DP al final del ciclo; de hecho, los resultados obtenidos son 63,3% para RL y 61,6% para DP. Si bien en los primeros 100 s las gráficas lucen prácticamente idénticas, después RL no permite que el SOC de la batería disminuya con la misma velocidad que con DP, tendencia que continua hasta el segundo 225, cuando ambos EMS son capaces de mantener el SOC estable en sus respectivos valores (67,5% para RL y 66,9% para DP). A los 300 s se vuelve a tener otra disminución del SOC, en el cual RL vuelve a tomar distancia de DP, lo que ocasiona que, a los 525 s, sus valores sean de 64,9% para RL y 63,6% para DP, es decir, con RL la batería termina con un SOC más elevado.

Finalmente, se tiene la tercera gráfica que corresponde al consumo de hidrógeno para el nuevo ciclo. En ella se observa un comportamiento similar al descrito para el SOC, es decir, que, en los primeros 100 s, el consumo de  $H_2$  con ambos EMS es prácticamente idéntico. Sin embargo, luego la demanda del ciclo DMQ causa que los valores sean diferentes. En las mismas regiones previamente descritas para el SOC, ahora se comprende por qué RL no reducía su consumo tan rápidamente como lo hacía DP. Esto se debe a que RL aprovechaba de manera más eficiente las celdas de la batería, lo que resulta en valores de consumo de 22 litros para RL y 15.3 litros para DP después de 150 segundos. Más adelante, a los 360 segundos, se observa que la diferencia en el consumo aumenta, llegando a 44.5 litros para RL y 31 litros para DP. En este punto, la disparidad

en los consumos ya ha crecido de 7.3 litros a 13.5 litros. Esta diferencia continúa aumentando hasta que finalmente el ciclo concluye, manteniendo los consumos estables en 279.3 litros para RL y 247.5 litros para DP

## 3.2 Análisis de Tiempo de Vida Útil

### 3.2.1 Ciclos de Carga/Descarga de la Batería

Para el análisis de tiempo de vida útil de las baterías hay que incluir los ciclos de descarga y carga. Al relacionar dicho concepto con el modelo obtenido para la batería del vehículo, se considera que un ciclo de descarga corresponde a la repetición del ciclo de manejo de la NEDC para luego volver a cargar la batería y cumplir así con el ciclo de descarga/carga, donde además temperatura de la batería no cambia y la tasa de descarga es de 1 C.

En [21] se encontró la curva común de Ciclos de Fallo (CTF) para una batería de Ion Litio para determinar la vida útil de la batería, agregándoles a dicha curva otra aproximación la cual toma en cuenta la capacidad de retención con los ciclos y la relación de capacidad de retención con la corriente de descarga. Finalmente, lo anterior descrito se muestra en las siguientes ecuaciones y se organizan en la tabla 3.1:

$$CTF = -4790 + 7427 \cdot DOD^{-1} - 1077 \cdot DOD^{-2} + 55.4 \cdot DOD^{-3} \quad (3.1)$$

$$f_{CC}(crate) = 0.8800 + 0.0929 \cdot e^{-\left[\frac{crate + 0.0639}{-1.3770}\right]^2} \quad (3.2)$$

$$f_{CTFC}(CTF) = -0.00177 + 0.96 \cdot f_{CC}(crate) \quad (3.3)$$

$$CTF_C = \frac{CTF}{f_{CTFC}(CTF)} \quad (3.4)$$

**Tabla 3.1**

*Comparativa de valores de ciclos de carga/descarga hasta el fallo de la batería*

<b>Datos</b>	<b>ADVISOR</b>	<b>DP</b>	<b>RL</b>
<b>SOC inicial</b>	0,700	0,700	0,700
<b>SOC final</b>	0,561	0,598	0,614
<b>DOD</b>	0,139	0,102	0,083
<b>CFT (primera aproximación)</b>	13530	16730	25245
<b>CFT (segunda aproximación)</b>	15160	18745	28286

Los resultados presentados en la tabla 3.1 evidencian un notable desempeño de la solución de RL en términos de vida útil de las baterías con una mejora de 28286 en comparación a los 18745 de DP y 15160 ciclos de ADVISOR. Por lo tanto, en porcentaje se observa un incremento del 34% en comparación con la solución basada en DP, y un destacable aumento del 47% en comparación con la solución propuesta por el sistema ADVISOR. Por ende, aunque el consumo de combustible es mayor en RL (280 L) comparado con ADVISOR (275 L) y DP (247.5 L), los resultados del CTF muestran una gran mejora de ciclos de vida y estado de carga para RL comparado con los valores de consumo que no afectan de manera significativa al costo total de la vida útil. La anterior afirmación, se comprobará en la sección “*Análisis de la Vida Útil de la Batería y el Consumo de Combustible*”.

### **3.3 Análisis de Costos**

#### **3.3.1 Costo de Componentes**

Los componentes seleccionados para el tren de potencia del vehículo corresponden a aquellos que satisfacen los requerimientos mínimos para cumplir con la potencia demandada que el ciclo NEDC genera. Por ello, a continuación, se observa una tabla con el detalle de costo de estos componentes.

**Tabla 3.2***Detalle de costo de componentes seleccionados [21]*

<b>Componente</b>	<b>Modelo/Marca/Disposición</b>	<b>Precio Total</b>
<b>Baterías</b>	8 baterías en serie CX35 - 12V 35AH Ion-Litio	\$5000,00
<b>Motor</b>	LEM 200-D135RAG LEMCO 96 VDC	\$2050,00
<b>Stack de Celdas Almacenamiento de Hidrógeno.</b>	3 Stacks Horizon H-2000	\$3000,00
<b>Tanque de Hidrogeno</b>	1 tanque MyH2-600	\$1200,00
<b>Controlador del motor</b>	SIGMADRIVE Electric Motors PMT835M	\$640,00
<b>Cargador de Baterías</b>	TC-CHARGER HK-J-96-32	\$560,00
<b>Convertidor DC/DC</b>	Victron Buck-Boost DC-DC Converter 25 A	\$600,00
-	<b>Total</b>	<b>\$13050,00</b>

Cada elemento mostrado en la tabla cumple un papel fundamental en el rendimiento y la eficiencia del vehículo:

- Baterías (\$5000,00): Su precio refleja la calidad y capacidad de almacenamiento de energía, lo que influye en su durabilidad, autonomía y rendimiento general.
- Motor (\$2050,00): Su costo se relaciona con su capacidad, eficiencia y tecnología, ya que un motor de alta calidad contribuye a la economía de combustible y a la reducción de emisiones.
- Stacks de Hidrógeno (\$3000,00): Su precio se debe a la investigación y desarrollo necesarios para implementar esta alternativa energética, junto con los costos de producción y materiales.
- Tanque de Almacenamiento de Hidrógeno (\$1200,00): Su costo elevado se debe a materiales especiales, desarrollo tecnológico y cumplimiento de regulaciones.
- Controlador de Motor (\$640,00): Su costo se relaciona con la precisión de su diseño y funcionalidades avanzadas para una gestión efectiva de la potencia.



- Cargador de Baterías (\$560,00): Su precio refleja la calidad y capacidad del cargador para mantener la vida útil y el rendimiento de las baterías.
- Convertidor DC/DC (\$600,00): Su precio se basa en su capacidad y eficiencia en la conversión de voltajes.

### 3.3.2 *Análisis de la Vida Útil de la Batería y el Consumo de Combustible*

Para esta comparativa se relacionó el costo de los ciclos de vida útil con el costo de combustible para verificar la rentabilidad de la propuesta. Para ello se tomó un precio de referencia actual del combustible de hidrogeno de \$2,5 [37].

Para el costo de los ciclos de vida útil ( $L_{cc}$ ) se usó la siguiente ecuación [38]:

$$L_{cc} = C_I + C_{pm} + C_{CM} \quad (3.5)$$

$C_I$ : Costo inicial.

$C_{pm}$ : Costo de mantenimientos preventivos.

$C_{CM}$ : Costo de mantenimientos correctivos (Cambio de la batería).

Los precios de mantenimiento correctivo y preventivo varían dependiendo del tiempo de duración. Según [39], el precio por hora en un taller es de \$40. Además, Cada mantenimiento de la batería toma aproximadamente una hora para el mecánico. Dado que hay 8 baterías conectadas en serie, el costo total para el mantenimiento correctivo y preventivo asciende a \$320. Adicionalmente, para obtener los costos por ciclo se utilizaron los valores de la tabla 3.1 y 3.2. Finalmente, se obtuvieron los resultados mostrados en la siguiente tabla:

**Tabla 3.3***Detalle de costo de vida útil [39]*

	<b>Costo por ciclo de la batería</b>	<b>Costo Por ciclo del combustible</b>	<b>Costo de mantenimiento preventivo</b>	<b>Costo de mantenimiento correctivo</b>	<b>Costo total del ciclo de vida</b>
<b>ADVISOR</b>	\$/CTF 0,33	\$/kg 0,637	\$ 640,00	\$ 320,00	\$ 28312,562
<b>DP</b>	\$/CTF 0,27	\$/kg 0,617	\$ 640,00	\$ 320,00	\$ 26049,682
<b>RL</b>	\$/CTF 0,17	\$/kg 0,687	\$ 320,00	\$ 0,00	\$ 24561,102

Los resultados de la tabla 3.3 revelan que el costo por cada ciclo de carga/descarga de batería es inferior en el enfoque de RL, atribuido a su mayor vida útil según los datos de la tabla 3.1. Sin embargo, los costos de combustible exhiben un aumento en RL debido a un mayor consumo, lo cual se evidencia en la figura 3.5.

El mantenimiento correctivo se realizará cuando se alcance el valor máximo del ciclo de falla y se reemplace la batería. Dados lo anterior y al considerar que el ciclo de falla máximo para el vehículo corresponde a 28286, se considera un mantenimiento correctivo para ADVISOR y otro para DP. Dicha consideración, se realiza por que tanto las baterías de DP y ADVISOR presentan ciclos máximos de fallo de 18745 y 15160 respectivamente por lo que es necesario reemplazar la batería. Por lo tanto, los valores de correctivo ascienden para ADVISOR y DP a un valor de \$320. En contraste con RL cuyo valor es de \$0, debido a que no se reemplaza la batería ya que su valor máximo de ciclo de falla para la batería corresponde a 28286.

El mantenimiento preventivo implica llevar a cabo acciones de acuerdo con las directrices proporcionadas por el fabricante de las baterías, realizándose una vez durante el ciclo de vida de estas. Dado el concepto anterior y considerando que se utilizaron dos baterías para ADVISOR y DP, entonces se consideran dos mantenimientos preventivos. Finalmente, el precio por el preventivo para ADVISOR y DP corresponde a un valor de \$640 para cada uno. A diferencia de

los \$320 para RL donde solo se hace mantenimiento para una sola batería, debido a que esta finaliza su vida cuando el vehículo alcanza su máximo de 28286.

Conforme a [37], la proyección de que el costo del combustible de hidrógeno será inferior a \$1,00 dólar para 2025 sugiere una perspectiva económica favorable para la tecnología de RL. Potenciando su viabilidad como una opción energética eficiente y sostenible, especialmente en el área del transporte donde el hidrógeno se utiliza como fuente de energía limpia y renovable, ofreciendo un incentivo adicional para su adopción.

## **CAPÍTULO 4**

## 4.1 Conclusiones y Recomendaciones

### 4.1.1 Conclusiones

- La comparación de las tres estrategias de gestión energética permite evaluar el desempeño, eficiencia y sustentabilidad que otorgue cada uno, siendo RL aquel que obtiene óptimos resultados en la durabilidad de la batería, lo que garantiza la rentabilidad del EMS con el ciclo NEDC.
- El EMS con RL necesita de elevados requerimientos computacionales para realizar su entrenamiento y conseguir resultados rentables. No obstante, el agente ya entrenado es capaz de replicar instantáneamente su estrategia de control en otros ciclos de manejo, tal como ocurrió al usar el ciclo DMQ.
- El modelo del vehículo consigue emular correctamente la batería, el motor, las celdas, entre otros. Esto es así debido a que las respectivas gráficas de potencia, consumo de hidrógeno, SOC y velocidad del vehículo, resultan coherentes y en ellas se aprecia el impacto del ciclo de manejo usado.
- El modelo cuenta con bloques que le permiten calcular la fuerza normal de las llantas, los torques de entrada y salida, el número de Reynolds del aire, la fuerza de arrastre y la disipación de calor de sus fuentes y el motor, resultados que explican y hacen coherencia en un entorno realístico del vehículo.

#### 4.1.2 *Recomendaciones*

- Una ventaja clave de la propuesta de RL es su capacidad de transferencia del agente a contextos diversos. Por ende, se requiere un análisis de viabilidad para trasladar el agente de la solución propuesta a ciclos de manejo cuyas condiciones de potencia sean mucho mayores a las del ciclo europeo.
- El modelado del vehículo omitió ciertas cargas o valores que podrían influir en el comportamiento del vehículo y, consecuentemente, en su eficiencia. Un ejemplo ellos, es la omisión de la degradación temporal de las baterías. Por ello se debe evitar la idealización de los bloques de Simulink y añadir las cargas reales.
- Los ciclos de manejo, al presentar condiciones de conducción ideales, pasan por alto factores esenciales como el grado de inclinación y las malas prácticas de conducción que afectan a la eficiencia. Por tanto, es crucial considerar cómo las condiciones de manejo reales inciden en la eficiencia.
- La función de costo proporciona una forma de evaluar la recompensa generada por el algoritmo de RL. Por ello, Modificar la arquitectura de la función de costo podría influir en la mejora de la eficiencia, por lo que es relevante incluir otras funciones de costo para el desarrollo del agente de RL.
- El RL engloba diversos algoritmos orientados a obtener la política óptima que maximiza la recompensa. Entre ellos, se destaca Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) el cual es más robusto y sería recomendable de incluirlo en trabajos futuros.
- Existen otros enfoques de aprendizaje, como el supervisado, basado en el etiquetado de los datos de entrada para identificar características. Esta metodología ampliaría el espectro de herramientas disponibles para optimizar la gestión energética en vehículos híbridos.

## REFERENCIAS

- [1] M. Menes, “Two decades of hybrid electric vehicle market,” *Journal of Civil Engineering and Transport*, vol. 3, no. 1, 2022, doi: 10.24136/tren.2021.003.
- [2] T. R. Hawkins, O. M. Gausen, and A. H. Strømman, “Environmental impacts of hybrid and electric vehicles-a review,” *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 17, no. 8. 2012. doi: 10.1007/s11367-012-0440-9.
- [3] F. Orecchini *et al.*, “Energy consumption of a last generation full hybrid vehicle compared with a conventional vehicle in real drive conditions,” in *Energy Procedia*, 2018. doi: 10.1016/j.egypro.2018.08.080.
- [4] T. Markel and A. Simpson, “Cost-benefit analysis of plug-in hybrid electric vehicle technology,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 1, no. 1, 2007, doi: 10.3390/wevj1010294.
- [5] R. González-Oropeza, “Los ciclos de manejo, una herramienta útil si es dinámica para evaluar el consumo de combustible y las emisiones contaminantes del auto transporte,” 2005. Accessed: Jun. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v6n3/1405-7743-iit-6-03-147.pdf>
- [6] S. S. Javier Milton and Q. P. Freddy Eduardo, “Desarrollo de ciclos de conducción en ciudad, carretera y combinado para evaluar el rendimiento real del combustible de un vehículo con motor de ciclo OTTO en el distrito metropolitano de quito,” 2017. Accessed: Jun. 14, 2023. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17000/1/CD-7578.pdf>

- [7] P. S. Pérez Llanos and C. O. Quito Sinchi, “Determinación de los ciclos de conducción de un vehículo categoría M1 para la ciudad de Cuenca,” 2018. Accessed: Jun. 14, 2023. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15032/1/UPS-CT007421.pdf>
- [8] G. Canbolat and H. Yaşar, “Performance Comparison for Series and Parallel Modes of a Hybrid Electric Vehicle,” *Sakarya University Journal of Science*, 2019, doi: 10.16984/sofenbilder.369149.
- [9] M. A. Hannan, F. A. Azidin, and A. Mohamed, “Hybrid electric vehicles and their challenges: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29. 2014. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.097.
- [10] S. Kaleg, A. Hapid, and M. R. Kurnia, “Electric vehicle conversion based on distance, speed and cost requirements,” in *Energy Procedia*, 2015. doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.276.
- [11] I. Mártil, «Funcionamiento de una batería de ion-litio,» *Material Eléctrico*, 21 febrero 2019. [En línea]. Available: <https://material-electrico.cdecomunicacion.es/opinion/ignacio-martil/2019/02/21/funcionamiento-de-una-bateria-de-ion-litio-pros-y-contras>. [Último acceso: 3 septiembre 2023].
- [12] J. Hamel Fonseca, “Celdas, pilas y baterías de Ion-Litio una alternativa Para...,” *Journal Boliviano de Ciencias*, vol. 8, 2011.
- [13] J. Alvarado-Flores, “Estudio comparativo de las diferentes tecnologías de celdas de combustible,” *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 52, no. 3. 2013. doi: 10.3989/cyv.142013.



- [14] S. M. Rozo and J. E. Tibaquirá, “Celdas De Combustible Tipo Membrana De Intercambio Protónico,” *Scientia et Technica Año XIII*, vol. 37, no. 37, 2007.
- [15] M. Cuello Andy, C. Vélez Mauricio, and M. Monar Willan, “Diseño del Sistema de Freno Regenerativo de Automóviles Híbridos Design of the Regenerative Braking System for Hybrid Cars,” 2016.
- [16] C. C. Monroy Laverde, C. A. Siachoque Ardila, I. C. Duran Tovar, and A. R. Marulanda Guerra, “Estudio comparativo de un sistema de freno regenerativo y regeneración con energía cinética constante en vehículos eléctricos de batería,” *Ingeniería*, vol. 25, no. 3, 2020, doi: 10.14483/23448393.16220.
- [17] P. Yu, M. Li, Y. Wang, and Z. Chen, “Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles: A Review of Topologies and Energy Management Strategies,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 13, no. 9, 2022. doi: 10.3390/wevj13090172.
- [18] H. Li, A. Ravey, A. N’Diaye, and A. Djerdir, “A review of energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicle,” in *2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2017 - Proceedings*, 2018. doi: 10.1109/VPPC.2017.8330970.
- [19] D. Li, B. Xu, J. Tian, and Z. Ma, “Energy management strategy for fuel cell and battery hybrid vehicle based on fuzzy logic,” *Processes*, vol. 8, no. 8, 2020, doi: 10.3390/PR8080882.
- [20] C. Du, S. Huang, Y. Jiang, D. Wu, and Y. Li, “Optimization of Energy Management Strategy for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles Based on Dynamic Programming,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 12, 2022, doi: 10.3390/en15124325.

- [21] S. Guillermo García Tovar and S. Vicente Espinosa Ortiz, “Diseño de un sistema de propulsión de un vehículo eléctrico híbrido de autonomía extendida con gestión estratégica de energía”, *Escuela Superior Politécnica del Litoral*, 2022.
- [22] Ahmadi, S., Bathaee, S. M. T., & Hosseinpour, A. H. (2018). *Improving fuel economy and performance of a fuel-cell hybrid electric vehicle (fuel-cell, battery, and ultra-capacitor) using optimized energy management strategy*. *Energy Conversion and Management*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.020>
- [23] Richard S. Sutton y Andrew G. Barto. *Reinforcement Learning*. Cambridge, Massachusetts, second edition, 2018.
- [24] Song, K., Zhang, J., & Zhang, T., “Design and development of a pluggable PEMFC extended range electric vehicle”, *International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, MACE 2011 – Proceedings, in 2011. 1144–1147. <https://doi.org/10.1109/MACE.2011.5987138>
- [25] “DC motor model with electrical and torque characteristics and fault modeling - MATLAB - MathWorks América Latina”, Mathworks.com. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/sps/ref/dcmotor.html>. [Consultado: 10-jul-2023]
- [26] uDocz, “Diseño De Elementos De Maquinas Robert L Mott 4ta Ed”, uDocz, 2017.
- [27] A. Andrade, Rediseño de la Carrocería y Chasis de un Go-Kart Híbrido. *Escuela Superior Politécnica del Litoral*. 2016.

- [28] “*Two-axle vehicle with longitudinal dynamics and motion and adjustable mass, geometry, and drag properties - MATLAB*”, Mathworks.com. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/sdl/ref/vehiclebody.html>. [Consultado: 21-jul-2023].
- [29] “*Generic battery model - Simulink*”, Mathworks.com. [En línea]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/battery.html>. [Consultado: 10-jul-2023].
- [30] “*Pulse-width modulated voltage source - Simulink*”, Mathworks.com. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/sps/ref/controlledpwmvoltage.html>. [Consultado: 10-jul-2023].
- [31] “*H-bridge motor driver - MATLAB*”, Mathworks.com. [En línea]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/hbridge.html>. [Consultado: 11-jul-2023].
- [32] “*Behavioral model of power converter - MATLAB*”, Mathworks.com. [En línea]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/dcdcconverter.html>. [Consultado: 21-jul-2023].
- [33] “*Fuel cell electrical system - MATLAB*”, Mathworks.com. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/sps/ref/fuelcell.html>. [Consultado: 21-jul-2023].
- [34] ANSYS, Inc. (2017). Ansys Resource Library [Online]. [Citado 13/06/2018]  
Disponible en Internet: <https://www.ansys.com/Resource-Library>
- [35] Han, J., Park, Y., & Kum, D. (2014). Optimal adaptation of equivalent factor of equivalent consumption minimization strategy for fuel cell hybrid electric vehicles under active state

inequality constraints. *Journal of Power Sources*, 267, 491–502.

<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.05.067>

- [36] Dittrich, Marc-André & Fohlmeister, Silas. (2020). A deep q-learning-based optimization of the inventory control in a linear process chain. *Production Engineering*. 15. 1-9. 10.1007/s11740-020-01000-8.
- [37] C. Noya, “El precio del hidrógeno verde será más barato que el diésel en 2023”, foro coches eléctricos, 27-dic-2021. [En línea]. Disponible en: <https://forococheselectricos.com/2021/12/precio-del-hidrogeno-verde-mas-barato-que-el-diesel-en-2023.html>. [Consultado: 25-ago-2023].
- [38] J. Damström, “Life cycle cost analysis of lithium-ion batteries using different charging strategies: case study Stockholm Arlanda airport”, *Diva-portal.org*. [En línea]. Disponible en: <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1297262/FULLTEXT01.pdf>. [Consultado: 25-ago-2023].
- [39] P. Pérez, “¿Cuánto cuesta cambiar la batería del coche? Precios”, *Autoretro.es*, 21-feb-2023. [En línea]. Disponible en: <https://autoretro.es/coches/precio-cambiar-bateria/>. [Consultado: 25-ago-2023].
- [40] “ADVISOR Documentation”, *Sourceforge.net*, 26-mar-2013. [En línea]. Disponible en: <https://adv-vehicle-sim.sourceforge.net/>. [Consultado: 20-ago-2023].
- [41] “Tire defined by Magic Formula coefficients - MATLAB”, *Mathworks.com*. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/sdl/ref/tiremagicformula.html>. [Consultado: 21-jul-2023].

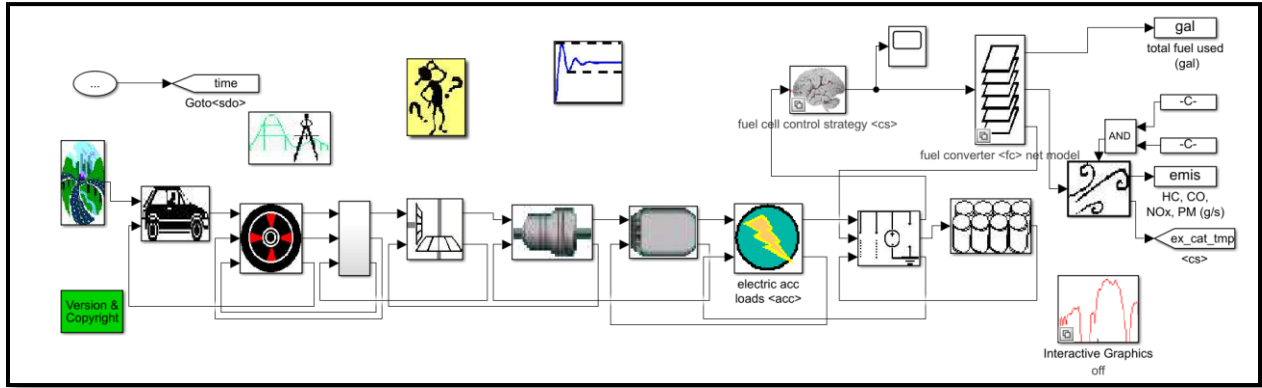
- [42] “Frictional brake with pressure-applying cylinder and pads with faulting - MATLAB”, Mathworks.com. [En línea]. Disponible en:  
<https://la.mathworks.com/help/sdl/ref/discbrake.html>. [Consultado: 21-jul-2023].
- [43] “Simple gear of base and follower wheels with adjustable gear ratio, friction losses, and triggered faults - MATLAB”, Mathworks.com. [En línea]. Disponible en:  
<https://la.mathworks.com/help/sdl/ref/simplegear.html>. [Consultado: 21-jul-2023].
- [44] “Convective Heat Transfer - MATLAB”, Mathworks.com. [En línea]. Disponible en:  
<https://la.mathworks.com/help/simscape/ref/convectiveheattransfer.html>. [Consultado: 21-jul-2023].
- [45] “Conductive Heat Transfer - MATLAB”, Mathworks.com. [En línea]. Disponible en:  
<https://la.mathworks.com/help/simscape/ref/conductiveheattransfer.html>. [Consultado: 21-jul-2023].

## **APÉNDICES**

# Apéndice A – Modelado Final de cada EMS

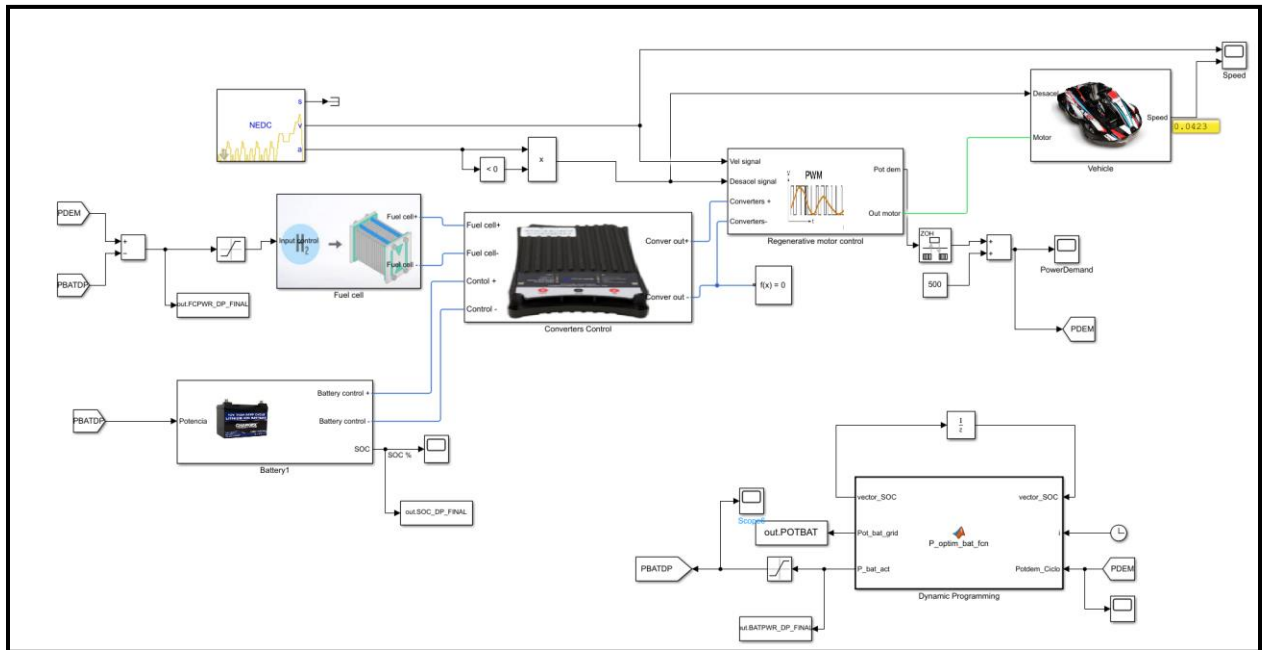
## Figura A1

Modelado ADVISOR [40]



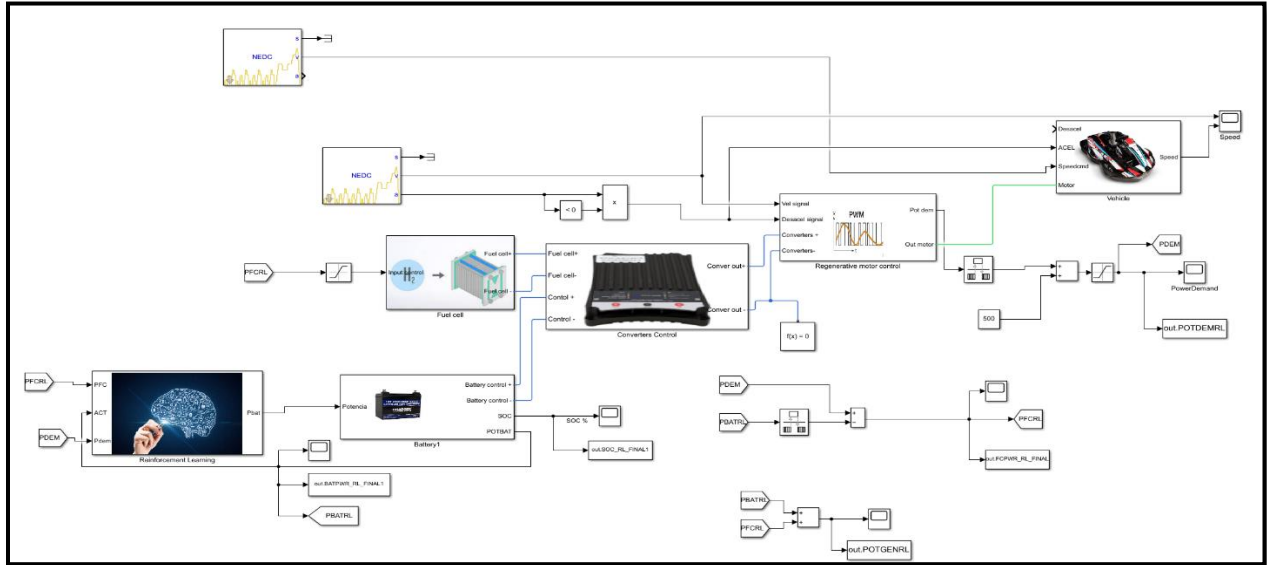
## Figura A2

Modelado de DP



**Figura A3**

*Modelado de RL*

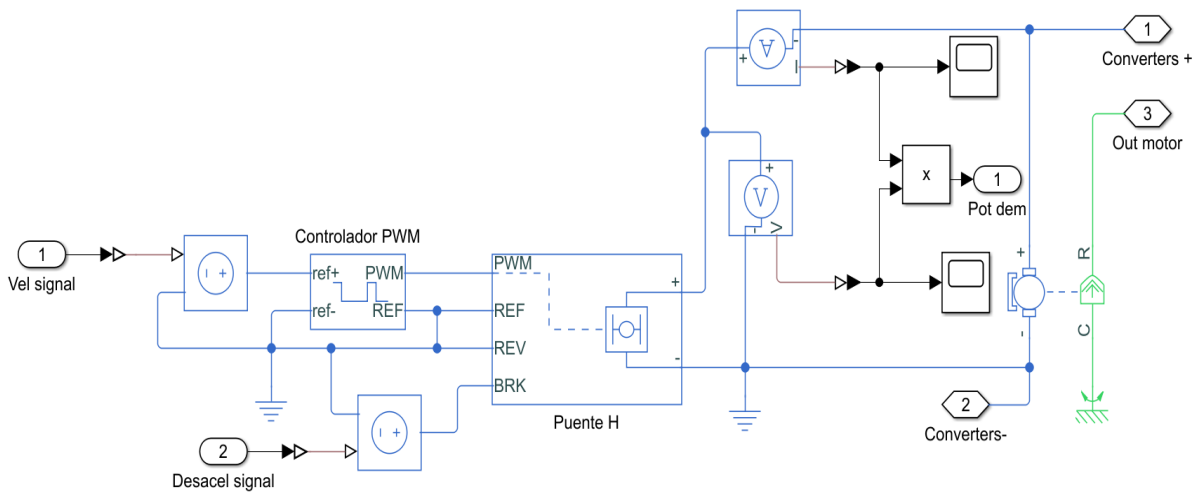


**Apéndice B – Subsistemas del Modelo del Vehículo**

*Subsistema: Regenerative Motor Control*

**Figura B1**

*Subsistema Regenerative Motor Control*





El subsistema de control mediante frenado regenerativo se ilustra en la figura B1. En este sistema, se toman como entradas la velocidad y la aceleración provenientes del ciclo de manejo (representado por el bloque "Drive Cycle"), así como las entradas positiva y negativa correspondientes a la corriente controlada por el convertidor DC/DC bidireccional.

Este subsistema tiene dos salidas principales: en primer lugar, el torque generado por el motor en función de la corriente que fluye a través de los terminales positivo y negativo del bloque "DC MOTOR"; en segundo lugar, la potencia requerida, que se obtiene al multiplicar el voltaje y la corriente del sistema.

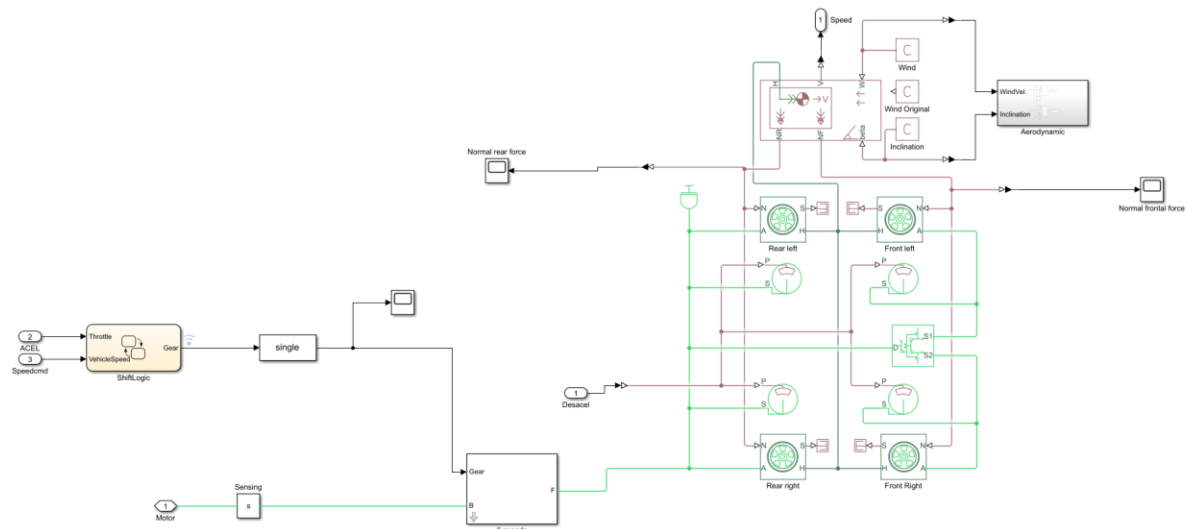
El proceso comienza con la señal de velocidad, que se convierte en una señal PWM mediante el controlador PWM. Después, esta señal se dirige al puente H, que envía señales de corriente por sus salidas. Para el frenado regenerativo, se utiliza la señal de desaceleración, que entra directamente al puente H. Aquí, se compara esta señal con una referencia, y la corriente resultante es negativa cuando supera el umbral establecido en cada intervalo de tiempo.

Finalmente, esta corriente generada en el puente H se aplica al motor, lo que da lugar a la generación de un torque de salida.

## Subsistema: Vehicle

### Figura B2

#### Subsistema Vehicle



La figura B2 presenta el subsistema "Vehicle", que incluye cuatro entradas: velocidad de control, aceleración, torque de salida del motor y señal de desaceleración. También contiene una salida de velocidad para validar el modelo.

El funcionamiento de este subsistema comienza con la determinación de la marcha en la que se encuentra el vehículo, esto es realizado por el bloque "Shift Logic" que opera como una caja de cambios automática. Dependiendo de la velocidad y la aceleración del vehículo, este bloque ajusta la marcha correspondiente.

Luego, el proceso entra al subsistema "6 Speeds", el cual se basa en la activación de cada embrague ("Clutch") para permitir el paso del torque deseado, adaptado a través de los engranajes según la velocidad actual del vehículo.

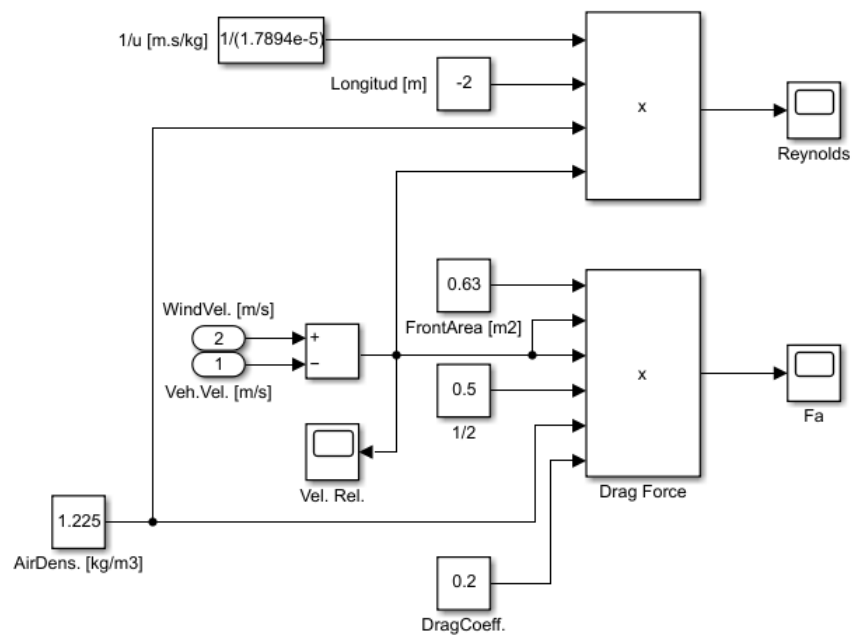
Este torque resultante se transmite a las ruedas, que a su vez reciben fuerzas normales del bloque "Vehicle Body" y, mediante los frenos, experimentan aceleración o desaceleración.

Al final del proceso, las ruedas retroalimentan al "Vehicle Body" con el desplazamiento horizontal, que en última instancia determina la velocidad del vehículo para su comparación y validación.

**Subsistema: Aerodynamics**

**Figura B3**

*Subsistema Aereodynamics*

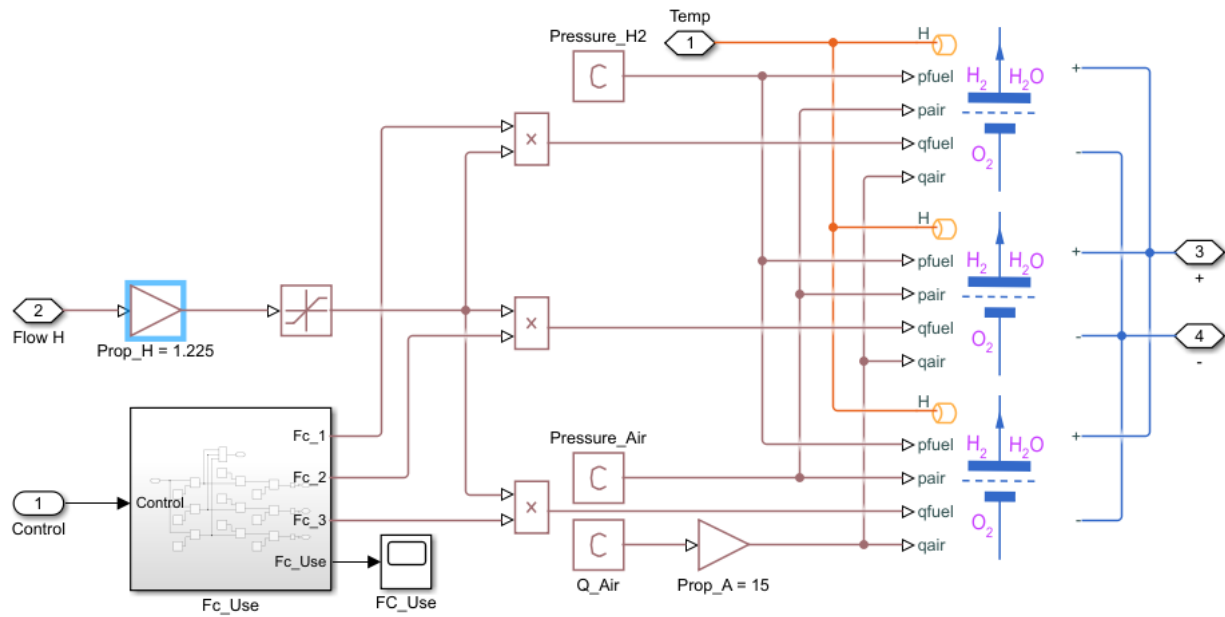
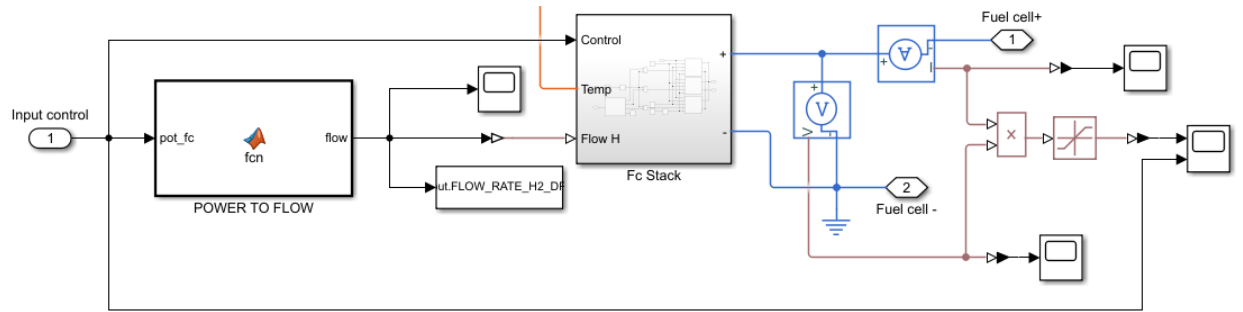


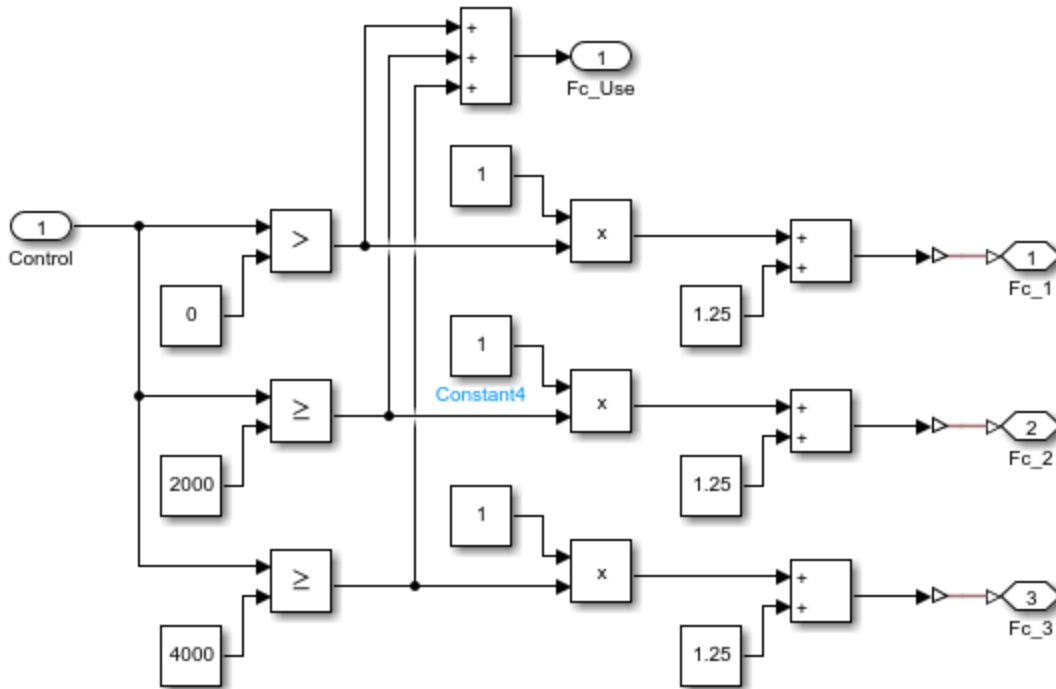
Esta interconexión de bloques permite calcular la Fuerza de Arrastre del vehículo y el Número de Reynolds para el Aire, al replicar las ecuaciones con las que se obtienen. De este modo se conoce una de las principales fuerzas en el análisis aerodinámico y mediante el número de Reynolds se puede saber si el flujo del aire es Laminar, Turbulento o de Transición.

**Subsistema: Fuel Cell**

**Figura B4**

*Subsistema Fuel Cell*





Este subsistema simula el uso de las celdas de combustible, en su primera imagen se aprecia la conexión general, usando el bloque POWER TO FLOW se consigue el flujo de hidrógeno para suplir la demanda de potencia de las celdas de combustible según indique el EMS, luego se tiene el bloque FC Stack, que en sus terminales positivas y negativas cuenta con los bloques necesarios para calcular la potencia.

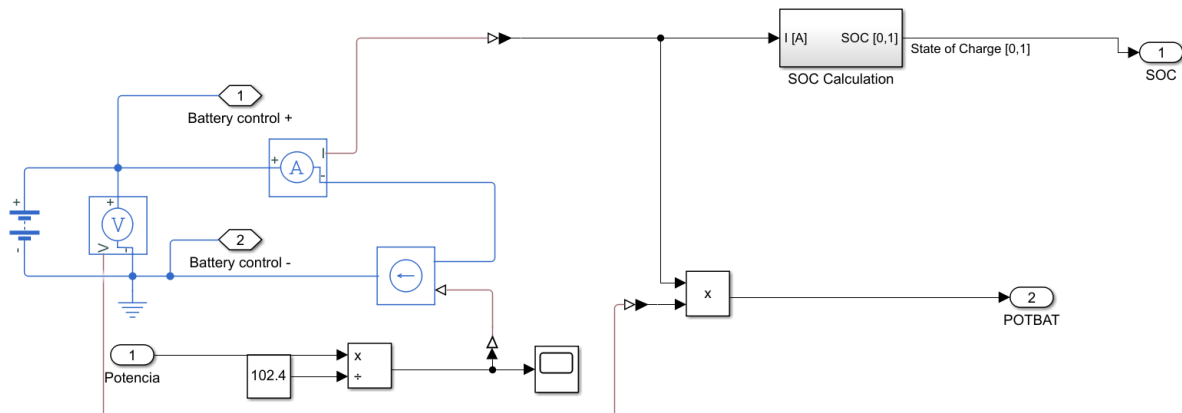
En la segunda imagen se detalla el bloque FC Stack, que interconecta las 3 celdas de combustible, el flujo de hidrógeno y el control de cada celda, de esto último se encarga el bloque FC Use. También se tienen constante de proporción para un ajuste de la potencia del FC Stack.

En la última imagen se tiene la lógica detrás del FC Use, que solo habilita una celda de combustible dependiendo de la potencia necesaria, así que cada celda la controla su flujo, si tiene un flujo bajo, es como si no aportara energía, y si es alto, entonces aportaría toda la energía posible.

## Subsistema: Battery

Figura B5

Subsistema Battery



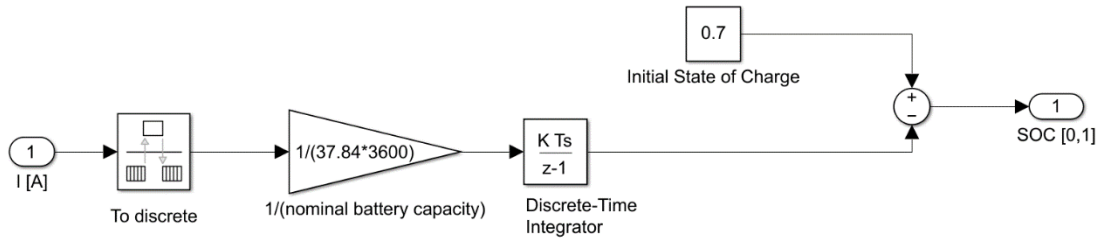
En la figura B5, se presenta el bloque "Battery". Su entrada se origina en la potencia de control, determinada mediante el sistema de gestión y control energético. Las salidas están representadas por las conexiones positiva y negativa (+ y -) hacia el convertidor, además de la potencia modelada por la batería y el estado de carga.

El funcionamiento comienza con la conversión de la potencia de control en corriente, la cual atraviesa la batería, dando lugar a las salidas que corresponden a la potencia, el estado de carga y las terminales + y - para el convertidor.

**Subsistema: SOC Calculation**

**Figura B6**

*Subsistema SOC Calculation.*

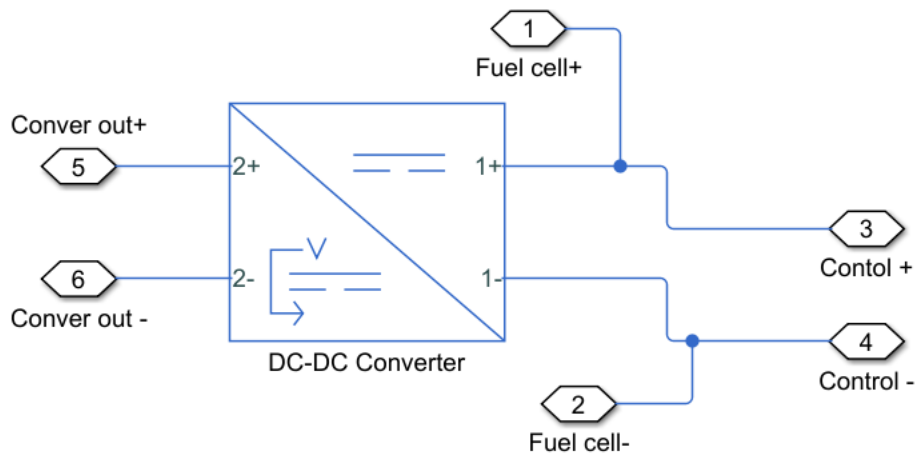


La figura B6 ilustra el cálculo del estado de carga. El funcionamiento se fundamenta en la ecuación 2.20. Esta ecuación acepta como entrada la corriente, el estado de carga inicial de la batería y la capacidad nominal de la misma. Como resultado, se obtiene el estado de carga actualizado.

**Subsistema: Converter Control**

**Figura B7**

*Subsistema Converter Control*

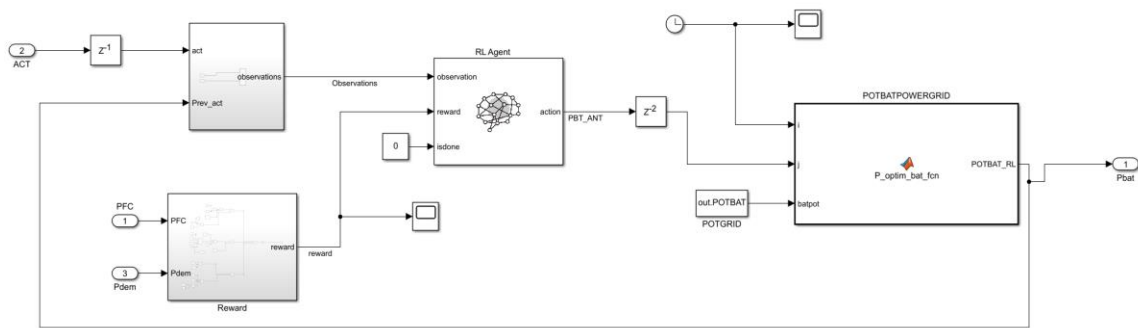


La figura B7 presenta el subsistema "Converter control", en el que se emplea un bloque DC-DC Converter bidireccional para regular y gestionar la energía eléctrica originada tanto en la batería como en la celda de combustible. Este bloque recibe como entrada la energía eléctrica generada por ambas fuentes y se conecta al motor, el cual debe producir la potencia requerida por el ciclo de manejo

**Subsistema: Reinforcement Learning**

**Figura B8**

*Subsistema Reinforcement Learning*



La figura B8 exhibe el subsistema de RL dentro de la propuesta de solución presentada. En este subsistema, las entradas son la potencia de la celda, que resulta de la diferencia entre la potencia requerida y la potencia de la batería calculada por el algoritmo, la potencia actual de la batería según el modelo, y la potencia previa de la batería, que es la potencia seleccionada por el agente en pasos anteriores.

El funcionamiento del subsistema se basa en los principios del RL. Aquí, el agente entrena el modelo utilizando observaciones y recompensas generadas. Las observaciones consisten en las potencias actual y previa de la batería. Las recompensas se determinan a partir de la ecuación 2.31. En cada episodio, el agente genera un número en el rango de 0 a 150, el cual se introduce en el

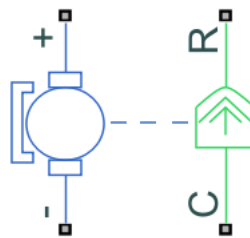


bloque de la función "POTBATPOWERGRID". Este bloque selecciona la potencia correspondiente al índice generado por el agente. Luego, el agente recibe una recompensa basada en la potencia elegida. Este proceso continúa hasta que se alcance la convergencia.

## Apéndice C – Configuración y Bloques de Simulink

**Figura C1**

*Configuración bloque: Motor DC*



Settings		
Electrical Torque	Mechanical	Faults
Field type:	Permanent magnet	
Model parameterization:	By rated load and speed	
Armature inductance:	12e-6	H
No-load speed:	6000	rpm
Rated speed (at rated load):	4032	rpm
Rated load (mechanical power):	16	kW
Rated DC supply voltage:	96	V
Rotor damping parameterization:	By damping value	

## Figura C2

Configuración bloque: Battery

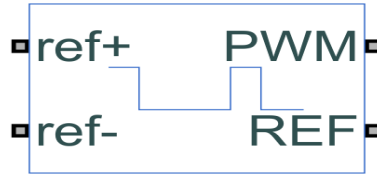


Settings

Main	Dynamics	Fade	Calendar Aging	Variables
Nominal voltage, Vnom:	102.4	V		
Current directionality:	Disabled			
Internal resistance:	0.00001	Ohm		
Battery charge capacity:	Finite			
Ampere-hour rating:	37.84	hr*A		
Voltage V1 when charge is AH1:	102	V		
Charge AH1 when no-load voltage is V1:	37	hr*A		
Self-discharge:	Disabled			
Open-circuit measurement temperature:	298.15	K		

### Figura C3

Configuración bloque: Controlled PWM



Settings

PWM Input Scaling Output Voltage

PWM frequency: 1000 Hz

Simulation mode: Averaged

Settings

PWM Input Scaling Output Voltage

Input voltage for 0% duty cycle: 0 V

Input voltage for 100% duty cycle: 5 V

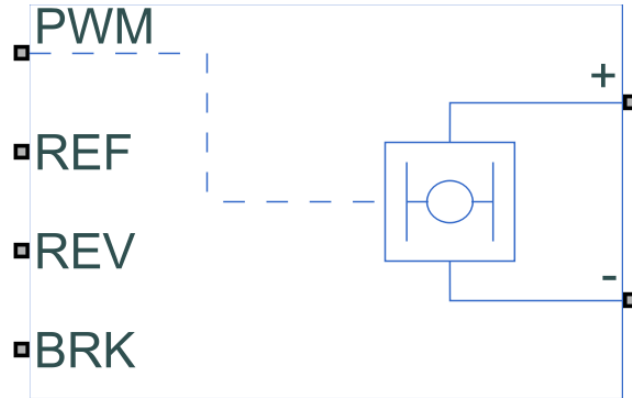
Settings

PWM Input Scaling Output Voltage

Output voltage amplitude: 60 V

## Figura C4

Configuración bloque: H Bridge



### Settings

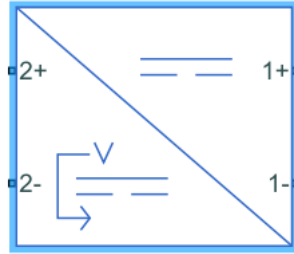
Simulation Mode & Load Assumptions	Input Thresholds	Bridge Parameters
Enable threshold voltage:	2.5	V
PWM signal amplitude:	5.0	V
Reverse threshold voltage:	2.5	V
Braking threshold voltage:	2.5	V

### Settings

Simulation Mode & Load Assumptions	Input Thresholds	Bridge Parameters
Output voltage amplitude:	150	V
Total bridge on resistance:	0.1	Ohm
Freewheeling diode on resistance:	0.05	Ohm

## Figura C5

Configuración bloque: DC/DC Converter



Settings

Main Losses Dynamics Faults

Voltage reference: Internal

Output voltage reference demand: 12.8 V

Rated output power: 10 W

Droop parameterization: By voltage droop with output current

Output voltage droop with output current: 3 V/A

Power direction: Bidirectional power flow

Maximum expected supply-side current: 25 A

Settings

Switching Device Diode LC parameters Snubbers Variables

Inductance: 1e-6 H

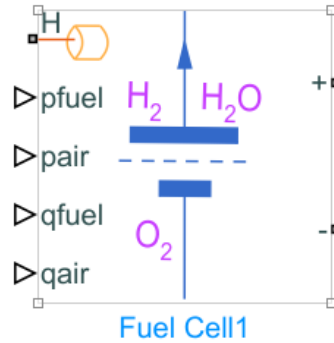
Inductor series resistance: 0 Ohm

Capacitance: 1e-7 F

Capacitor effective series resistance: 1e-6 Ohm

## Figura C6

Configuración bloque: Fuel Cell



Block Parameters: Fuel Cell

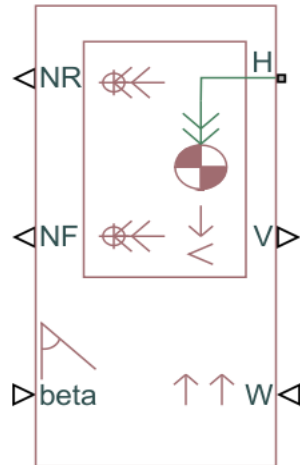
Fuel Cell  Auto Apply

Settings Description

NAME	VALUE
<b>▼ Main</b>	
Model fidelity	Detailed with physical inputs
> Open-circuit voltage	28.8 V
> Tafel slope	0.1 V
> Internal resistance	0.1 Ohm
> Nominal exchange current	70 A
> Collapse current	90 A
> Number of cells per module	48
> Module units (Series)	1
<b>▼ Supply</b>	
> Nominal H2 pressure	1.025 bar
> Nominal O2 pressure	0.9 bar
> Concentration H2 in fuel (%)	99.995
> Concentration O2 in air (%)	21
> Concentration vapor in air (%)	0

## Figura C7

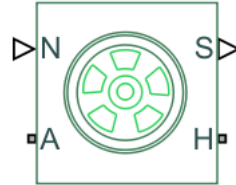
Configuración bloque: *Vehicle*



Settings			
Main	Drag	Pitch	Variables
Mass:	260		kg
Number of wheels per axle:	2		
Horizontal distance from CG to front axle:	1.4		m
Horizontal distance from CG to rear axle:	1.6		m
CG height above ground:	0.5		m
Externally-defined additional mass:	Off		
Gravitational acceleration:	9.81		m/s <sup>2</sup>
Negative normal force warning:	Off		

## Figura C8

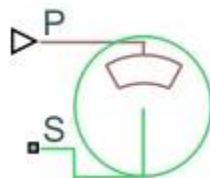
Configuración bloque: Tire



Settings	Description
NAME	VALUE
▼ Main	
Parameterize by	Peak longitudinal force and corresponding slip ▼
> Rated vertical load	3000 N ▼
> Peak longitudinal force at rated load	3500 N ▼
> Slip at peak force at rated load (percent)	10

## Figura C9

Configuración bloque: Disc Brake

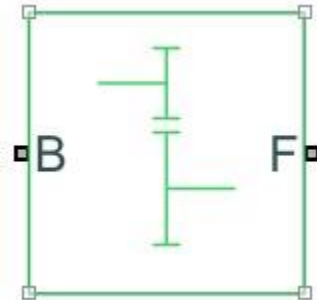


Settings	Description
NAME	VALUE
▼ Geometry	
> Mean pad radius	150 mm ▼
> Cylinder bore	10 mm ▼
> Number of brake pads	2



## Figura C10

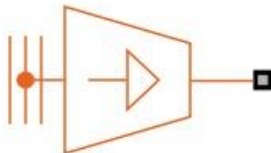
Configuración bloque: Simple Gear



Settings	Description
NAME	VALUE
▼ Main	
> Follower (F) to base (B) teeth ratio (NF/...	7
Output shaft rotates	In same direction as input shaft ▼

## Figura C11

Configuración bloque: Temperature Source



Settings	Description
NAME	VALUE
▼ Parameters	
> Temperature	30 degC ▼

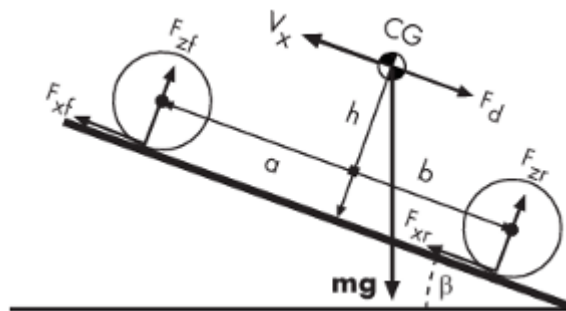
## Apéndice D – Modelos Matemáticos

### Modelo de Vehicle

El bloque “Vehicle Body” genera los resultados basándose en un diagrama de cuerpo libre simplificado donde interactúan la mayoría de las fuerzas que afectan al vehículo:

#### Figura D1

Diagrama de cuerpo libre del vehículo



A partir de ello se pueden conseguir las ecuaciones que describen su velocidad, fuerza en X y fuerza de arrastre aerodinámica:

$$m \cdot V_x = F_x - F_d - mg \cdot \sin\beta \quad (D1)$$

$$F_x = n(F_{xf} + F_{xr}) \quad (D2)$$

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A (V_x + V_w)^2 \cdot \text{sgn}(V_x + V_w) \quad (D3)$$

$g$ : es la gravedad.

$\beta$ : es el ángulo de inclinación.

$m$ : es la masa del vehículo.

$h$ : es la altura del centro de gravedad (CG) del vehículo sobre el suelo.

$V_x$ : es la velocidad del vehículo.

$V_w$ : es la velocidad del viento.

$n$ : es el número de llantas por cada eje.

$F_{xf}, F_{xr}$ : son las fuerzas longitudinales en cada rueda en los puntos de contacto con el suelo delantero y trasero, respectivamente.

$A$ : es el área transversal efectiva del vehículo frontal.

$C_d$ : es el coeficiente de arrastre aerodinámico.

$\rho$ : es la densidad de masa del aire.

$F_d$ : es la fuerza de arrastre aerodinámica.[28]

### ***Modelo de Tire***

En este bloque se puede obtener fácilmente la traslación que realiza la llanta mediante la siguiente formula:

$$V_x = r_w \Omega \quad (D4)$$

$V_x$ : es la velocidad longitudinal de la rueda.

$r_w$ : es el radio de la llanta.

$\Omega$ : es la velocidad angular.

Para la simulación no se toman en cuenta aspectos como el deslizamiento o la deformación, razón por la que no se presentan ecuaciones que involucren dichas variables.[41]

### ***Modelo de Disc Brake***

El modelo matemático de este bloque depende de la velocidad angular, si la llanta se encuentra en movimiento, es decir,  $\Omega \neq 0$ . Entonces, el torque de frenado se consigue con:

$$T = \frac{\mu_k P \pi D_b^2 R_m N}{4} \quad (D5)$$

En cambio, al momento en que la llanta se detenga,  $\Omega = 0$ , el coeficiente  $\mu_k$  se cambia por  $\mu_s$ , dejando el resto de los elementos de la ecuación idénticos.

$T$ : es el torque de frenado.

$P$ : es la presión aplicada al freno.

$N$ : es el número de placas de freno en el disco.

$\mu_s$ : es el coeficiente de rozamiento estático para la placa de freno en el disco.

$\mu_k$ : es el coeficiente de rozamiento cinético para la placa de freno en el disco.

$D_b$ : es el diámetro interior del actuador del freno.

$R_m$ : es el radio medio de aplicación de la fuerza de la pastilla de freno en el rotor del freno.

El cual está dado por la ecuación:  $R_m = \frac{R_o + R_i}{2}$ , siendo:

$R_o$  y  $R_i$  el radio exterior e interior de la pastilla de freno, respectivamente.[42]

### ***Modelo de Simple Gear***

Este bloque representa una caja de cambio para los ejes de transmisión del vehículo. Su principal ecuación es:

$$r_F \omega_F = r_B \omega_B \quad (D6)$$

$r_F$ : es el radio del engranaje seguidor.

$\omega_F$ : es la velocidad angular del engranaje seguidor.

$r_B$ : es el radio del engranaje base.

$\omega_B$ : es la velocidad angular del engranaje base.[43]

### ***Modelo de Convective Heat Transfer***

Este bloque representa la transferencia de calor por convección entre 2 cuerpos, su principal ecuación resulta ser una modificación de la ley del enfriamiento de Newton:

$$Q = kA(T_A - T_B) \quad (D7)$$

$Q$ : es el flujo de calor.

$k$ : es el coeficiente de transferencia de calor por convección.

$A$ : es el área de la superficie de contacto entre los cuerpos.

$T_A, T_B$ : son las temperaturas de los cuerpos.[44]

## Modelo de Conductive Heat Transfer

Este bloque representa la transferencia de calor por conducción entre 2 cuerpos, su principal ecuación resulta ser otra modificación de la ley del enfriamiento de Newton:

$$Q = k \frac{A}{D} (T_A - T_B) \quad (D8)$$

$Q$ : es el flujo de calor.

$k$ : es la conductividad térmica del material.

$A$ : es el área de la superficie de contacto entre los cuerpos.

$D$ : es el espesor del material.

$T_A, T_B$ : son las temperaturas de los cuerpos.[45]

## Apéndice E – Entrenamiento de RL

### Figura E1

#### Curva de entrenamiento

