



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

**MODELADO Y CONTROL DE UN SISTEMA DE
PROPULSIÓN HÍBRIDO**

T E S I S

PRESENTADA POR

ALFONSO PANTOJA VÁZQUEZ

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERÍA
(ELÉCTRICA)**

DIRIGIDA POR

DR. LUIS ÁLVAREZ ICAZA LONGORIA

Ciudad Universitaria, Febrero de 2006

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Tang Xu Yu

Secretario: Dr. Espinosa Pérez Gerardo

Vocal: Dr. Álvarez Icaza Longoria Luis Agustín

1er. Suplente: Dr. Romero López Alejandro

2do. Suplente: Dr. Moreno Pérez Jaime

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería, Ciudad Universitaria, D.F.

TUTOR DE TESIS

Dr. Luis Agustín Álvarez Icaza Longoria

Firma

Índice General

Índice de Figuras	iv
Índice de Tablas	vi
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	2
1.1.1 Vehículos híbridos en la actualidad	3
1.1.2 Vehículos híbridos en México	5
1.1.3 Control	5
1.2 Enfoque del trabajo	6
1.3 Alcance	7
1.4 Organización	7
2 Modelado	8
2.1 Motor de combustión interna	9
2.1.1 Modelo usando redes neuronales	9
2.1.2 Modelo detallado	12
2.1.3 Modelo reducido	17
2.2 Motor eléctrico	24
2.3 Acoplamiento mecánico	29
2.4 Batería	32
3 Control del sistema de propulsión híbrido	35
3.1 Control basado en reglas	35
3.2 Control de cambios	42
4 Resultados	44
4.1 Ciclos de manejo	44
4.2 Mapas de eficiencia	46
4.3 Resultados de la simulación	48
4.3.1 Ciclo UDDS	48
4.3.2 Ciclo HWFET	63
4.3.3 Comparación con vehículo convencional	68

5 Conclusiones	70
5.1 Conclusiones	70
5.2 Trabajo futuro	71
A Diagramas	73
Bibliografía	77
Nomenclatura	81

Índice de Figuras

2.1	Sistemas de propulsión convencional	9
2.2	Sistemas de propulsión eléctrico	9
2.3	Sistemas de propulsión híbrido paralelo	10
2.4	Topología de la red	11
2.5	Estructura de identificación	12
2.6	Diagrama a bloques del modelo usado por B. K. Powell en [8]	12
2.7	Diagrama de un MCI	18
2.8	Caracterización normalizada del acelerador	19
2.9	Influencia normalizada de la relación de presión	20
2.10	Influencia normalizada aire combustible	22
2.11	Influencia normalizada de la chispa	23
2.12	Circuito equivalente para el eje q	27
2.13	Circuito equivalente para el eje d	27
2.14	Diagrama esquemático de la configuración del sistema de propulsión híbrido	30
2.15	Sistema mecánico	31
2.16	Cambio de inercia de MCI	32
3.1	Modo división de potencia	38
3.2	Modo de frenado cuando $EDC \leq EDC_{max}$	39
3.3	Modo recarga de baterías	41
3.4	Banda de histéresis	42
4.1	Ciclo de manejo urbano de la EPA, UDDS	45
4.2	Ciclo de manejo en carretera de la EPA, HWFET	46
4.3	Mapa de eficiencia de un MCI en $\frac{g}{kW-hr}$	47
4.4	Seguimiento de velocidad para el ciclo UDDS. ω_d es la velocidad deseada y ω_v es la velocidad alcanzada por el vehículo	49
4.5	Error de seguimiento de velocidad para el ciclo UDDS.	50
4.6	EDC para el ciclo UDDS.	51
4.7	Potencia del MCI y del ME.	52
4.8	Potencia del MCI y del ME.	52
4.9	Puntos de operación del MCI.	53
4.10	Puntos de operación del ME.	54

4.11 a) y b) Flujo de aire que sale del múltiple y entra a la cámara de combustión. c) y d) masa de aire en el múltiple de entrada.	55
4.12 a) y b) Flujo de combustible que entra a la cámara de combustión. c) y d) Relación aire-gasolina de la mezcla que entra en la cámara de combustión. .	56
4.13 a) y b) Velocidad angular del MCI.	57
4.14 a) y b) Flujos magnéticos en el estator.	58
4.15 a) y b) Flujos magnéticos en el rotor.	59
4.16 a) y b) Velocidad angular del ME.	60
4.17 Ciclo UDDS con EDC inicial bajo.	61
4.18 Ciclo UDDS con EDC inicial alto.	62
4.19 Seguimiento de velocidad para el ciclo HWFET. ω_d es la velocidad deseada y ω_v es la velocidad alcanzada por el vehículo	63
4.20 Error de seguimiento de velocidad para el ciclo HWFET.	64
4.21 EDC para el ciclo HWFET.	64
4.22 Puntos de operación del MCI para ciclo HWFET	65
4.23 HWFET con EDC inicial bajo.	

Capítulo 1

Introducción

La búsqueda para economizar combustible, reducir emisiones contaminantes y proporcionar vehículos más atractivos al consumidor, sin sacrificar desempeño, seguridad, rentabilidad y, en general, las características de los vehículos convencionales de hoy en día, ha hecho que el desarrollo de la tecnología híbrida (motorización térmica y eléctrica) sea un reto para los investigadores y para la industria automotriz [22].

Una de las motivaciones para el desarrollo de los vehículos híbridos eléctricos (VHE) ha sido la limitación de las baterías de los vehículos eléctricos, en el sentido del rango de funcionamiento y desempeño [19]. Sin embargo, al incluir una fuente de energía auxiliar, como un motor de combustión interna (MCI), se puede extender sustancialmente dicho rango y mejorar además la economía del vehículo, mientras que a la vez se minimiza la contaminación asociada a un vehículo convencional.

Los vehículos híbridos usan al menos dos fuentes de energía para su propulsión; generalmente, una combinación de motor eléctrico (ME) y MCI [9]. Con el ME se ayuda a mantener al MCI en su intervalo de funcionamiento óptimo y también se puede recobrar energía cinética durante el frenado, mientras que con el MCI se obtiene, en caso de estar disponible, potencia para hacer funcionar al ME como generador y cargar así las baterías, necesarias para la operación del ME. El objetivo de los VH es reducir emisiones contaminantes y consumo de combustible significativamente, tomando como referencia los vehículos convencionales. Estos objetivos pueden ser alcanzados de diferentes maneras en el campo

de la ingeniería. Por ejemplo, reducir el peso del vehículo, mejorar el control del MCI, diseñar mejores partes mecánicas, etc. Entre todas estas posibilidades, se supondrá que los componentes son fijos y se buscará como administrar los flujos de energía en el sistema de propulsión. En otras palabras, una vez seleccionada una configuración, se trata de seleccionar la mejor estrategia de control.

Para alcanzar el objetivo de minimizar combustible y reducir emisiones contaminantes, se han propuesto trabajos enfocados principalmente en dos diferentes líneas. Una es el modelado, desarrollo de nuevas configuraciones y análisis de los diferentes sistemas que componen a un vehículo híbrido y que enfoca muy poco en el control de la administración de la potencia. La otra línea está enfocada en el desarrollo de estrategias de control para la administración de potencia.

1.1 Antecedentes

La idea de sistemas de propulsión híbridos no es algo nuevo, ya que desde hace tiempo se usa este tipo de sistemas de propulsión, pero en la actualidad han tomado mucho auge como sistema de propulsión para los vehículos usados para transporte personal. Ejemplos de los sistemas híbridos usados con antelación son los trenes de diesel (MCI y ME), submarinos (Reactor o MCI y ME), motocicletas con pedales (MCI y humano), etc, ya que usan al menos dos fuentes de energía.

Si se hace una recapitulación [4], se puede ver cómo han evolucionado:

- 1979** Dave Arthurs de Springdale, Arkansas, gastó \$1500 USD en transformar un Opel GT convencional en un vehículo híbrido, el cual podía dar 75 millas por galón (mpg) (31.88 Km/L), usando un motor de combustión interna marca lawnmower de seis hp, un motor eléctrico de 400 A, y un arreglo de baterías de 6 V.
- 1997** El Toyota Prius sale a la venta al público en Japón. En el primer año se vendieron cerca de 18,000 unidades.
- 1999** Honda liberó el Insight de dos puertas, el primer vehículo híbrido que se vendió masivamente en EUA. El Insight ganó varios premios, y tuvo un consumo de combustible

de 61 mpg (25.9 Km/L) en ciudad y 70 mpg (29.75) en carretera.

- 2000** Toyota liberó el Toyota Prius, el primer sedan híbrido de cuatro puertas disponible en EUA.
- 2002** Honda introduce el Honda Civic híbrido, su segundo vehículo híbrido comercialmente disponible en EUA. La apariencia y manejo del Civic híbrido es idéntico a el Civic convencional.
- 2004** El Toyota Prius II ganó el premio del auto de año por la revista Motor Trend Magazine y en el Auto Show de Norte América. Toyota fue sorprendido por la demanda, y elevó su producción de 36,000 a 47,000 para el mercado de EUA. Los compradores interesados esperaron hasta seis meses para comprar su Prius 2004. En septiembre Ford liberó el Escape híbrido, el primer vehículo híbrido de EUA y el primer "Sport Utility Vehicle"(SUV) (vehículo de uso familiar y de esparcimiento).

1.1.1 Vehículos híbridos en la actualidad

En la actualidad ya hay variedad de vehículos híbridos a la venta, en especial en el mercado de EUA. Esto muestra su viabilidad y la aceptación que se está teniendo de estos. Una de las principales razones de esta aceptación es el alza en el precio de los combustibles derivados del petróleo (gasolina y diesel). En la tabla 1.1 se muestran los vehículos disponibles a la venta en el mercado de EUA, además de su consumo de combustible [4].

Compactos y Sedanes		
Modelo	Disponibilidad	Rendimiento ciudad/carretera (Km/L)
Chevrolet Malibu	Se espera en 2007	N/D
Honda Accord	A la venta	12.75/12.72
Honda Civic	A la venta	20.4/21.6
Honda Insight	A la venta	25.9/28.9
Nissan Altima	Se espera en 2006	N/D
Toyota Camry	Se espera en 2007	N/D
Toyota Prius	A la venta	25.5/21.6
Lexus GS	Se espera en 2006	N/D
SUVs y Minivans		
Modelo	Disponibilidad	Rendimiento ciudad/carretera (Km/L)
Chevrolet Tahoe	Se espera en 2007	N/D
Dodge Durango	Se espera en 2007	N/D
Ford Escape SUV	A la venta	15.3/13.17
GMC Yukon	Se espera en 2007	N/D
Lexus RX 400h SUV	A la venta	13.17/11.47
Toyota Highlander SUV	A la venta	13.17/11.47
Mercury Mariner SUV	A la venta	N/D
Porsche Cayenne	Se espera en 2008	N/D
Saturn VUE	Se espera en 2006	n
Toyota Sienna Minivan	Se espera en 2007	N/D
Camiones		
Modelo	Disponibilidad	Rendimiento ciudad/carretera (Km/L)
Dodge Ram	Se espera en 2006	N/D
GM Silverado y Sierra	A la venta	N/D

Tabla 1.1: Tabla de consumo y de vehículos híbridos disponibles y esperados en el mercado de EUA [4]

1.1.2 Vehículos híbridos en México

Vehizero es una empresa mexicana que está desarrollando vehículo híbridos, fue constituida en 1999 y está ubicada en la Cd. de México. Actualmente está desarrollando dos tipos de vehículos, uno es un camión de carga dirigido al mercado de reparto urbano que está en etapa de prueba y tiene las siguientes características:

- Velocidad máxima de 100 Kms/Hr.
- Capacidad de carga de 1.5 Tons.
- Rango de operación de 80 Kms en modo eléctrico.
- Se incrementa a 120 Kms en modo híbrido.
- Configuración de híbrido serie.

El otro vehículo está siendo diseñado específicamente para cumplir la función de taxi. Cuenta con una configuración de híbrido paralelo y se encuentra en etapa de desarrollo.

1.1.3 Control

En lo que se refiere al modelado del sistema de propulsión se han desarrollado modelos de sistemas híbrido serie [21, 18, 19], configuración paralelo [19, 10, 7], también hay trabajos donde se considera al vehículo híbrido con elementos innovadores o que no se habían considerado con anterioridad tal como transmisiones de variación continua (CVT) [20, 3]. Otros trabajos consideran un CVT y una masa inercial (flywheel) para almacenar energía [25]. En [2] se agrega un ultracapacitor al vehículo para mejorar el desempeño de la batería cuando hay picos de corriente. Otro ejemplo del uso de ultracapacitores en vehículos híbridos se desarrolla en [5]. Dónde se suple a la batería por un banco de ultracapacitores como medio de almacenamiento de energía eléctrica aparte. Para la parte del modelado del motor de combustión interna hay diferentes trabajos, ya que este modelo es de especial dificultad, tal es el caso de [19, 15, 26, 16]. En [27] se desarrolla el modelo de un motor de combustión interna híbrido, es decir, el motor está directamente acoplado con un generador-motor eléctrico.

El término **administración de potencia**, se refiere al diseño de un algoritmo de control que determina el nivel apropiado de potencia a generar, y la división de la potencia entre las dos fuentes de potencia [14]. Las estrategias de control para la administración de potencia pueden ser clasificadas en tres categorías: a) técnicas de control heurísticas como lo son control basado en reglas, lógica difusa y redes neuronales [22, 11, 13, 12], b) las técnicas de optimización con programación dinámica [23, 14, 9, 24] y c) métodos basados en la conversión de la potencia eléctrica en su equivalente de consumo de combustible [17].

1.2 Enfoque del trabajo

En este trabajo se desarrolla el modelo dinámico de los subsistemas principales que conforman un vehículo híbrido, el MCI, el ME y la batería, además se modelan las interconexiones entre estos subsistemas. Este modelo del vehículo híbrido fue diseñado de tal manera que se pueda cambiar fácilmente el controlador de más alto nivel, es decir, es útil para probar diferentes algoritmos de administración de potencia ya que a cada subsistema se le da un valor de referencia y tiene un controlador independiente para ajustarse a la referencia. En este sistema, la posición del acelerador se considera como la demanda de potencia del conductor. Para la simulación, se considera el error entre la velocidad deseada y la alcanzada por el vehículo.

Otra parte importante de este trabajo es el diseño de un control de administración de potencia. En este trabajo se realizó el diseño de un controlador basado en reglas para controlar el flujo de potencia en los diferentes subsistemas del vehículo híbrido. Este controlador es uno de los más básicos para la administración de potencia de un vehículo híbrido, pero a su vez es uno de los más usados y tomados como referencia para comparación con otros algoritmos de control. Éste controlador está basado en los trabajos de [22, 14], pero su diseño es tomado de la intuición ingenieril y de los mapas de eficiencia del ME, MCI y de la batería. Esto es debido que en una buena parte de este trabajo se desarrolla el modelado y se buscó usar una estrategia de control simple de aplicar al modelo. Para probar el algoritmo de control se usaron algunos ciclos de manejo oficiales en Japón, en USA y en la UE [1].

1.3 Alcance

En este trabajo se pretende desarrollar un modelo de un sistema de propulsión de un vehículo híbrido y desarrollar un algoritmo de control básico para el funcionamiento de éste. En la bibliografía revisada es muy tajante la división entre el desarrollo de un modelo detallado para control y de la forma de interconexión de los subsistemas con el desarrollo de estrategias de control de potencia para los vehículo h

Capítulo 2

Modelado

Un automóvil está hecho de la combinación de muchos sistemas no lineales. Uno de estos es el sistema de propulsión. El sistema de propulsión de un vehículo convencional consiste en una planta de potencia, una transmisión y un sistema de tracción que incluye un diferencial, flechas y llantas. Además hay que incorporar accesorios adicionales, como dirección asistida, frenos asistidos y aire acondicionado. El sistema de propulsión es una conjunción de dispositivos eléctricos, mecánicos, químicos y termodinámicos interconectados como un sistema dinámico no lineal, y su objetivo principal es proveer la potencia necesaria para transporte [18].

La configuración de un vehículo híbrido paralelo consiste en la combinación de un sistema de propulsión de un vehículo eléctrico y un sistema de propulsión de un vehículo convencional que puede proveer tracción en las llantas simultáneamente, es decir, el sistema de propulsión de un vehículo híbrido paralelo tiene la capacidad de funcionar con el motor eléctrico, con el motor de combustión interna o con ambos. Además de tener la capacidad de frenado regenerativo.

Para tener más clara la idea de la diferencia entre los sistemas de propulsión de un vehículo híbrido, de un vehículo convencional y de un vehículo eléctrico, y en consecuencia saber qué elementos es necesario simular, en las figuras 2.1, 2.2 y 2.3 se muestra hacia donde puede fluir la energía en los sistemas de propulsión convencional, eléctrico e híbrido, respectivamente y cuáles son sus elementos principales.

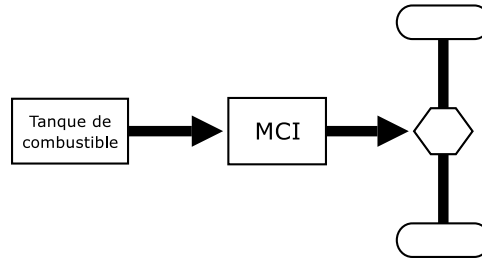


Figura 2.1: Sistemas de propulsión convencional

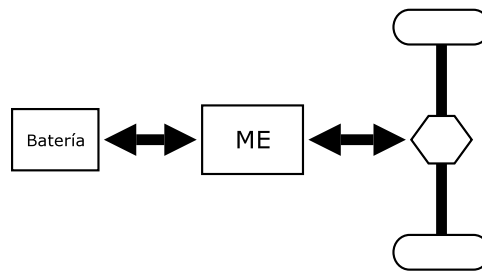


Figura 2.2: Sistemas de propulsión eléctrico

2.1 Motor de combustión interna

2.1.1 Modelo usando redes neuronales

Un MCI funciona de la siguiente manera, primero entra el aire, cuya cantidad depende del ángulo del acelerador, después, en el múltiple de entrada se inyecta combustible, el cual se mezcla con el aire y posteriormente esta mezcla entra en la cámara de combustión, luego estas etapas se repiten cada dos revoluciones de la flecha del motor. En la etapa en la que interviene la chispa es cuando se produce el par, al momento de ocurrir la explosión, y finalmente en el múltiple de salida se tiene el sensor de oxígeno, el cual manda una señal de retroalimentación [18], a través de un controlador al inyector de gasolina, usualmente un PI.

En lo que se refiere al modelado del MCI, el modelo dinámico se hace prácticamente de dos formas. Una es como en [26], que considera que el modelo de un MCI es muy complejo pues hay muchos parámetros inciertos, no se sabe con precisión la forma de algunas

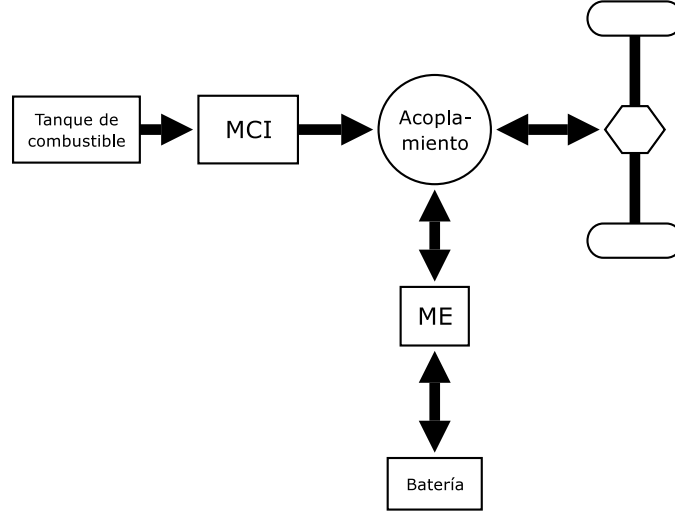


Figura 2.3: Sistemas de propulsión híbrido paralelo

ecuaciones y además las aproximaciones a curvas son limitadas. Entonces para modelar un MCI, intentando solucionar lo planteado anteriormente, se usa identificación con redes neuronales. El método planteado en [26] usa una red neuronal multicapa con anteaalimentación (feed forward) (RNMA), cuya topología se muestra en la figura 2.4. Si se asume a M como el total de capas de la RNMA (incluyendo entradas y salidas), donde la neurona (s, i) es la i -ésima neurona de la s -ésima capa y n_s el total de neuronas de la s -ésima capa, la operación para la neurona (s, i) se puede definir como sigue:

$$z_i^s = \begin{cases} x_i^1 & s = 1 \\ \sum_{k=1}^{n_{s-1}} w_{i,k}^s x_k^{s-1} & 2 \leq s \leq M \end{cases} \quad (2.1)$$

$$x_i^s = \begin{cases} z_i^1 & s = 1 \text{ o } M \\ f(z_i^s) & 2 \leq s \leq M - 1 \end{cases} \quad (2.2)$$

z_i^s es la entrada de la neurona (s, i) de la red, x_i^s es la salida de la neurona (s, i) , $w_{i,k}^s$ es la ponderación de la conexión entre la neurona $(s-1, k)$ y la neurona (s, i) , $f(\cdot)$ es una función de transferencia no lineal usada para describir la salida característica para una neurona artificial. En [26] la función sigmoide (2.3) se toma como la función de transferencia.

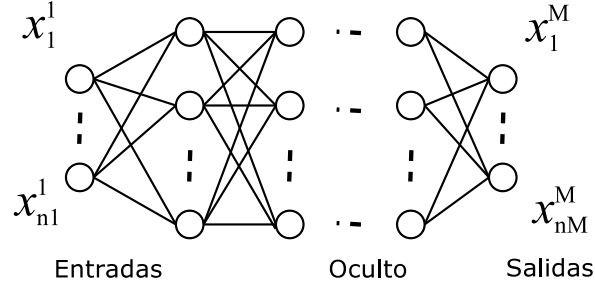


Figura 2.4: Topología de la red

$$f(x) = \frac{1 - \exp^{-2x}}{1 + \exp^{-2x}} \quad (2.3)$$

La estructura de la red neuronal de identificación usada en [26] se muestra en la figura 2.5, U es la entrada del MCI, y y es la salida del MCI. Con el trabajo de [26] es posible encontrar dos modelos; uno es el modelo donde la salida es el par,

$$U = [\alpha, w_e, \dot{w}_e], \quad y = T_e^D \quad (2.4)$$

y el otro modelo es con el consumo de combustible como salida

$$U = [\alpha, w_e, \dot{w}_e], \quad y = Q_t^D \quad (2.5)$$

donde, α es el ángulo del acelerador, w_e es la velocidad angular del motor, Q_t^D es el consumo de combustible y T_e^D es el par de salida del MCI.

Usando la entrada U del MCI como entrada a la red y el error e entre la salida y del MCI y la salida de la red \hat{y} como la señal de aprendizaje, el error e tenderá a cero finalmente por medio de la actualización de los valores de ponderación a través de un algoritmo de aprendizaje [26]. En este trabajo se usa un algoritmo de propagación de error hacia atrás.

El problema con este tipo de modelos es que son difíciles de usar y, principalmente, que es necesario hacer la identificación para cada motor, además de que es necesario el MCI físicamente o los datos de un MCI para obtener un modelo.

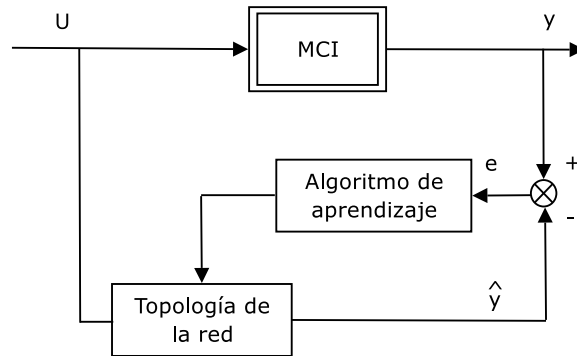


Figura 2.5: Estructura de identificación

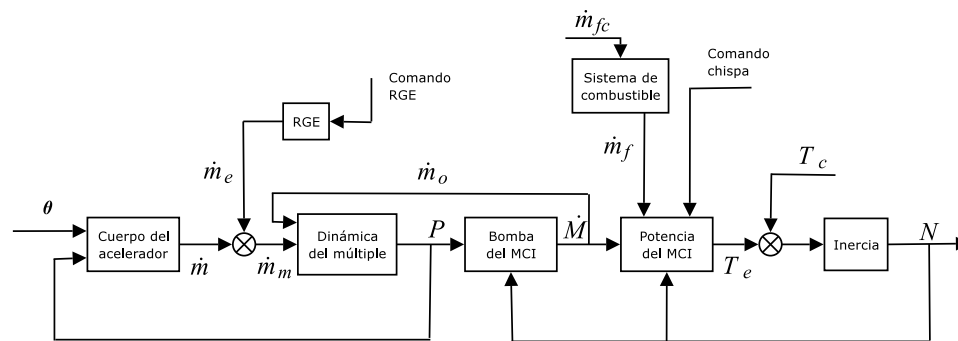


Figura 2.6: Diagrama a bloques del modelo usado por B. K. Powell en [8]

2.1.2 Modelo detallado

La otra forma de hacer el modelado es utilizar las relaciones físicas del MCI. El modelo presentado en [18] desarrolla de manera independiente y detallada los diferentes subsistemas de un MCI, el diagrama a bloques de las interconexiones del sistema modelado en [18] se muestra en la figura 2.6, el cual está basado en [8]. Este modelo está dividido en los siguientes subsistemas: flujo másico en el cuerpo del acelerador, bombeo del MCI, par del MCI, sistema de combustible y control de la dinámica de la relación aire gasolina, dinámica del múltiple de entrada y dinámica rotacional.

En [19] el **flujo de aire en el cuerpo del acelerador** se calcula como el flujo de masa a través de una válvula abierta, el cual está dado en términos del ángulo del acelerador y

la relación de presiones como

$$\dot{m} = A_e P_u \left[\frac{\gamma}{RT_u} \right]^{0.5} \phi \quad (2.6)$$

con

$$\phi = \begin{cases} \left(\frac{2}{\gamma-1} \right)^{1/2} \sqrt{\left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{(\gamma+1)/\gamma}} & \left\{ \left(\frac{P_d}{P_u} \right) > \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \right. \\ \left. \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/[2(\gamma-1)]} & \left. \left\{ \left(\frac{P_d}{P_u} \right) \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \right\} \right. \end{cases} \quad (2.7)$$

donde R es la constante de gas específico, P_u y T_u son la presión de salida y la temperatura antes de la garganta, P_d representa la presión después de la garganta, y γ es la relación entre los calores específicos a presión constante y a volumen constante.

El área efectiva, A_e , es definida en términos del área de flujo [18], A , y un coeficiente de descarga, C_d , el cual generalmente depende de varios parámetros geométricos y de flujo. Para obtener A_e es necesario aproximar una curva de segundo grado a datos obtenidos experimentalmente y que dependen de cada MCI en particular. En [18], se usaron datos experimentales para un motor de 1.0 l y se obtuvo

$$A_e = F(\theta) = C_d(\theta)A(\theta) = 3.765 - 0.1058\theta + 0.05479\theta^2 \quad (2.8)$$

donde θ es el ángulo del acelerador.

Bombeo al MCI. La dinámica del bombeo al MCI se calcula en [18] a través de un estimado de los flujos de masas de salida del múltiple de entrada y del que entra en el cilindro. Esta está dada aproximadamente por la velocidad del MCI, el desplazamiento y la eficiencia volumétrica, los cuales dependen de la velocidad del MCI, temperatura del producto de entrada, presión del múltiple y presión de los gases de escape. Entonces, la relación de masa \dot{M} que sale del múltiple está dada en términos de la presión del múltiple P y de la velocidad del MCI N en RPM por

$$\dot{M} = \frac{N}{1000} \left(0.58 + 0.0617 \frac{N}{1000} \right) (0.17P + 0.00098P^2) \quad (2.9)$$

donde

\dot{M} = velocidad de densidad del flujo de masa, kg/hr

N = velocidad del MCI, Revoluciones Por Minuto (RPM)

P = presión en el múltiple, kPa

Par del MCI. El par del MCI es generado a partir del proceso de combustión [18], el cual depende de la ignición de un cilindro cargado con aire, combustible y gases residuales, así como de otras variables y parámetros que influyen en la eficiencia de la combustión. Asumiendo avance de chispa, recirculación de gases residuales (E_g), y que la inyección de combustible esté calibrada en el MCI, una aproximación del par para un MCI pequeño (1.0l) es [18]

$$T_e = \alpha_0 + 1.28\dot{M} - 0.0016\dot{M}^2 + 56.48\frac{N}{1000} - 8.3144\left(\frac{N}{1000}\right)^2 + 1.393\left(\frac{N}{1000}\right)^3 - 0.034\left(\frac{N}{1000}\right)^4 - E_g \quad (2.10)$$

donde

$$\alpha_0 = -86.52 - 8.3144(A/C) + 1.28(A/C)^2 \quad (2.11)$$

y para $1000 \leq N \leq 7000$, RPM .

Dinámica del sistema de combustible y del control de la relación aire combustible. La estructura no lineal básica para el sistema de la relación aire combustible (A/C) en [18] consiste en un sensor de Oxígeno para los Gases de Escape (OGE) en el tubo de escape, con una constante de tiempo de alrededor de 70 ms, seguido por una función no lineal signo (Nernst) **rich/lean** y una ley de control, usualmente Proporcional Integral (PI), para el comando de combustible. Se considera un sistema de inyector de combustible y cuerpo de acelerador con flujo de combustible como salida, además se considera en la dinámica de este sistema la evaporación y condensación de combustible. El sistema de ecuaciones resultantes de lo anterior [18] es

$$\tau_f \frac{d\dot{m}_{fi}}{dt} = \dot{m}_{fc} - \dot{m}_{fi} \quad (2.12)$$

$$\tau_p \frac{d\dot{m}_p}{dt} = \eta \dot{m}_{fi} - \dot{m}_p \quad (2.13)$$

$$\dot{m}_f = (1 - \eta)\dot{m}_{fi} + \dot{m}_p \quad (2.14)$$

donde

\dot{m}_{fi} = flujo de combustible inyectado, kg/hr

\dot{m}_f = flujo de combustible en el múltiple, kg/hr

\dot{m}_p = velocidad de evaporación del combustible, kg/hr

\dot{m}_{fc} = comando de flujo de inyección de combustible deseado, kg/hr

τ_f = constante de tiempo del inyector ≈ 50 ms

η = parámetro de acumulación de combustible ≈ 0.25

τ_p = tiempo de evaporación y condensación ≈ 0.5 s

El flujo combustible es combinado con el flujo másico de aire del acelerador para formar la relación de aire combustible (A/C) del múltiple [18]. La mezcla así formada tiene primero un retraso inducido en la preparación de admisión para la generación de par, seguido por un retraso de la combustión al par, un retraso en la explosión-expulsión, y finalmente por un retraso de la chispa a la expulsión el cual depende de la localización del sensor OGE.

Dinámica del llenado del múltiple. Las ecuaciones dinámicas que resultan de usar principios termodinámicos [18] son

$$\dot{P} = \frac{R\gamma}{V}(T_i\dot{m}_m - T\dot{m}_o) + \frac{\gamma - 1}{V}\dot{Q}_m \quad (2.15)$$

$$mc_v\dot{T} = \dot{Q}_m + (C_pT_i - C_vT)\dot{m}_m - RT\dot{m}_o \quad (2.16)$$

donde

$$\begin{aligned}
 \dot{P} &= \text{presión en el múltiple, kPa/seg} \\
 \dot{m}_m &= \text{flujo másico de entrada en el múltiple, kg/seg} \\
 \dot{m}_o &= \text{flujo másico de salida en el múltiple kg/seg} \\
 \dot{T} &= \text{variación de temperatura en el múltiple, grados/seg} \\
 \dot{Q}_m &= \text{variación de flujo de calor en el múltiple} \\
 T_i &= \text{temperatura de la masa de entrada} \\
 m &= \text{masa en el múltiple en cualquier momento, kg} \\
 V &= \text{volumen del múltiple, } cm^3 \\
 C_v, C_p &= \text{Calor específico a volumen constante y a presión constante}
 \end{aligned}$$

Dinámica rotacional. El movimiento rotacional del cigüeñal está dado en términos del momento polar de inercia del MCI, aceleración angular, y la diferencia entre el par neto generado por el MCI y por el par de carga en la flecha de transmisión [18]. Asumiendo una relación de engranaje dada por $K_a = R_e/R_a$, eficiencia mecánica de 100% , engranes rígidos, sin juego mecánico o zona muerta, la aceleración del cigüeñal está dada por [18]

$$(J_e + J_{eq} + K_a^2 J_l) \dot{N} = (30/\pi)(T_e - K_a T_l) \quad (2.17)$$

donde

$$\begin{aligned}
 J_e &= \text{inercia de la masa giratoria (flywheel), } Nm \text{ seg}^2/\text{radian} \\
 J_{eg} &= \text{inercia del engranaje en la flecha del MCI, } Nm \text{ seg}^2/\text{radian} \\
 J_l &= \text{inercia de la carga, } Nm \text{ seg}^2/\text{radian} \\
 K_a &= \text{relación de engranaje del MCI a la carga} \\
 T_l &= \text{par de carga, } Nm \\
 R_e &= \text{radio del engrane de la flecha del MCI} \\
 R_a &= \text{radio del engrane de la flecha de transmisión}
 \end{aligned}$$

Como se puede ver, el modelo desarrollado en [18] es muy completo y se modela una gran parte de la dinámica del MCI, el problema es que se necesitan muchos parámetros, además

de que varias de las ecuaciones que describen al MCI son obtenidas experimentalmente y son diferentes para cada motor, lo cual hace a este modelo complicado para implementar.

2.1.3 Modelo reducido

Otro modelo basado en relaciones físicas es el modelo desarrollado en [6], este modelo es el que va a ser usado como referencia a lo largo de este trabajo para simular un MCI, esto es debido a que captura las principales características de un MCI de cuatro tiempos de ignición por chispa. En este modelo, así como en el mencionado anteriormente [18] y en [15], una gran parte de las ecuaciones han sido obtenidas experimentalmente, por lo que de un MCI no se conoce con precisión la estructura de algunas ecuaciones así como los parámetros de estas. Pero en general estos modelos de MCI funcionan bien desde el punto de vista de control.

El modelo del MCI presentado en este trabajo está basado en [6], el cual es un modelo de un MCI de seis cilindros de un auto de pasajeros de tamaño medio. Este modelo fue usado porque puede ser fácilmente redimensionado.

Este modelo es un modelo continuo con tres estados, el cual, a pesar de ser de orden reducido, tiene una buena representación de los efectos del acelerador, la dinámica del múltiple y la naturaleza discreta de un motor de cuatro tiempos. Los tres estados son: la masa de aire en el múltiple de entrada, la velocidad del motor y el flujo de combustible. Además de los tres estados, la naturaleza discreta de un motor de cuatro tiempos es capturada por el uso de retrasos de transporte: el retraso de la admisión a la producción de par y el retraso de la chispa a la producción de par. El tamaño del retraso varía con respecto a la velocidad del motor, y por ello con el tiempo, debido a que estos dependen del ángulo de rotación del cigüeñal.

La ecuación de estado para la masa de aire en el múltiple de entrada se obtiene al considerar la conservación de masa [6]

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao} \quad (2.18)$$

donde \dot{m}_{ai} es la cantidad de masa que entra al múltiple y \dot{m}_{ao} es la cantidad de masa que sale del múltiple (la cual entra a la cámara de combustión).

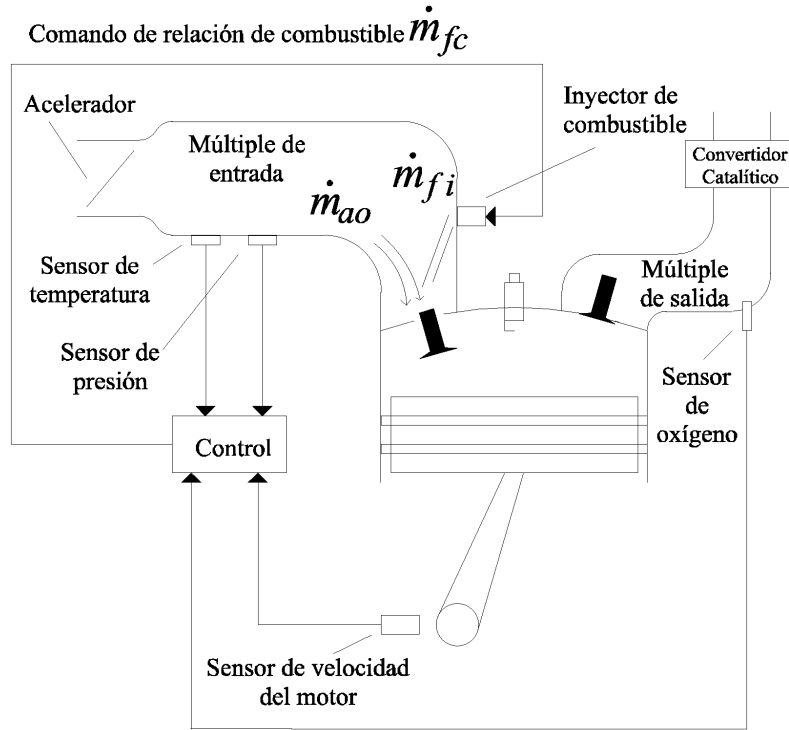


Figura 2.7: Diagrama de un MCI

La cantidad de masa que entra en el múltiple de entrada se modela como

$$\dot{m}_{ai} = MAX \cdot TC \cdot PRI \quad (2.19)$$

donde MAX es el flujo máximo. TC es la caracterización normalizada del acelerador, y PRI es la influencia normalizada de la presión. El flujo máximo se obtiene al abrir completamente el acelerador para flujo estrangulado; para el motor que se está modelando, $MAX = 0.1843 \text{Kg/s}$. La caracterización normalizada del acelerador es una función del ángulo del acelerador, α , como se muestra en la figura 2.8, la cual se puede obtener con la siguiente ecuación

$$TC = \begin{cases} 1 - \cos 1.14459 \cdot \alpha - 1.0600 & \text{para } \alpha \leq 79.46^\circ \\ 1 & \text{para } \alpha > 79.46^\circ \end{cases} \quad (2.20)$$

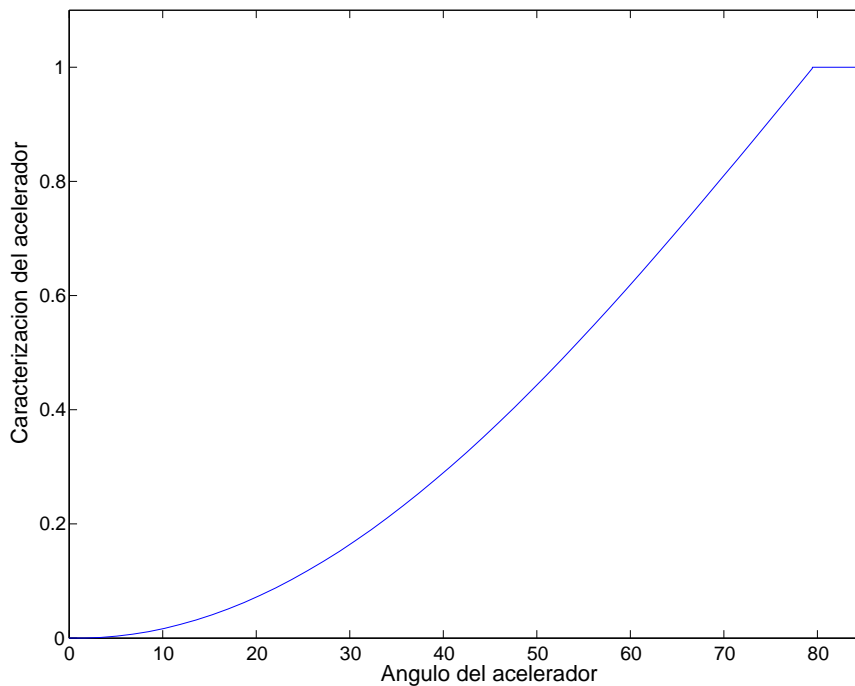


Figura 2.8: Caracterización normalizada del acelerador

La influencia normalizada de la presión está en función de la relación entre la presión del múltiple y la presión atmosférica como se muestra en la figura 2.9. Para flujo de aire compresible a través de un orificio la siguiente ecuación puede ser usada

$$PRI = 1 - \exp\left(9 \left(\frac{P_m}{P_{atm}} - 1\right)\right) \quad (2.21)$$

donde se supone que la presión se distribuye uniformemente. La presión del múltiple de entrada, P_m , y la masa de aire del múltiple de entrada, m_a , se relacionan por la ley de gases ideales [6]. P_{atm} es la presión atmosférica.

La cantidad de flujo de masa que entra en la cámara de combustión es

$$\dot{m}_{ao} = c_1 \eta_{vol} m_a \omega_e \quad (2.22)$$

donde ω_e es la velocidad del motor, y c_1 es una constante física definida como

$$c_1 = \frac{V_e}{4\pi V_m} \quad (2.23)$$

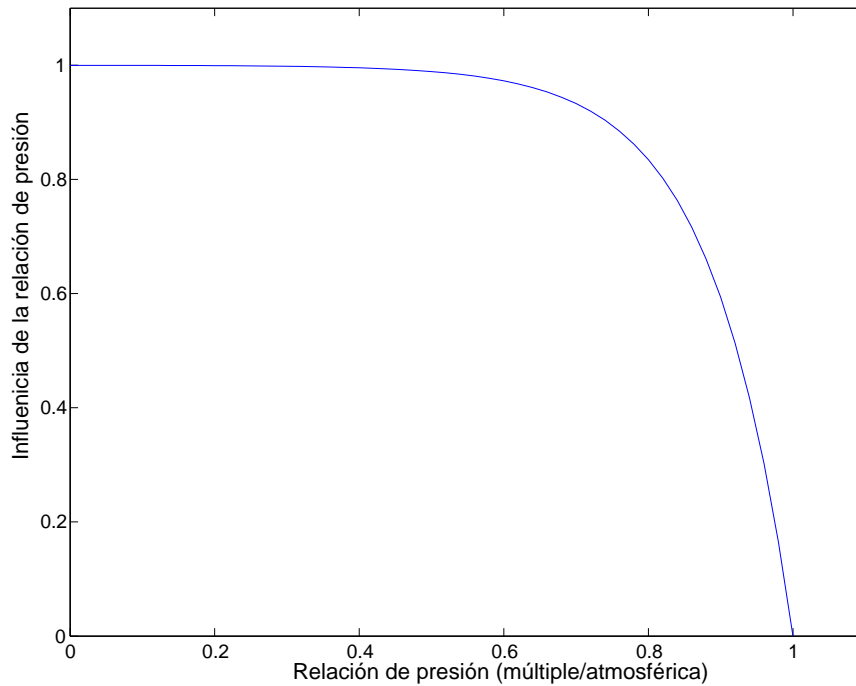


Figura 2.9: Influencia normalizada de la relación de presión

donde el desplazamiento del motor, V_e , es 0.0038m^3 , y el volumen del múltiple de entrada, V_m , es 0.0027m^3 . La eficiencia volumétrica, η_{vol} , es una medida de la efectividad del proceso de inducción del motor y es definida como la relación de aire de entrada en el motor dividida por la velocidad a la cual el volumen es desplazado por el motor. La eficiencia volumétrica es una función compleja de muchos parámetros del motor y en consecuencia es extremadamente difícil de modelar analíticamente, por lo que se usa la siguiente expresión empírica [6]

$$\eta_{vol} = (24.5\omega_e - 3.10 \times 10^4) m_a^2 + (-0.167\omega_e + 222) m_a + (8.10 \times 10^{-4}\omega_e + 0.352) \quad (2.24)$$

El segundo estado está asociado con el flujo de combustible y tiene gran dependencia en particular del método de inyección de combustible. Para el vehículo de interés se supone que está equipado con un sistema de inyección de combustible de **puerto de disparo secuencial** (sequential-fire port). Se sabe [6] que cualquier método de inyección de combustible

da como resultado la combinación de un retraso fijo y de un retraso variable. La constante de tiempo del retraso es pequeña para el sistema de inyección de combustible de puerto. El retraso variable es una función del intervalo de disparo del inyector y del tamaño del solenoide inyector, así como de la velocidad del motor. Para el sistema de inyección considerado, asumiendo que el atomizado es completo después de que una válvula de admisión fue abierta, el retraso variable puede ser aproximado como

$$\frac{1.5\pi}{\omega_e} \cdot \frac{\% \text{ ciclo de trabajo del inyector}}{100} \Rightarrow \frac{1.5\pi}{\omega_e} \cdot \frac{\dot{m}_{fc} \cdot \beta}{\text{MAX}} \quad (2.25)$$

donde β es la relación aire/combustible deseada, y \dot{m}_{fc} es el flujo de combustible deseado. Por simplicidad en [6], los dos efectos son combinados en un retraso de primer orden de la forma

$$\tau_f \ddot{m}_{fi} + \dot{m}_{fi} = \dot{m}_{fc} \quad (2.26)$$

donde \dot{m}_{fi} es la relación actual de combustible entrando a la cámara de combustión, y τ_f es la constante de tiempo efectiva de la inyección de combustible modelada como

$$\tau_f = 0.050 + \frac{1.5\pi}{\omega_e} \cdot \frac{\dot{m}_{fc} \cdot \beta}{\text{MAX}} \quad (2.27)$$

El tercer estado está relacionado con la dinámica de los elementos rotacionales de un MCI y es modelado como

$$I_e \cdot \dot{\omega}_e = T_i - T_f - T_a - T_p \quad (2.28)$$

donde T_i es el par del motor, T_f es la fricción del motor, T_a es el par debido a los accesorios, y T_p es el par de la bomba convertidora de par. La inercia efectiva del motor y de la bomba convertidora de par, I_e , es 0.1454 Kg m² para el MCI de interés [6].

El proceso de producción de par del MCI es un evento discreto, pero puede ser modelado en el dominio continuo del tiempo como

$$T_i = c_T \cdot \frac{\dot{m}_{ao}(t - \Delta t_{it})}{\omega_e(t - \Delta t_{it})} \cdot \text{IAC}(t - \Delta t_{ti}) \cdot \text{SI}(t - \Delta t_{st}) \quad (2.29)$$

La influencia normalizada de aire combustible (IAC) es una función de la relación aire combustible (A/C) como se muestra en la figura 2.10, y la siguiente función puede ser usada

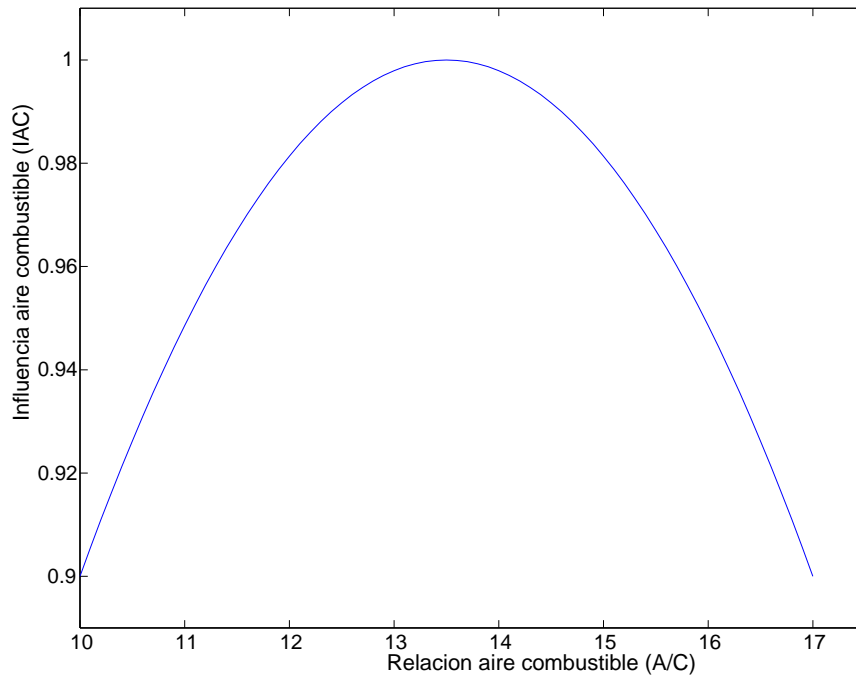


Figura 2.10: Influencia normalizada aire combustible

[6]

$$IAC = \cos(7.3834 \cdot (A/C - 13.5)) \quad (2.30)$$

La influencia normalizada de la chispa (ICH), es una función del avance/retroceso de la chispa que se obtiene de MMP (mínimo avance de chispa para un mejor par) como se muestra en la figura 2.11, y la siguiente función puede ser usada

$$ICH = (\cos(ACH-MMP))^{2.875} \quad (2.31)$$

donde ACH es el avance/retroceso de la chispa para el **punto muerto superior**. La constante de par, c_T , representa la capacidad máxima de par de un MCI para cierta masa de aire, velocidad del MCI, $IAC=1$, y $ICH=1$. Para el MCI de interés [6], $c_T = 498636 \text{ Nm}/(\text{Kg/s})$. La naturaleza cíclica de un MCI de cuatro tiempos es capturada a través del uso del retraso de la admisión a la producción de par y del retraso de la chispa a la producción de par, tal como es expresado en la ecuación (2.29), donde

$$\Delta t_{it} = \text{retraso de la admisión a la producción de par} \approx 5.48/\omega_e$$

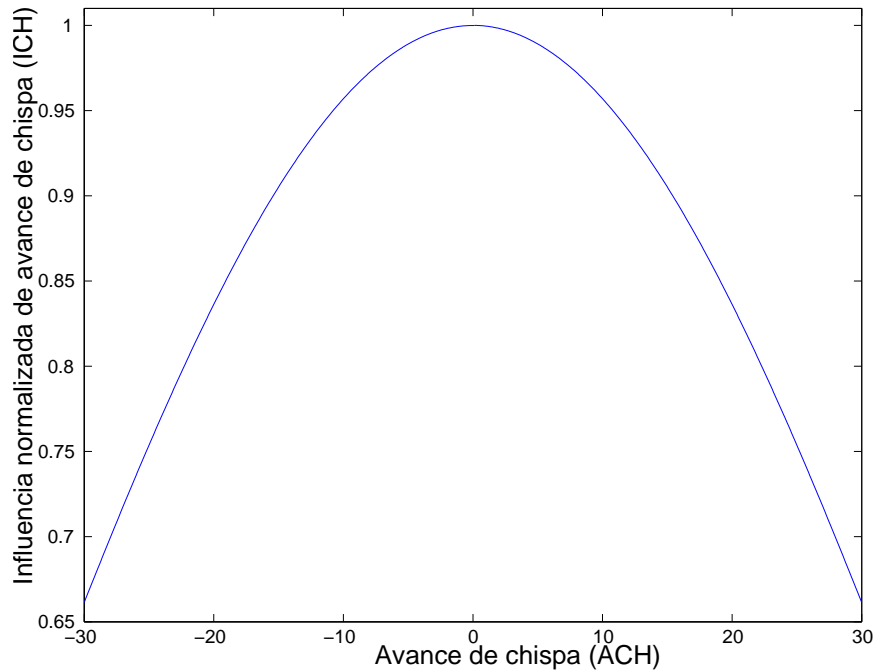


Figura 2.11: Influencia normalizada de la chispa

$$\Delta t_{st} = \text{retraso de la chispa a la producción de par} \approx 1.30/\omega_e$$

El par debido a la fricción del MCI es obtenido de datos experimentales [6], es

$$T_f = 0.1056\omega_e + 15.10 \quad (2.32)$$

El par de accesorios, T_a puede ser agregado arbitrariamente para evaluar el rendimiento cuando el MCI es sometido a diferentes cargas de accesorios.

Resumiendo, el modelo dinámico del MCI tiene tres estados (m_a , \dot{m}_{fi} , y ω_e), dos retrasos temporales (Δt_{it} y Δt_{st}), y tres posibles variables de control (α , A/C, y ACH).

Las expresiones usadas en el modelo simulado son obtenidas de todas las expresiones introducidas anteriormente, las cuales son

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao} \quad (2.33)$$

$$\ddot{m}_{fi} = \frac{1}{\tau_f}(\dot{m}_{fc} - \dot{m}_{fi}) \quad (2.34)$$

$$\dot{w}_e = \frac{1}{I_e}(T_i - T_f - T_a - T_p) \quad (2.35)$$

\dot{m}_a	Flujo de aire en el múltiple de entrada
\dot{m}_{fi}	Flujo de combustible entrando en la cámara de combustión
w_e	Velocidad del MCI

Tabla 2.1: Estados del modelo del MCI

Además

$$\dot{m}_{ai} = \text{MAX} \cdot \text{TC} \cdot \text{PRI} \quad (2.36)$$

$$\dot{m}_{ao} = c_1 \cdot \eta_{vol} \cdot \dot{m}_a \cdot \omega_e \quad (2.37)$$

$$\tau_f = 0.050 + \frac{1.5\pi}{\omega_e} \cdot \frac{\dot{m}_{fc}\beta}{\text{MAX}} \quad (2.38)$$

$$T_i = c_T \cdot \frac{\dot{m}_{ao}(t - \Delta t_{it})}{\omega_e(t - \Delta t_{it})} \text{AFI}(t - \Delta t_{it}) \text{SI}(t - \Delta t_{st}) \quad (2.39)$$

$$\text{IAC} = \cos(7.3834(\text{A/F} - 13.5)) \quad (2.40)$$

$$\text{SI} = (\cos(\text{SA} - \text{MBT}))^{2.875} \quad (2.41)$$

$$T_f = 0.1056\omega_e + 15.10 \quad (2.42)$$

$$\text{TC} = \begin{cases} 1 - \cos 1.14459 \cdot \alpha - 1.0600 & \text{para } \alpha \leq 79.46^\circ \\ 1 & \text{para } \alpha > 79.46^\circ \end{cases} \quad (2.43)$$

2.2 Motor eléctrico

El motor eléctrico (ME) extrae energía de la batería y provee par al sistema de tracción, ya sea de manera autónoma o en combinación con el MCI, además puede funcionar como generador, ya sea al recuperar energía cinética durante el frenado o al usar energía proveniente del MCI, y de cualquiera de las dos formas cargar la batería.

\dot{m}_{ai}	Flujo másico de aire que entra al múltiple de entrada
\dot{m}_{ao}	Flujo másico de aire que sale del múltiple de entrada
τ_f	Constante de tiempo de la introducción de combustible
T_i	Par del MCI
IAC	Influencia normalizada de aire/combustible
ICH	Influencia de la chispa
ACH	Avance de chispa
MMP	Mínimo avance de chispa para un mejor par
T_f	Fricción del MCI
TC	Caracterización del acelerador

Tabla 2.2: Parámetros y relaciones para el MCI

En esta sección se describe el modelo dinámico del motor eléctrico usado para el vehículo híbrido. Este modelo representa la dinámica de un motor asíncrono de tres fases, también conocido como motor de inducción. Este modelo del motor asíncrono puede funcionar en modo de generador o en modo de motor. El modo de operación está determinado por el signo del par mecánico de carga T_m :

Si T_m es positivo, funcionará como motor.

Si T_m es negativo, funcionará como generador.

La parte eléctrica del motor es representada por un modelo de espacio de estados de cuarto orden, y la parte mecánica es representada por un modelo de segundo orden. Todas las variables y parámetros están referidos al estator. Para indicar esto se usa un apóstrofe (') en las ecuaciones del modelo. Todas las variables del estator y del rotor están dadas con respecto al marco de referencia arbitrario de dos ejes (marco dq). Los subíndices se definen en la tabla 2.3.

Los parámetros usados en este modelo del motor de inducción se definen en la tabla 2.2 (todos referidos al estator).

Subíndice	Significado
d	Variable en el eje d
q	Variable en el eje q
r	Variable del rotor
s	Variable del estator
l	Inductancia de dispersión
m	Inductancia de magnetización

Tabla 2.3: Subíndices para el modelo del motor eléctrico

Parámetro	Definición
R_s	Resistencia del estator
L_{ls}	Inductancia de dispersión del estator
R'_r	Resistencia de dispersión del rotor
L'_{lr}	Inductancia de dispersión del rotor
L_m	Inductancia de magnetización
L_s	Inductancia total del estator
L'_r	Inductancia total del rotor
V_{qs}	Voltaje del estator en el eje q
i_{qs}	Corriente del estator en el eje q
V'_{qr}	Voltaje del rotor en el eje q
i'_{qr}	Corriente del rotor en el eje q
V_{ds}	Voltaje del estator en el eje d
i_{ds}	Corriente del estator en el eje d
V'_{dr}	Voltaje del rotor en el eje d
i'_{dr}	Corriente del rotor en el eje d
ψ_{qs}	Flujo del estator en el eje q .
ψ_{ds}	Flujo del estator en el eje d .
ψ'_{qr}	Flujos del rotor en el eje q .
ψ'_{dr}	Flujo del rotor en el eje d .
ω_m	Velocidad angular del rotor
θ_m	Posición angular del rotor
p	Número de pares de polos
ω_r	Velocidad eléctrica angular del rotor ($\omega_m \cdot p$)
θ_r	Posición eléctrica angular del rotor ($\theta_m \cdot p$)
T_e	Par electromagnético
T_m	Par de carga en la flecha
H	Constante combinada de inercia de la carga y del rotor

Tabla 2.4: Variables y parámetros

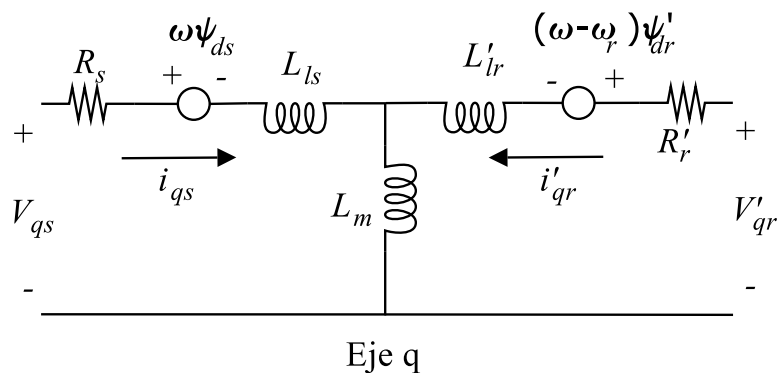


Figura 2.12: Circuito equivalente para el eje q

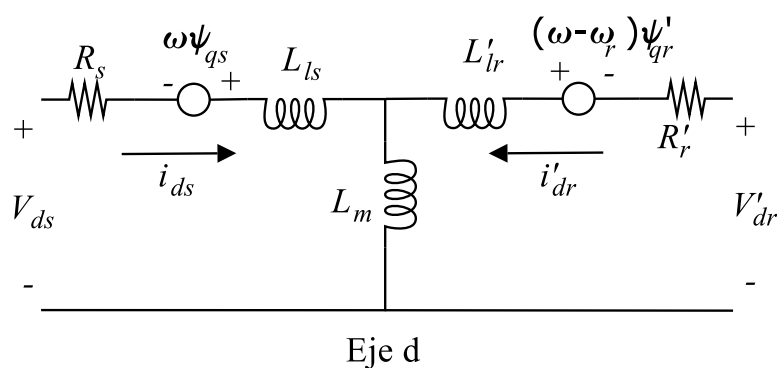


Figura 2.13: Circuito equivalente para el eje d

Sistema Eléctrico. Un circuito equivalente para el motor de inducción usando el marco de referencia dq se muestra en las figura 2.12 y 2.13. De estos dos circuitos se obtienen las siguientes ecuaciones,

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega \psi_{ds} \quad (2.44)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega \psi_{qs} \quad (2.45)$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d\psi'_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \psi'_{dr} \quad (2.46)$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d\psi'_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \psi'_{qr} \quad (2.47)$$

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \quad (2.48)$$

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \quad (2.49)$$

$$\psi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \quad (2.50)$$

$$\psi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \quad (2.51)$$

$$T_e = 1.5p(\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (2.52)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (2.53)$$

$$L'_r = L'_{lr} + L_m \quad (2.54)$$

De (2.48) a (2.51) se puede despejar i_{qs} , i_{ds} , i'_{qr} y i'_{dr} , y dejar estas corrientes en términos de ψ_{qs} , ψ_{ds} , ψ'_{qr} y ψ'_{dr} , para después sustituirlas en (2.44) a (2.47), y de esta manera obtener un modelo dinámico en términos de voltaje y flujo, como sigue

$$\dot{\psi}_{qs} = -\frac{R_s}{L_s \sigma} \psi_{qs} + \frac{R_s L_m}{L_s L'_r} \psi'_{qr} - \omega \psi_{ds} + V_{qs} \quad (2.55)$$

$$\dot{\psi}_{ds} = -\frac{R_s}{L_s \sigma} \psi_{ds} + \frac{R_s L_m}{L_s L'_r \sigma} \psi'_{dr} + \omega \psi_{qs} + V_{ds} \quad (2.56)$$

$$\dot{\psi}'_{qr} = \frac{R'_r L_m}{L_s L'_r \sigma} \psi_{qs} - \frac{R'_r}{L'_r \sigma} \psi'_{qr} - (\omega - \omega_r) \psi'_{dr} + V'_{qr} \quad (2.57)$$

$$\dot{\psi}'_{dr} = \frac{R'_r L_m}{L_s L'_r \sigma} \psi_{ds} - \frac{R'_r}{L'_r \sigma} \psi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \psi'_{qr} + V'_{dr} \quad (2.58)$$

con

$$\sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L'_r L_s}\right)$$

Si se expresa el par (2.52) en términos del flujo se obtiene

$$T_e = 1.5p \left(\frac{1}{L_s \sigma} \psi_{ds} \psi_{qs} - \frac{L_m}{L_s L'_r \sigma} \psi_{ds} \psi'_{qr} - \frac{1}{L_s \sigma} \psi_{ds} \psi_{qs} + \frac{L_m}{L_s L'_r \sigma} \psi'_{dr} \psi_{qs} \right) \quad (2.59)$$

Las corrientes del estator y del rotor en términos de los flujos son

$$i_{qs} = \frac{1}{L_s \sigma} \psi_{qs} - \frac{L_m}{L'_r L_s \sigma} \psi'_{qr} \quad (2.60)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{L_s \sigma} \psi_{ds} - \frac{L_m}{L'_r L_s \sigma} \psi'_{dr} \quad (2.61)$$

$$i'_{qr} = \frac{1}{L'_r \sigma} \psi'_{qr} - \frac{L_m}{L'_r L_s \sigma} \psi_{qs} \quad (2.62)$$

$$i'_{dr} = \frac{1}{L'_r \sigma} \psi'_{dr} - \frac{L_m}{L'_r L_s \sigma} \psi_{ds} \quad (2.63)$$

Sistema mecánico. Para la parte mecánica del motor de inducción se tiene el siguiente sistema

$$\dot{\omega}_m = \frac{1}{2H} (T_e - F\omega_m - T_m) \quad (2.64)$$

$$\dot{\theta}_m = \omega_m \quad (2.65)$$

donde F es la fricción en la flecha del rotor.

2.3 Acoplamiento mecánico

Una vez que ya se tiene el modelo dinámico de un motor de combustión interna y de un motor/generador eléctrico, el siguiente paso es modelar la forma en que van a ser acoplados mecánicamente. En la figura 2.14 se muestra un diagrama esquemático de la configuración elegida para el vehículo híbrido.

En la figura 2.15 se muestra la forma en que se va a considerar mecánicamente el sistema de propulsión. De aquí se obtiene la ecuación para la velocidad angular de la flecha de transmisión

$$\dot{\omega}_v = \frac{1}{J} [R(k(t)) \cdot (\tau_{ME} \cdot \rho + \tau_{MCI}) - \tau_l - \tau_{fri} - \tau_{fre}] \quad (2.66)$$

donde ω_v es la velocidad en la flecha de transmisión, J es la inercia del vehículo, dado que a comparación de la inercia del vehículo, la inercia del MCI y del ME son despreciables, en la ecuación de velocidad sólo se considera la inercia del vehículo J , $R(k(t))$ es la relación de engranaje en la caja de velocidad, la cual depende del número de velocidad elegido $k(t)$, ρ es la relación del reductor usado con el motor eléctrico para ajustar las velocidades del ME y del MCI, τ_{ME} es el par generado por el ME, τ_{MCI} es el par generado por el MCI, τ_{fric} es el par generado por la fricción, τ_l es el par de carga y τ_{fre} es el par de frenado, en este caso se considera el frenado como una fuente de par pero siempre negativa y con un límite.

El par debido a la fricción está dado por

$$\tau_{fri} = \omega_v \cdot b \quad (2.67)$$

Al considerar el reductor de velocidad y la caja de velocidades, la velocidad angular del ME y del MCI también se verían afectadas de la siguiente manera

$$\omega_{MCI} = \omega_v \cdot R(k(t)) \quad (2.68)$$

$$\omega_{ME} = \omega_v \cdot \rho R(k(t)) \quad (2.69)$$

De la misma forma, el par en la flecha de salida del arreglo mecánico del MCI y del ME, es decir el par neto generado para la propulsión del vehículo τ_v , se verá afectado por la relación obtenida en los diferentes cambios de la caja de velocidad, de la siguiente manera

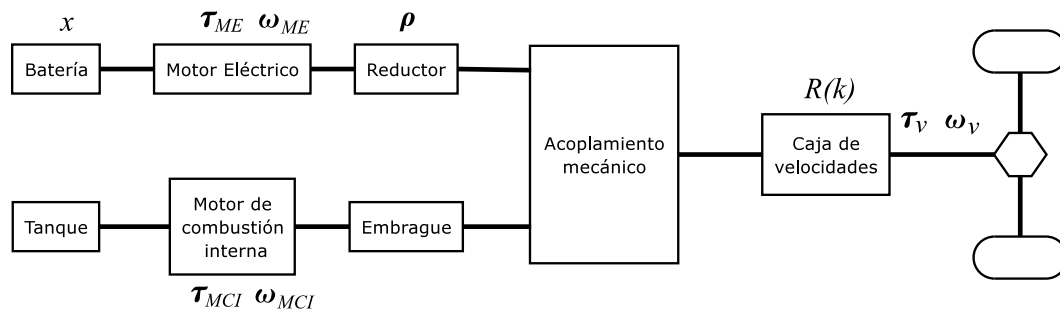


Figura 2.14: Diagrama esquemático de la configuración del sistema de propulsión híbrido

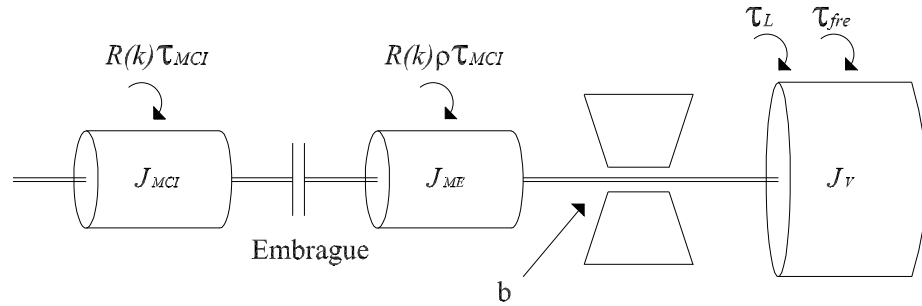


Figura 2.15: Sistema mecánico

$$\tau_v = R(k(t)) \cdot (\tau_{mci} + \rho\tau_{ME}) \quad (2.70)$$

En el modelo se debe de considerar un caso especial, que es cuando no se usa el MCI, ya que a diferencia del ME el MCI no puede tener una velocidad nula, sino que debe de mantener una cierta velocidad para seguir funcionando y estar disponible para cuando se le necesite. Además, hay que considerar que al dejarlo funcionando por si solo, cambia la carga debida a la inercia provocada por el vehículo, es decir, se queda solo con la inercia debida al mismo MCI, en la figura 2.16 se muestra un diagrama de como se efectúa el cambio entre las dos inercias. Este cambio es provocado por el embrague del MCI, es decir, cuando se aplica el embrague hay un cambio en la inercia del MCI, ya que pasa de la inercia del vehículo a la inercia del MCI y el acelerador se queda en un ángulo constante α_{cte} con el cual el MCI trabaja a la velocidad mínima de funcionamiento. Cuando ocurre este cambio, la velocidad del MCI es la velocidad del vehículo por la relación de la caja de velocidades, y cuando está aplicado el embrague y funciona a la velocidad mínima, ésta dada por la

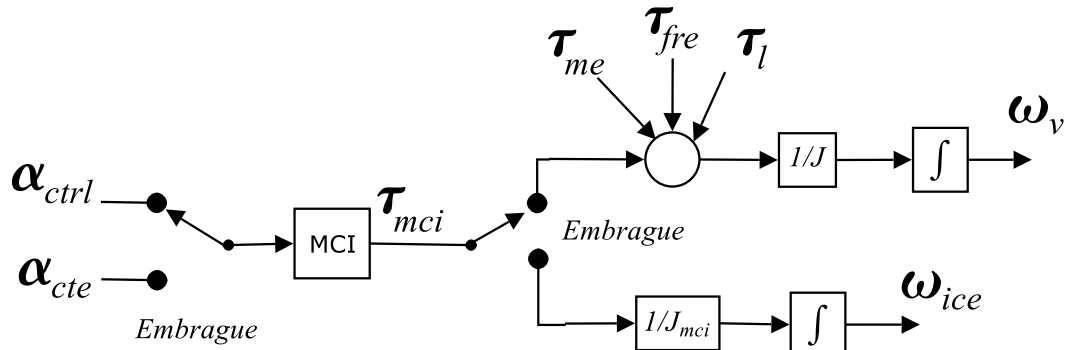


Figura 2.16: Cambio de inercia de MCI

integral del par multiplicado por el inverso de la inercia del MCI. En la figura 2.16 α_{ctrl} es la señal de control para el acelerador, α_{cte} es el ángulo mínimo para la velocidad mínima del MCI, τ_{mci} es el par generado por el MCI, τ_{fre} es el par de frenado, τ_l es el par de carga, J_{mci} es la inercia del MCI, J es la inercia del vehículo, ω_{mci} es la velocidad del MCI y ω_v es la velocidad de la flecha de transmisión.

Finalmente, para obtener la velocidad del vehículo se multiplica la velocidad de la flecha de transmisión ω_v por la relación final del diferencial y además por la relación para convertir de velocidad angular a velocidad lineal, esta constante está dada como

$$k = \gamma \cdot \pi r \quad (2.71)$$

donde γ es la relación final de engranaje del diferencial y r es el radio de la llanta en metros, entonces la velocidad lineal del vehículo en m/s está dada por

$$v = k \cdot \omega_v \quad (2.72)$$

2.4 Batería

Para el modelo de la batería se usó un modelo reducido, con el cual se calcula el estado de carga de la batería. Este solo toma en cuenta la corriente de entrada a la batería considerando una eficiencia fija para la carga y otra eficiencia fija para la descarga, además

de suponer que el voltaje en terminales de la batería es fijo. Se asume que la conversión de corriente alterna a directa del motor de inducción es ideal, tanto en motorización como en generación. Para el vehículo en cuestión se considera una batería con las características descritas en la tabla 2.5.

Capacidad	18 Ah
Número de módulos	20
Voltaje nominal	12.5 (volts por módulo)

Tabla 2.5: Características del sistema de baterías

Por lo tanto para calcular la corriente en la batería, ya sea en carga o descarga, se calcula la potencia eléctrica en el ME, esto se hace con el producto punto de la parte real de la corriente del estator por la parte real del voltaje del estator,

$$P_{elec} = I_s \cdot V_s \quad (2.73)$$

donde I_s y V_s son los vectores de corriente y voltaje del estator respectivamente. Para calcular la corriente en la batería se divide la potencia entre el voltaje en terminales de la batería

$$I_{bat} = \frac{P_{elec}}{V_{bat}} \quad (2.74)$$

para obtener el voltaje en las terminales de la batería se multiplica el número de módulos por el voltaje de cada módulo, es decir, los módulos tienen un arreglo serie. Para el sistema de baterías en cuestión se tiene

$$V_{bat} = 250V \quad (2.75)$$

Para calcular la carga (o descarga) de la batería se integra la corriente y dependiendo del sentido de la corriente se considera como carga o descarga, es decir

$$Q_{car} = \begin{cases} \int I_{bat} dt & \text{si } I_{bat} \geq 0 \\ 0 & \text{si } I_{bat} < 0 \end{cases} \quad (2.76)$$

$$Q_{des} = \begin{cases} \int I_{bat} dt & \text{si } I_{bat} < 0 \\ 0 & \text{si } I_{bat} \geq 0 \end{cases} \quad (2.77)$$

Por lo tanto, el estado de carga de la batería (EDC) está dado en términos de la carga, la capacidad de la batería, el estado inicial de la batería y del estado anterior de la batería

$$EDC(k+1) = EDC(k) + \frac{Q_{des}}{C\eta_d} + \frac{Q_{car}}{C}\eta_c \quad (2.78)$$

donde $EDC(k)$ es el estado de carga de la batería en un tiempo k , C es la capacidad de carga de la batería, η_d es la eficiencia en descarga y η_c es la eficiencia en carga.

Capítulo 3

Control del sistema de propulsión híbrido

3.1 Control basado en reglas

Un algoritmo muy común para la administración de potencia en los vehículos híbridos es el control basado en reglas, debido a la facilidad en el manejo de los cambios de modos de operación. Para un sistema de propulsión paralelo, hay cinco posibles modos de operación: sólo ME, sólo MCI, potencia asistida (ME más MCI), recarga (MCI recarga las baterías) y frenado regenerativo. Para economizar combustible y/o reducir emisiones, el control de potencia tiene que decidir que modo de operación usar y, cuando sea necesario, determinar la división de potencia entre las dos fuentes de potencia mientras que satisface la demanda del conductor y mantiene el estado de carga de la batería. La estrategia presentada a continuación fue desarrollada con base en intuición ingenieril y el análisis de los mapas de eficiencia de cada componente [14].

Debido a que en la estrategia de control se determina la potencia a generar para cada elemento del vehículo, se debe calcular el par correspondiente para cada uno de estos elementos, ya que esta es la referencia para el ME, el MCI y para el par de frenado. Por lo

tanto el par para el MCI se calcula como

$$\tau_{mci} = \frac{P_{mci}}{\omega_v R(k(t))} \quad (3.1)$$

el par para el ME es

$$\tau_{me} = \frac{P_{me}}{\omega_v R(k(t))\rho} \quad (3.2)$$

y el par para el frenado es

$$\tau_{fre} = \frac{P_{fre}}{\omega_v} \quad (3.3)$$

donde τ_{mci} , τ_{me} y τ_{fre} son el par del MCI, del ME y de frenado, respectivamente. P_{mci} , P_{me} y P_{fre} son la potencia determinada en la estrategia de control y ω_v es la velocidad del vehículo. Debido que se calcula de esta forma el par de referencia para cada elemento, cuando la velocidad del vehículo es muy baja y cercana a cero el par tiende a infinito, por esto, cuando la velocidad del vehículo es menor que una velocidad mínima ω_{min} , el par para cada elemento se calcula como

$$\tau_i = \frac{P_i}{\omega_{min}} \quad (3.4)$$

esto con el fin de no indeterminar la referencia de par para los diferentes elementos.

El proceso de diseño comienza por interpretar el movimiento del pedal del conductor como una demanda de potencia P_{dem} . Dependiendo de la demanda de potencia y del estado del vehículo, la operación del controlador está determinada por uno de los tres modos de control: **control de frenado**, **control de división de potencia** y **control de recarga**. Si P_{dem} es negativo, esto es, cuando el freno es aplicado, el control de frenado es usado para desacelerar el vehículo. Si P_{dem} es positivo, el control de división de potencia o el control de recarga será usado, dependiendo del estado de carga (EDC) de la batería. Un intervalo del EDC de la batería de 50 – 60% es elegido para el control de recarga, para procurar una operación eficiente de la batería, así como para prevenir la completa descarga o daño por sobrecarga de la batería [14]. Es importante hacer notar que los niveles del EDC no son cotas rígidas, por lo que es común la operación fuera de éstas. Durante condiciones normales de propulsión, el control de división de potencia determinará el flujo de potencia

en el sistema híbrido de propulsión. Cuando el EDC baja más allá del límite inferior, el controlador cambiará al control de recarga hasta que el EDC alcance el límite superior, después el control de división de potencia entrará en funcionamiento nuevamente. La lógica de cada modo de control es descrita a continuación.

Control de división de potencia: Basado en el mapa de eficiencia del MCI ver figura 4.3, se elige un límite para la potencia a la cual el MCI es usado, P_{mci_on} , y un límite al cual se tendrá potencia asistida, P_{p_a} . Estos valores se eligen de tal manera que se evite el funcionamiento del MCI en regiones de operación en que sea muy ineficiente [14]. Si P_{dem} es menor que P_{mci_on} , el motor eléctrico dará toda la potencia que se demanda. Más allá de P_{mci_on} , el MCI será la única fuente de potencia. Cuando P_{dem} exceda P_{p_a} , el MCI será fijado a una potencia igual a P_{p_a} y el ME es activado para proporcionar la diferencia ($P_{dem} - P_{p_a}$) ver 3.1.

Expresado en forma de reglas,

Si $0 \leq P_{dem} \leq P_{mci_on}$ entonces

$$P_{mci} = 0 \text{ y } P_{me} = P_{dem}$$

Si $P_{mci_on} < P_{dem} \leq P_{p_a}$ entonces

$$P_{mci} = P_{dem} \text{ y } P_{me} = 0$$

Si $P_{p_a} < P_{mci_on} < P_{max} \leq$ entonces

$$P_{mci} = P_{p_a} \text{ y } P_{me} = P_{dem} - P_{p_a}$$

donde, P_{mci} es la potencia requerida del MCI, P_{me} es la potencia requerida del ME y P_{max} es la potencia máxima que puede entregar el MCI en combinación con el ME.

Control de frenado: La estrategia de control es usada cuando la potencia demandada por el conductor es menor que cero, es decir, se desea frenar, $P_{dem} < 0$. Esta estrategia de frenado regenerativo es simple y en ésta se intenta capturar tanta energía del frenado como sea posible. Si P_{dem} excede la capacidad de frenado regenerativo P_{me_min} , los frenos de

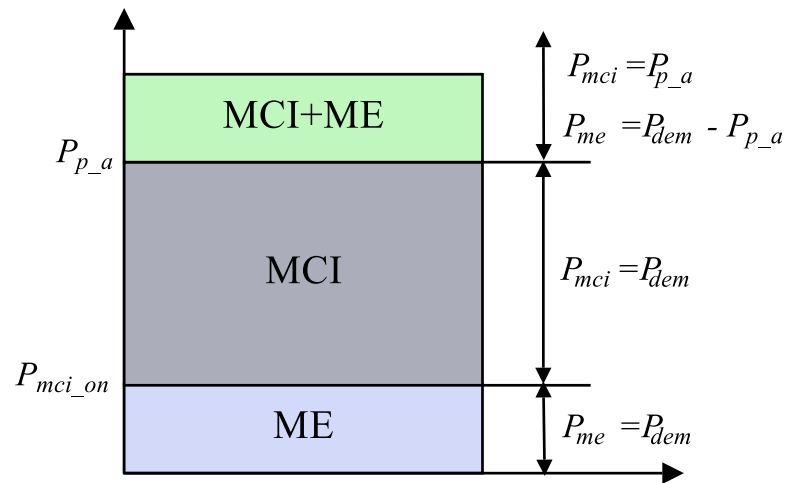


Figura 3.1: Modo división de potencia

fricción asistirá en la desaceleración y la potencia del ME es fijada en P_{me_min} ver figura 3.2. En este modo de control hay una excepción, esta es para proteger a la batería de una sobrecarga, y se aplica cuando el EDC alcanza a un EDC máximo EDC_{max} , este valor es fijado de tal manera que no se dañe la batería con una sobrecarga.

Expresado como reglas,

Si $P_{me_min} < P_{dem} < 0$ y $EDC \leq EDC_{max}$ entonces

$P_{mci} = 0$ y $P_{me} = P_{dem}$

Si $P_{dem} < P_{me_min}$ y $EDC \leq EDC_{max}$ entonces

$P_{mci} = 0$, $P_{me} = P_{me_min}$ y $P_f = P_{dem} - P_{me_min}$

Si $EDC > EDC_{max}$ entonces

$P_{mci} = 0$, $P_{me} = 0$ y $P_f = P_{dem}$

donde P_f es la potencia requerida de los frenos de fricción.

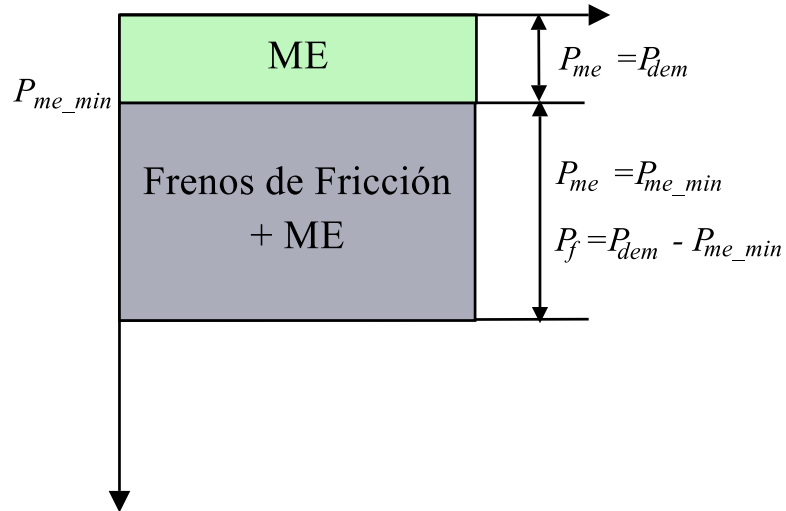


Figura 3.2: Modo de frenado cuando $EDC \leq EDC_{max}$

Control de recarga de baterías: Este modo del controlador entra en acción cuando el EDC de la batería pasa por abajo del límite inferior preestablecido, y pasa al modo de control de división de potencia cuando el EDC supera al límite superior preestablecido. En el modo de control de recarga, el MCI necesita proveer potencia adicional para cargar las baterías, además de dar propulsión al vehículo. Comúnmente [14], se preselecciona un valor de potencia de recarga para las baterías, P_{rc} , el cual es adicionado a la potencia demandada por el conductor, ésta suma es la potencia requerida de el MCI ($P_{mci} = P_{dem} + P_{rc}$). El comando de potencia para el ME se convierte negativo ($P_{em} = -P_{rc}$) para así recargar las baterías. Cuando la potencia total demandada sea menor que P_{mci_on} el ME dará por si solo la potencia requerida, esto con el fin de evitar que el MCI opere en regiones ineficientes. Además, cuando P_{dem} sea mayor que $P_{p,a} - P_{rc}$, el MCI proporcionará la potencia demandada, esto es con el fin de no llevar al MCI a una región de operación ineficiente al aumentar a la potencia demandada la potencia de recarga. Esto se puede apreciar más claramente en la figura 3.3. Por último, cuando P_{dem} sea mayor que $P_{p,a}$ el ME asistirá al MCI para la propulsión del vehículo. En este modo de control también hay una excepción para prevenir algún daño a la batería. Cuando el EDC de la batería es muy

bajo EDC_{min} , no importando la situación, se debe impedir que el funcione el ME. Es decir, que no importará que el MCI trabaje en regiones ineficientes. Son dos casos, cuando el MCI requiere que el ME lo asista y cuando la potencia requerida es muy baja, en estas dos situaciones, si el EDC es muy bajo, funcionará el MCI. Además, si la potencia requerida es muy baja, el MCI proporcionará la potencia requerida y además recargará a la batería al doble de P_{rc} para asegurar que se recargue más rápidamente la batería.

Expresado como reglas,

Si $0 < P_{dem} \leq P_{mci_on}$ y $EDC \geq EDC_{min}$ entonces

$$P_{me} = P_{dem} \text{ y } P_{mci} = 0$$

Si $0 < P_{dem} \leq P_{mci_on}$ y $EDC < EDC_{min}$ entonces

$$P_{me} = -2P_{rc} \text{ y } P_{mci} = 2P_{rc} + P_{dem}$$

Si $P_{mci_on} < P_{dem} \leq (P_{p_a} - P_{rc})$ entonces

$$P_{me} = -P_{rc} \text{ y } P_{mci} = P_{dem} + P_{rc}$$

Si $(P_{p_a} - P_{rc}) < P_{dem} \leq P_{p_a}$ entonces

$$P_{me} = 0 \text{ y } P_{mci} = P_{dem}$$

Si $P_{p_a} < P_{dem}$ y $EDC \geq EDC_{min}$ entonces

$$P_{me} = P_{dem} - P_{p_a} \text{ y } P_{mci} = P_{p_a}$$

Si $P_{p_a} < P_{dem}$ y $EDC < EDC_{min}$ entonces

$$P_{me} = 0 \text{ y } P_{mci} = P_{dem}$$

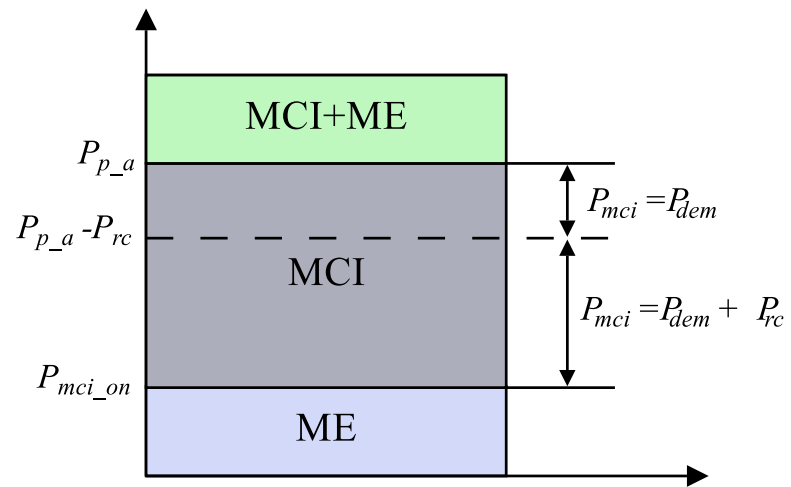


Figura 3.3: Modo recarga de baterías

Un último aspecto que se tuvo que considerar al probar el controlador fue una banda de histéresis en la potencia de cambio de ME a MCI, ya que al realizar la simulaciones se presentaba un efecto de "switcheo" al cruzar por esta potencia. Al incluir esta banda, el cambio de ME a MCI se dará hasta que la potencia deseada, P_{dem} cruce $P_{mci_on} + band$ y para cambiar de MCI a ME, la potencia deseada debe pasar más allá de $P_{mci_on} - band$. $band$ es la magnitud de la banda de histéresis. En la figura 3.4 se muestra lo explicado.

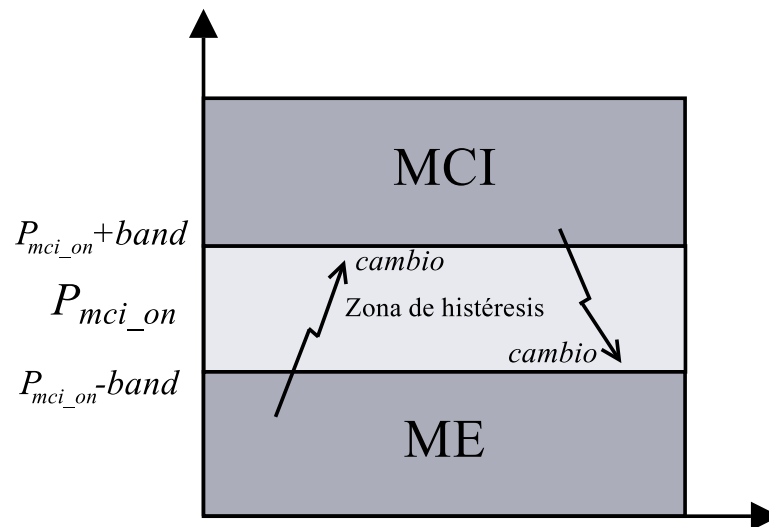


Figura 3.4: Banda de histéresis

3.2 Control de cambios

En el sistema de propulsión se considera una caja de velocidades con 5 relaciones. La relación de cada engranaje es mostrado en la tabla 3.1.

Para la decisión de qué engranaje usar se da un intervalo de velocidad en el que cada engranaje funcionará, y este intervalo cambia dependiendo si se está acelerando o frenando, es decir, si la derivada de la velocidad es positiva o negativa.

En la tabla 3.2 se muestra los intervalos en los que se usará cada número de engranaje cuando $\frac{d\omega_v}{dt} \geq 0$

Engranaje	Relación
1°	3.45
2°	2.24
3°	1.41
4°	1.0
5°	0.8

Tabla 3.1: Relaciones de caja de velocidades

Engranaje	Intervalo (Km/Hr)
1°	0-30
2°	30-50
3°	50-70
4°	70-90
5°	90-

Tabla 3.2: Intervalos de cambios cuando $\frac{d\omega_v}{dt} \geq 0$

cuando $\frac{d\omega_v}{dt} < 0$ se usam los intervalos mostrados en la tabla 3.3

Engranaje	Intervalo (Km/Hr)
5°	-85
4°	85-65
3°	65-45
2°	45-25
1°	25-0

Tabla 3.3: Intervalos de cambios cuando $\frac{d\omega_v}{dt} < 0$

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se muestran y explican los resultados obtenidos al aplicar el control basado en reglas. Para hacer las pruebas en simulación se usaron algunos ciclos de manejo oficiales de algunos países obtenidos de [1]. Además, para determinar los parámetros necesarios para el controlador se analizan los mapas de eficiencia de los diferentes subsistemas del vehículo.

4.1 Ciclos de manejo

Los ciclos de manejo usados para hacer las simulaciones son tomados de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency) [1], EPA por sus siglas en inglés. Los ciclos de manejo con los que fue probado el vehículo fueron dos, un ciclo de manejo urbano y un ciclo de manejo en carretera.

El ciclo de manejo urbano de la EPA (Urban Dynamometer Driving Schedule), UDDS por sus siglas en inglés, es llamado “la prueba de ciudad” y representa condiciones de manejo de ciudad [1]. La gráfica del ciclo, en Km/hr, es mostrada en la figura 4.1.

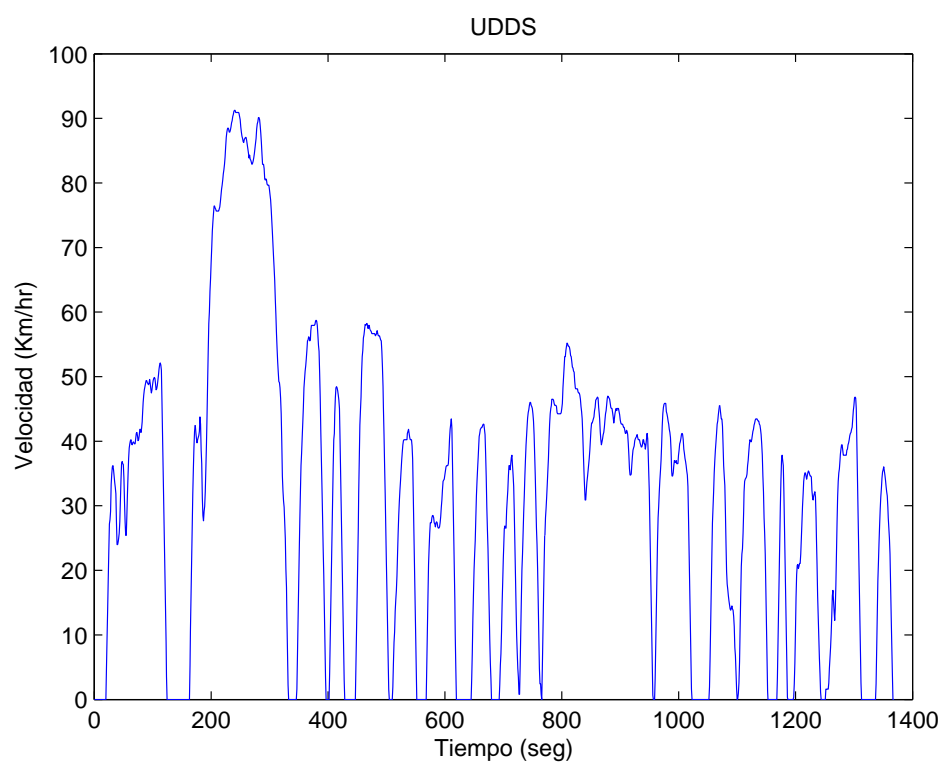


Figura 4.1: Ciclo de manejo urbano de la EPA, UDDS

El otro ciclo con el que es probado el modelo y controlador es un ciclo que representa las condiciones de manejo en carretera de la EPA (Highway Fuel Economy Driving Schedule), HWFET por sus siglas en inglés [1]. La gráfica del ciclo, en Km/hr es mostrada en la figura 4.2.

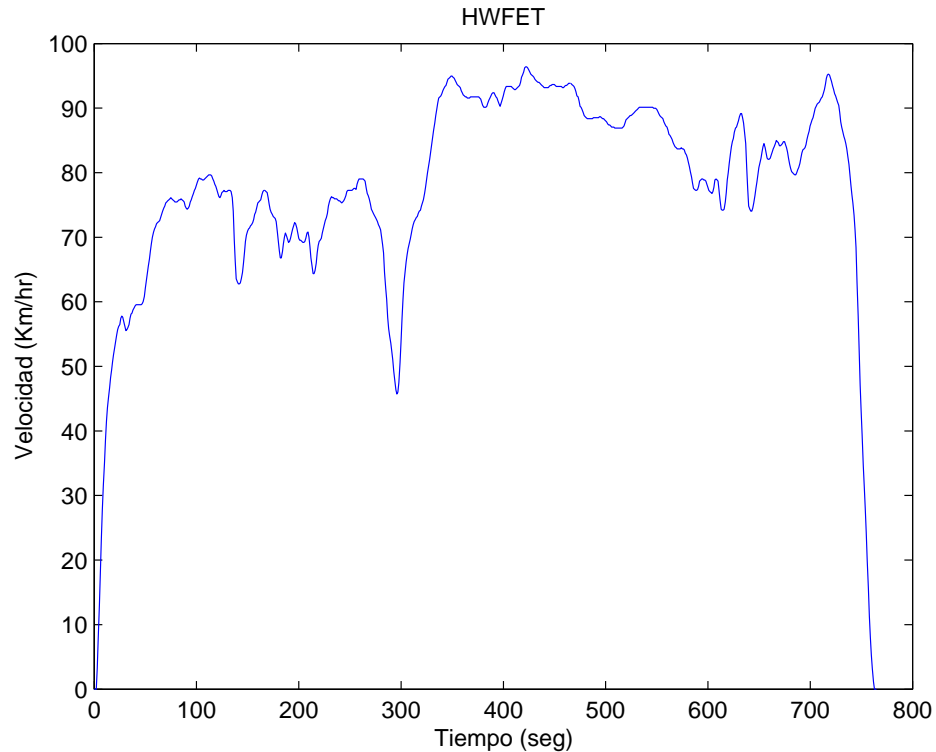


Figura 4.2: Ciclo de manejo en carretera de la EPA, HWFET

4.2 Mapas de eficiencia

Para determinar la región en la que se prefiere que el MCI funcione se usan mapas de eficiencia, estos mapas son curvas de nivel que muestran cual es la eficiencia de combustible, dependiente de la velocidad angular y del par del MCI. Desafortunadamente para el modelo del MCI que se usó no se cuenta con un mapa de eficiencia que nos indique donde es más eficiente el MCI, por lo que se usó un mapa de otro MCI para poder tener una idea de dónde

se desea que trabaje el MCI. En la figura 4.3 se muestra el mapa de eficiencia usado en [14]. Este corresponde con un motor diesel, por lo que su región de operación más eficiente está dada a baja velocidades pero con alto par. Como el MCI que se usa en este trabajo es de gasolina, se modificó este mapa y se asumió que su región de operación más eficiente está dada a velocidades más altas que uno de diesel pero con pares más pequeños. De esta forma se asume que su mejor funcionamiento estará dado de 100-200 Nm y entre 150-250 rad/seg. Esto equivale trabajar entre 15 kW y 50 kW. Pero como también hay que considerar la eficiencia de los otros elementos, como parámetros para el controlador hay que hacer un poco más amplio este intervalo de potencia. En la tabla 4.1 se muestran los parámetros usados para el controlador.

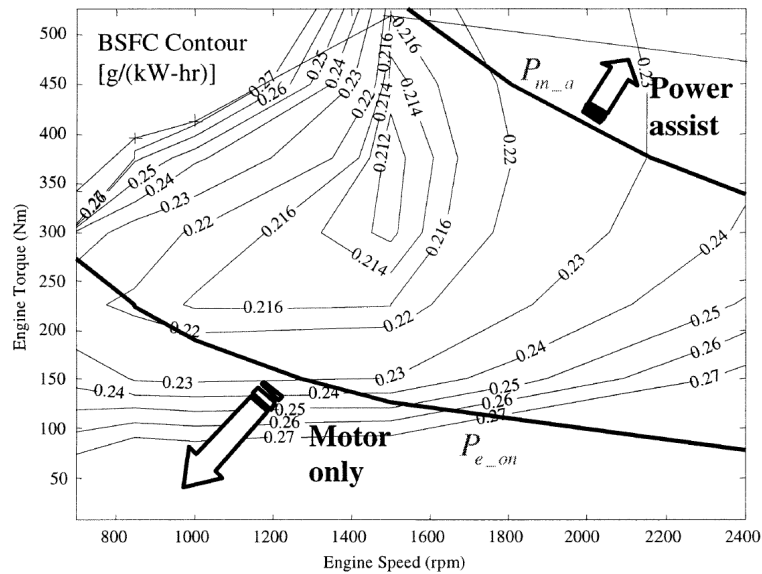


Figura 4.3: Mapa de eficiencia de un MCI en $\frac{g}{kW - hr}$

Lo deseado para esta sección, y en general para el diseño del controlador, hubiera sido contar con los mapas de eficiencia de los diferentes sistemas que conforman al VH para poder ajustar de una manera más precisa al controlador y con estos mismos mapas evaluar de cierta forma el rendimiento del controlador. Sin embargo no fue posible obtener estos mapas, ya que estos deben de provenir directamente de los sistemas físicos, por lo tanto solo se está asumiendo la región en la que deberían de trabajar los sistemas. Cabe mencionar

que es sencillo cambiar las regiones de operación de los diferentes sistemas. Para el MCI se tendría que cambiar la potencia a la que funciona, para el ME la relación de engranaje y para la batería la potencia de recarga.

4.3 Resultados de la simulación

En esta sección se analizan los resultados obtenidos de la simulación usando los ciclos de manejo mostrados en la sección 4.1 y al ajustar el controlador usando los mapas de eficiencia de la sección 4.2. En esta sección se analizan diferentes resultados con diferentes condiciones, cambiando el estado de carga de la batería y probando con los dos ciclos de manejo.

4.3.1 Ciclo UDDS

En la figura 4.4 se muestra el seguimiento de velocidad para el perfil UDDS con un EDC inicial de 0.53, y con los parámetros del controlador mostrados en la tabla 4.1. Estos parámetros fueron determinados tomando en cuenta el tamaño del MCI y del ME, a pesar de que no se obtuvieron los mapas de eficiencia de estos elementos en particular se analizaron algunos mapas de eficiencia de motores similares. El error de seguimiento se muestra en la figura 4.5.

P_{mci_on}	10 kW
$band$	2.5 kW
P_{p-a}	60kW
P_{me_min}	-25 kW
EDC_{max}	90 %
EDC_{min}	10 %
P_{rc}	12 kW
EDC_{inf}	50 %
EDC_{sup}	60 %

Tabla 4.1: Parámetros usados en la simulación

En la tabla 4.1, P_{mci_on} es la potencia inferior para el funcionamiento del MCI, $band$ es la potencia que se usa en la banda de histéresis usada en la conmutación, P_{p-a} es la potencia

a partir de la cual el ME asiste al MCI, P_{me_min} es la potencia mínima de frenado del ME, EDC_{max} y EDC_{min} son los límites máximo y mínimo de protección para la batería, P_{rc} es la potencia de recarga para la batería, EDC_{inf} es el EDC a partir del cual entra el control de recarga y EDC_{sup} es el EDC para cambiar de control de recarga a control de división de potencia.

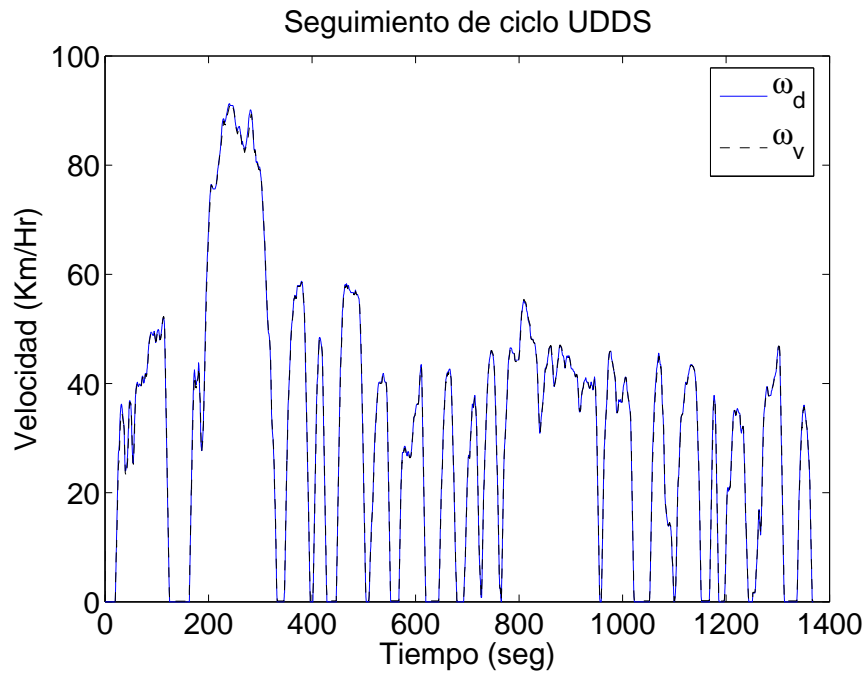


Figura 4.4: Seguimiento de velocidad para el ciclo UDDS. ω_d es la velocidad deseada y ω_v es la velocidad alcanzada por el vehículo

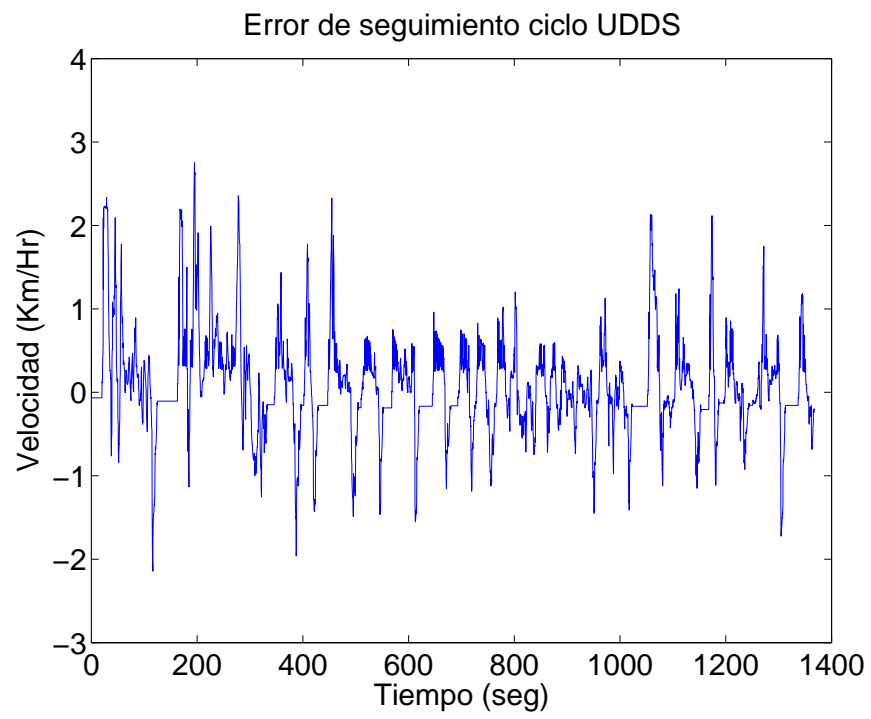


Figura 4.5: Error de seguimiento de velocidad para el ciclo UDDS.

En la figura 4.6 se muestra el estado de carga de la batería, al tener un EDC de 0.53, como se puede observar, a pesar de que la estrategia de control es básica, el nivel de carga de la batería es mantenido en niveles aceptables, que deben ser cercanos a 0.5 y 0.6.

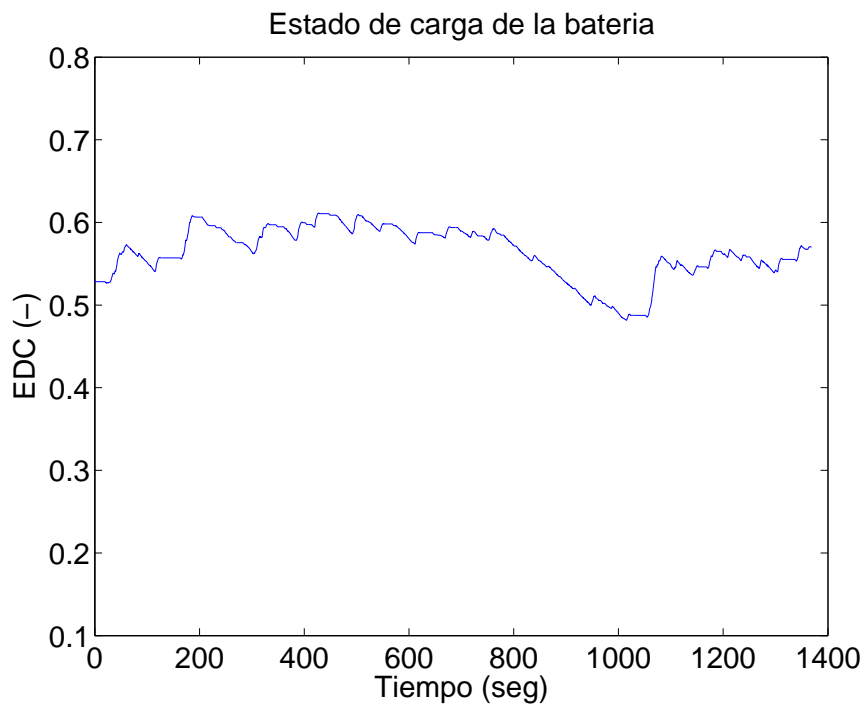


Figura 4.6: EDC para el ciclo UDDS.

En la figura 4.7 se muestra la potencia entregada por el MCI y por el ME en los primeros segundos de simulación, y en la figura 4.8 se muestra ésta misma potencia en uno de los últimos intervalos de la simulación.

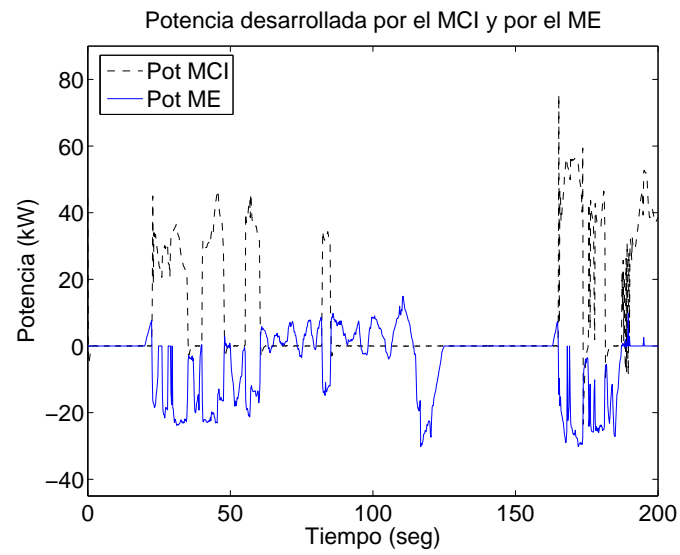


Figura 4.7: Potencia del MCI y del ME.

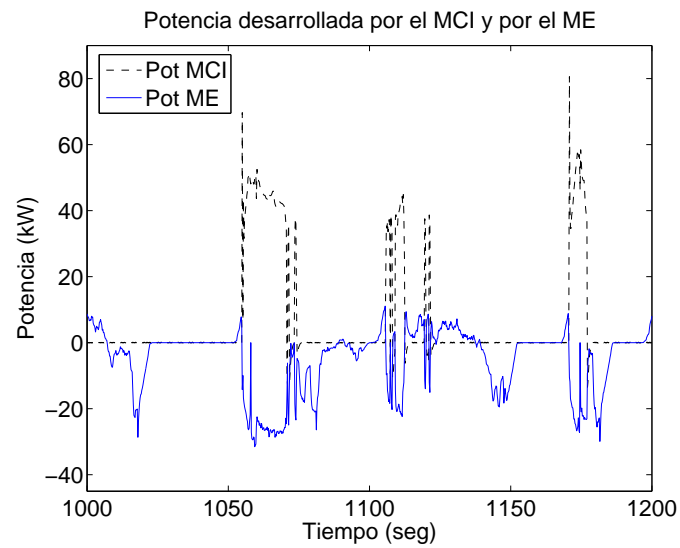


Figura 4.8: Potencia del MCI y del ME.

Una desventaja de este controlador es el efecto de “**switcheo**” que se da en las regiones cercanas a las potencias donde hay conmutación, como cuando entra en funcionamiento el MCI. Para atenuar este efecto se implantó una zona de histéresis, ésta es explicada en el capítulo 3. Como resultado de aplicar esta banda de histéresis se atenúa la frecuencia del **switcheo** provocado en las zonas de conmutación.

Los puntos de operación del MCI se muestran en la figura 4.9 y los puntos de operación del ME se muestran en la figura 4.10. Como se puede apreciar en la figura 4.9, gracias al sistema híbrido usado en este sistema de propulsión, se logra mantener operando al MCI en regiones más eficientes que cuando se usa como un sistema convencional.

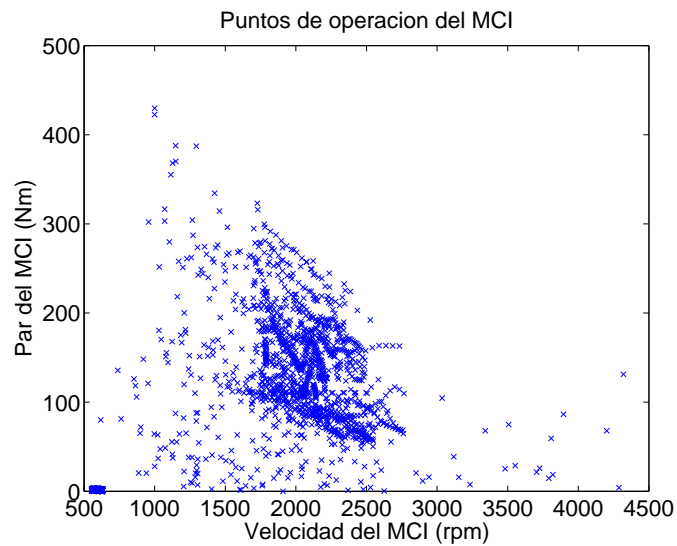


Figura 4.9: Puntos de operación del MCI.

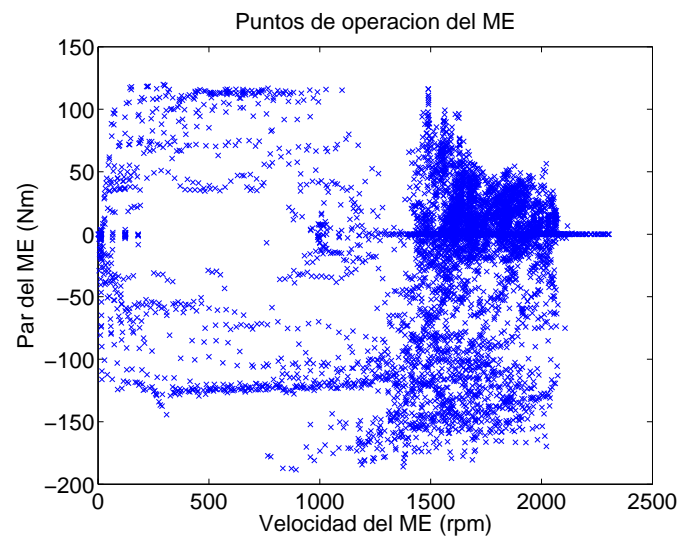


Figura 4.10: Puntos de operación del ME.

La evolución de los estados del MCI en diferentes intervalos de tiempo, m_a , \dot{m}_{fi} y ω_{ice} , se muestran en la figura 4.11 b) y c), 4.12 a) y b), y 4.13 a) y b), respectivamente. En la figura 4.11 a) y b) se muestra el flujo de aire que entra en la cámara de combustión, \dot{m}_{ao} , y en la figura 4.12 c) y d) se muestra la relación aire-combustible de la mezcla que entra en la cámara de combustión. En la figura m_a es la masa de aire en el múltiple de entrada, \dot{m}_{fi} es el combustible inyectado y ω_{ice} es la velocidad angular del MCI.

Como se puede apreciar en la figura 4.12, la relación A/C es difícil de mantener cuando el MCI trabaja en bajos regímenes de velocidad, pero en cuanto se trabaja en regímenes de operación mas adecuados, la relación se mantiene alrededor de el punto deseado.

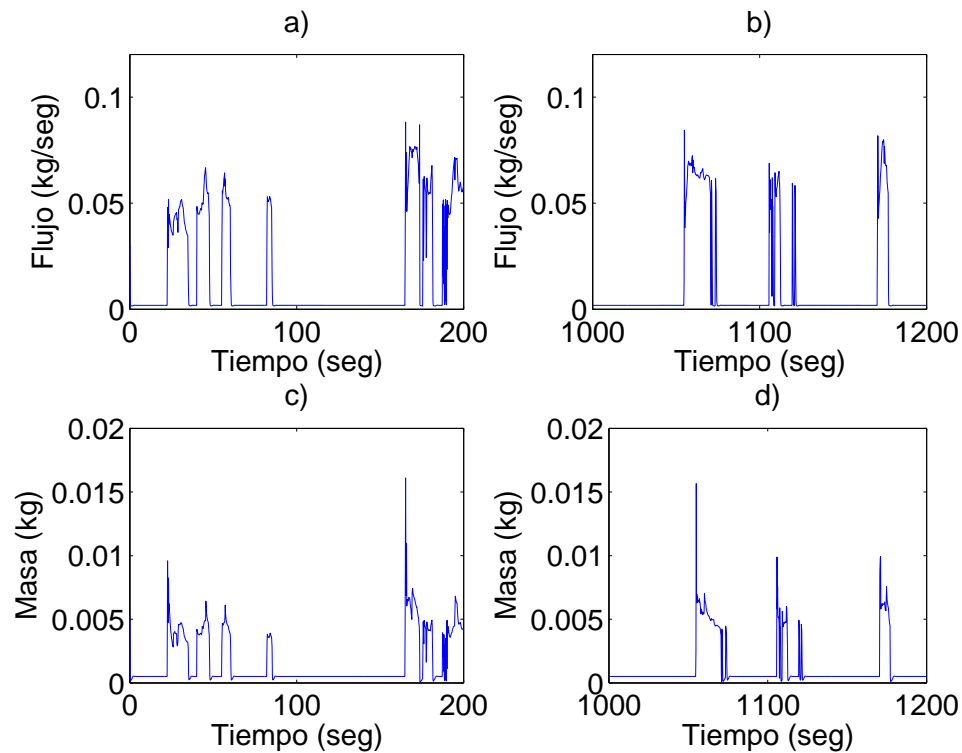


Figura 4.11: a) y b) Flujo de aire que sale del múltiple y entra a la cámara de combustión. c) y d) masa de aire en el múltiple de entrada.

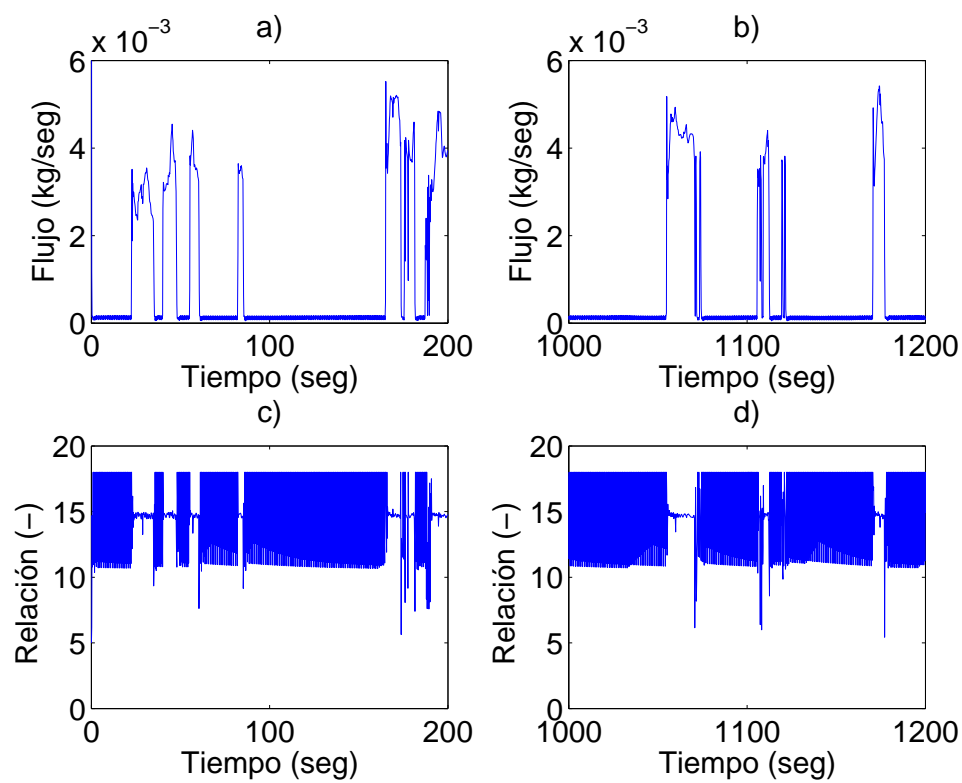


Figura 4.12: a) y b) Flujo de combustible que entra a la cámara de combustión. c) y d) Relación aire-gasolina de la mezcla que entra en la cámara de combustión.

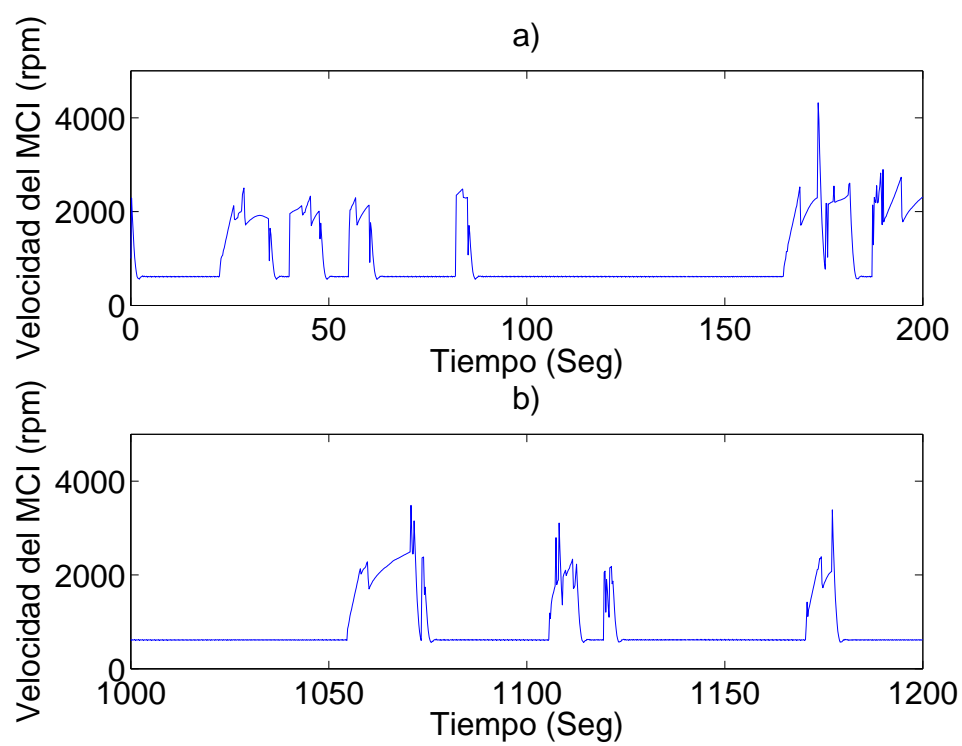


Figura 4.13: a) y b) Velocidad angular del MCI.

En las figuras 4.14 y 4.15 se muestra la evolución de los estados del ME en diferentes intervalos de tiempo. En la figura 4.14 se muestra la evolución de los flujos magnéticos en el estator en los ejes q y d. La figura 4.15 se muestra la evolución de los flujos magnéticos en el rotor en los ejes q y d. La velocidad del ME, en diferentes intervalos de tiempo, se muestra en la figura 4.16.

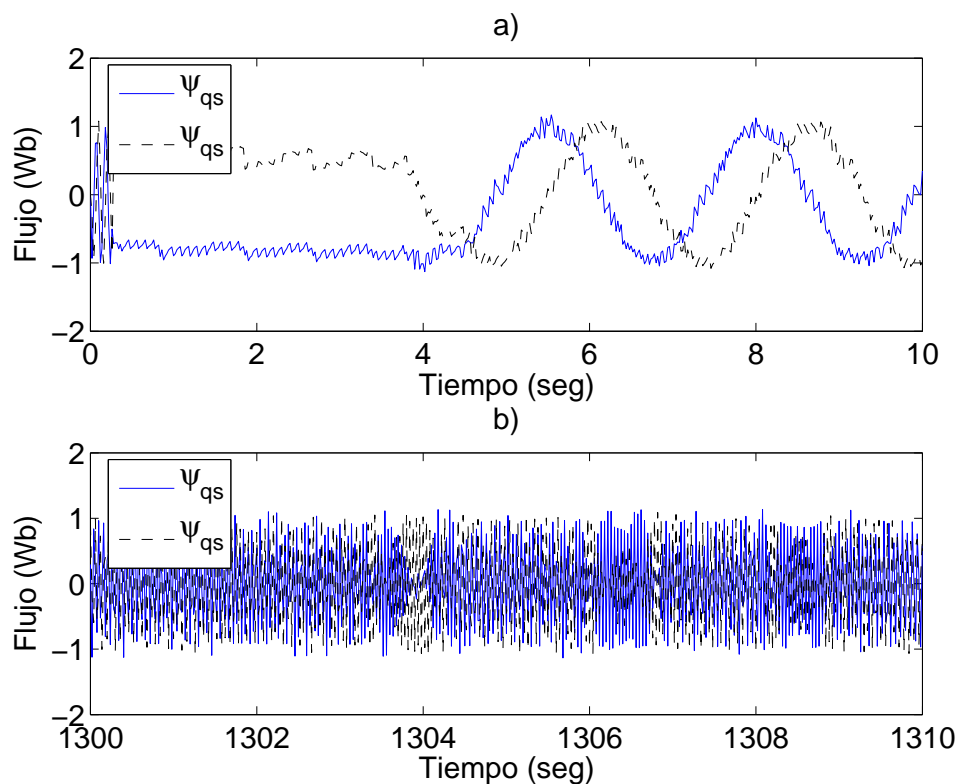


Figura 4.14: a) y b) Flujos magnéticos en el estator.

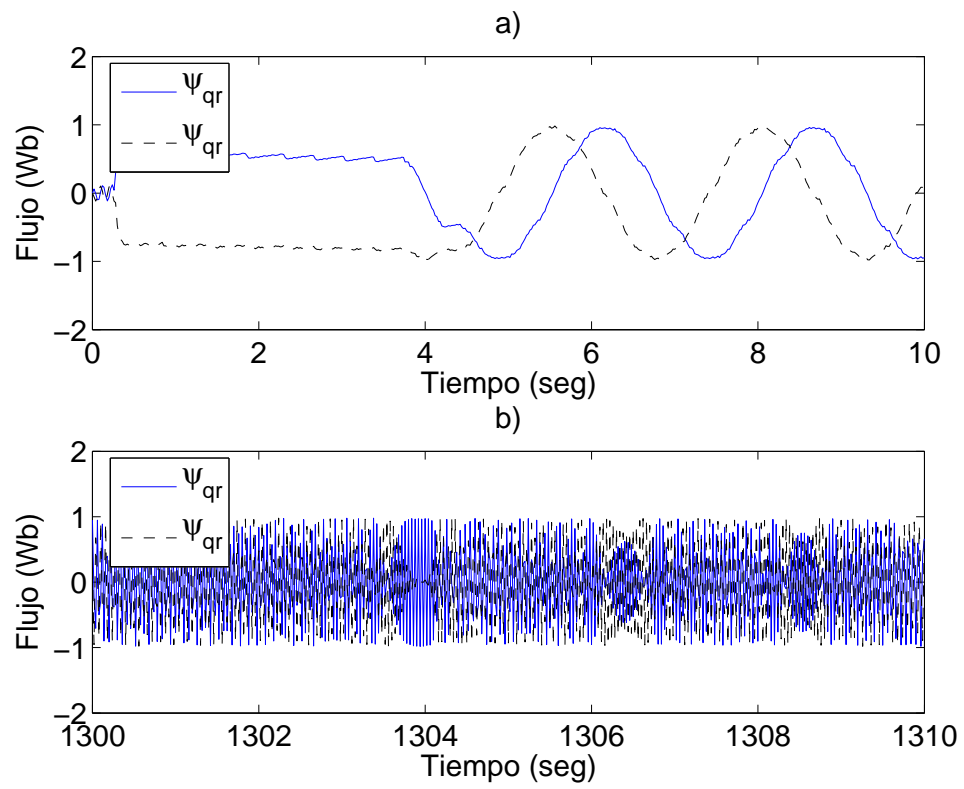


Figura 4.15: a) y b) Flujos magnéticos en el rotor.

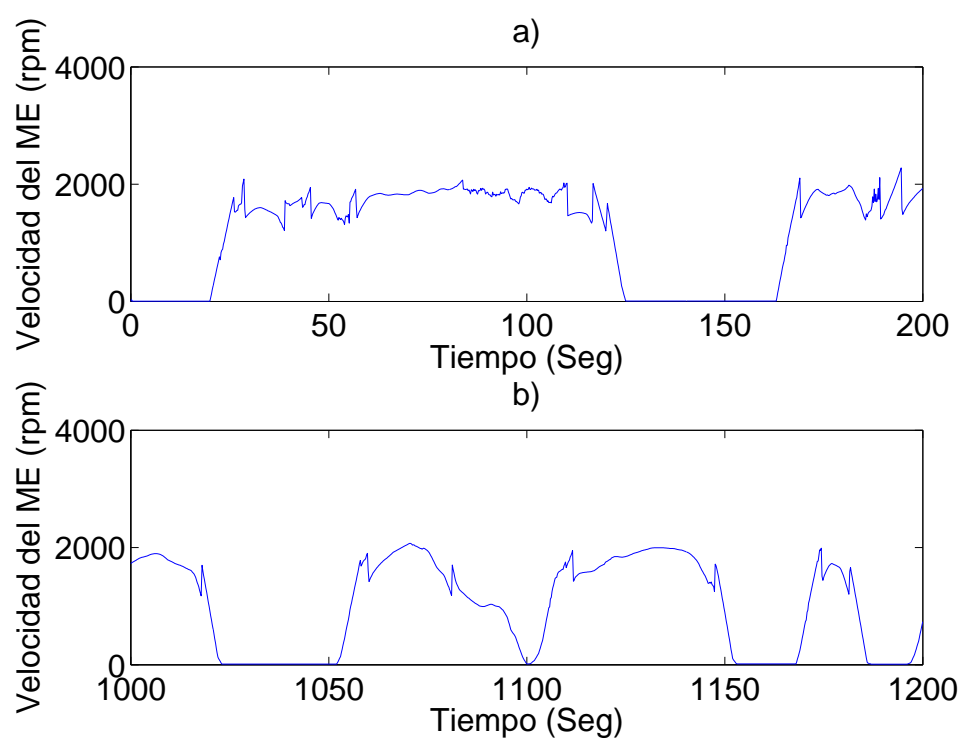


Figura 4.16: a) y b) Velocidad angular del ME.

Ciclo UDDS con EDC bajo

Para probar la funcionalidad del controlador se hicieron pruebas con diferentes estados de carga inicial en la batería, dando también buenos resultados, ya que lleva a la batería a el intervalo de carga fijado como normal. En la figura 4.17 a) se muestra el seguimiento de velocidad del ciclo UDDS, en el cual se observa que a pesar de tener un EDC bajo el seguimiento sigue siendo el mismo. En la figura 4.17 b) se muestra el error de seguimiento de velocidad, y en la figura 4.17 c) se muestra la evolución del estado de carga. En la figura 4.17 d) se muestra la gráfica de los puntos de operación del MCI.

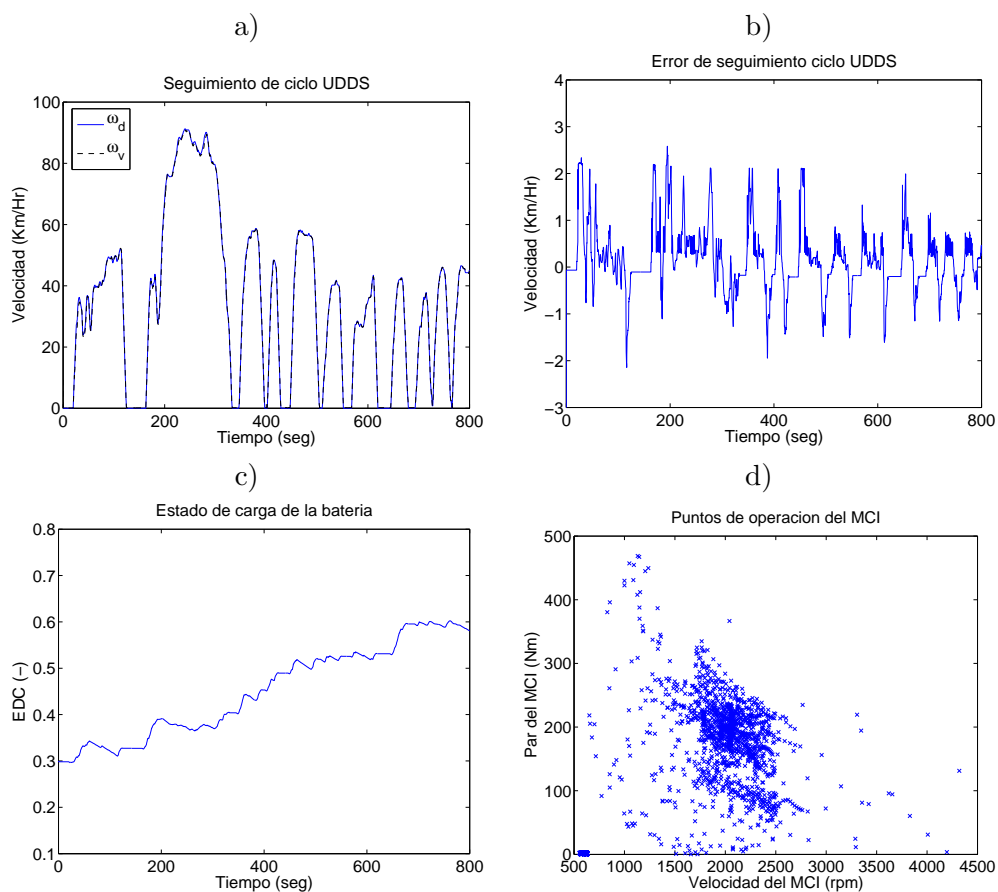


Figura 4.17: Ciclo UDDS con EDC inicial bajo.

Ciclo UDDS con EDC alto

Otra prueba que se hizo, fue tener un estado de carga de la batería alto, y como resultado se obtuvo que el controlador tiende a llevar el estado de carga a la región fijada como normal. En la figura 4.18 a) se muestra el seguimiento de velocidad del ciclo UDDS. En la figura 4.18 b) se muestra el error de seguimiento de velocidad, y en la figura 4.18 c) se muestra la evolución del estado de carga. En la figura 4.18 d) se muestra la gráfica de los puntos de operación del MCI.

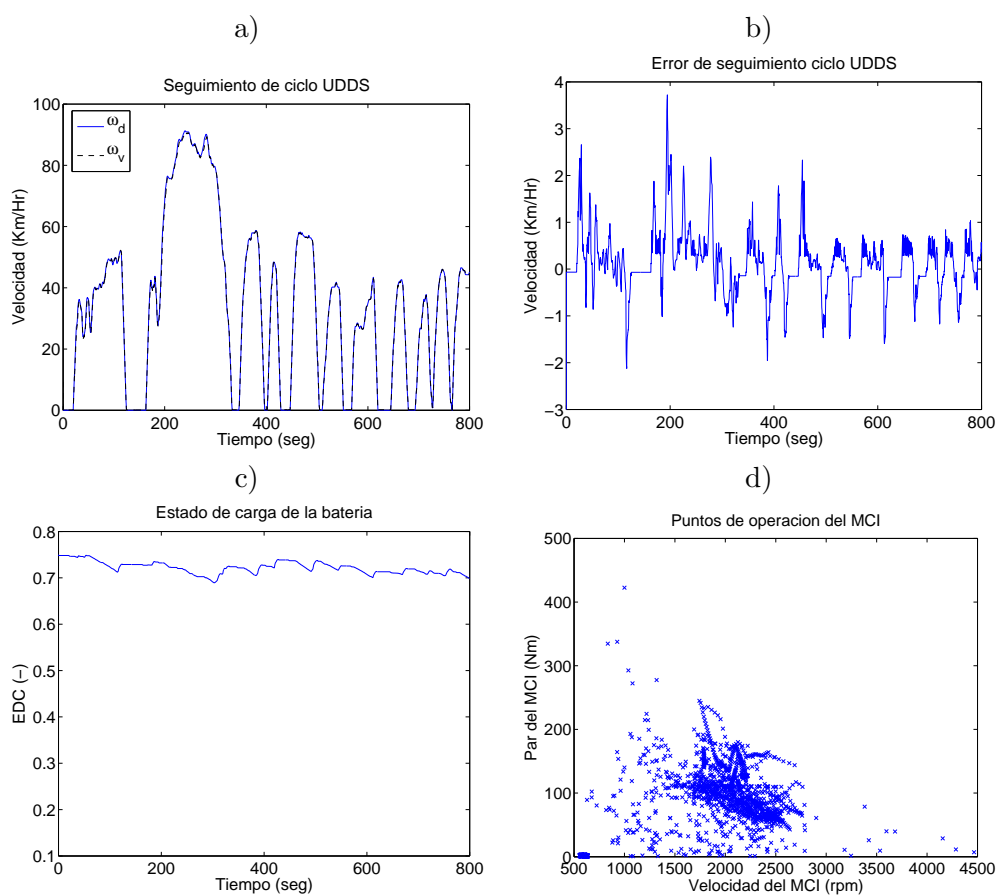


Figura 4.18: Ciclo UDDS con EDC inicial alto.

4.3.2 Ciclo HWFET

Este ciclo de manejo es equivalente a un tipo de manejo en carretera, o en vías de comunicación que permitan altas velocidades. En esta simulación, usando este ciclo, se usaron los mismos parámetros de la tabla 4.1, los cuales también dieron buenos resultados.

En la figura 4.19 se muestra el seguimiento del ciclo HWFET, en el cual también se tuvo un buen seguimiento, como se puede apreciar en la gráfica del error de seguimiento, mostrada en la figura 4.20. En la figura 4.21 se muestra la evolución del EDC de la batería, y como se puede apreciar, también es mantenido entre los límites deseados. Finalmente, en la figura 4.22 se muestra la gráfica de los puntos de operación del MCI

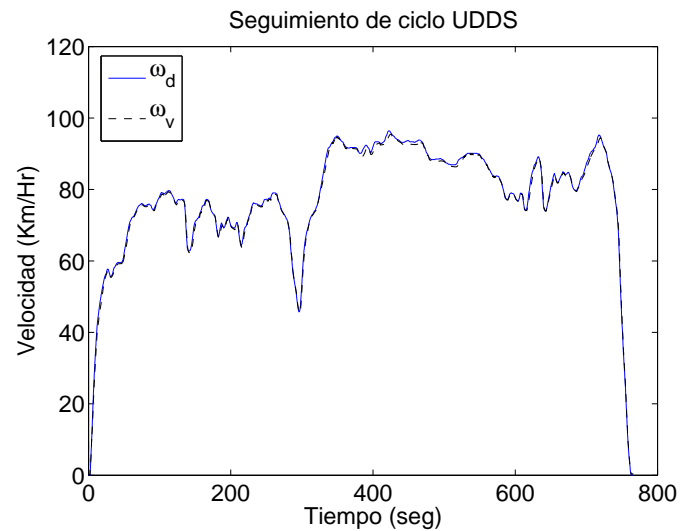


Figura 4.19: Seguimiento de velocidad para el ciclo HWFET. ω_d es la velocidad deseada y ω_v es la velocidad alcanzada por el vehículo

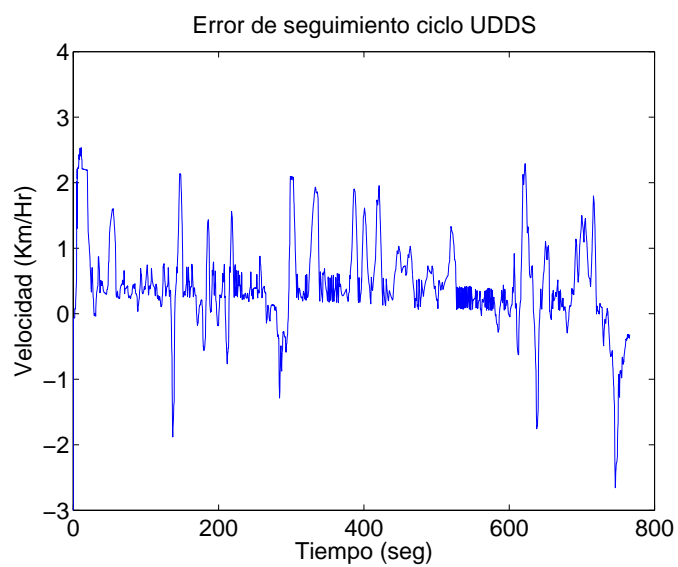


Figura 4.20: Error de seguimiento de velocidad para el ciclo HWFET.

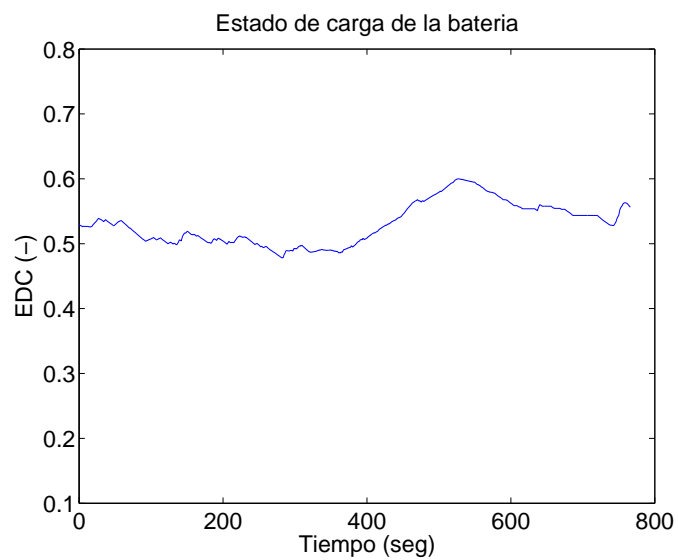


Figura 4.21: EDC para el ciclo HWFET.

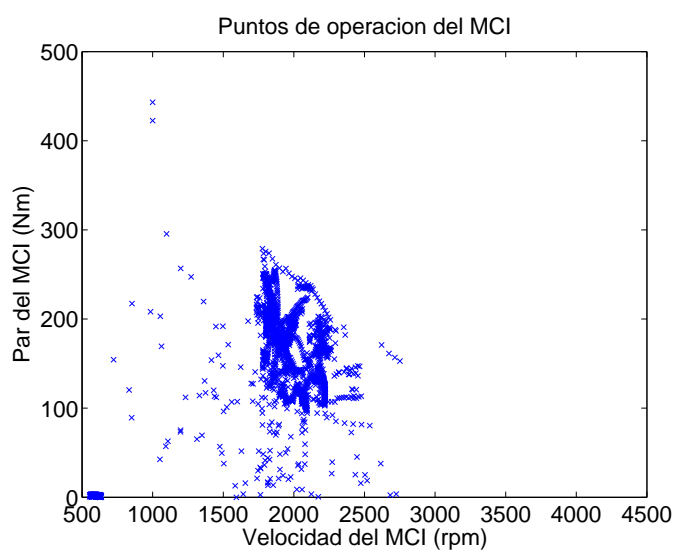


Figura 4.22: Puntos de operación del MCI para ciclo HWFET

Ciclo HWFET con EDC bajo

Para el ciclo HWFET también se hicieron pruebas con diferentes estados de carga inicial en la batería, dando también buenos resultados, ya que lleva a la batería al intervalo de carga fijado como normal. En la figura 4.23 a) se muestra el seguimiento de velocidad del ciclo HWFET, en el cual se observa que a pesar de tener un EDC bajo el seguimiento sigue siendo el mismo. En la figura 4.23 b) se muestra el error de seguimiento de velocidad, y en la figura 4.23 c) se muestra la evolución del estado de carga. En la figura 4.23 d) se muestra la gráfica de los puntos de operación del MCI.

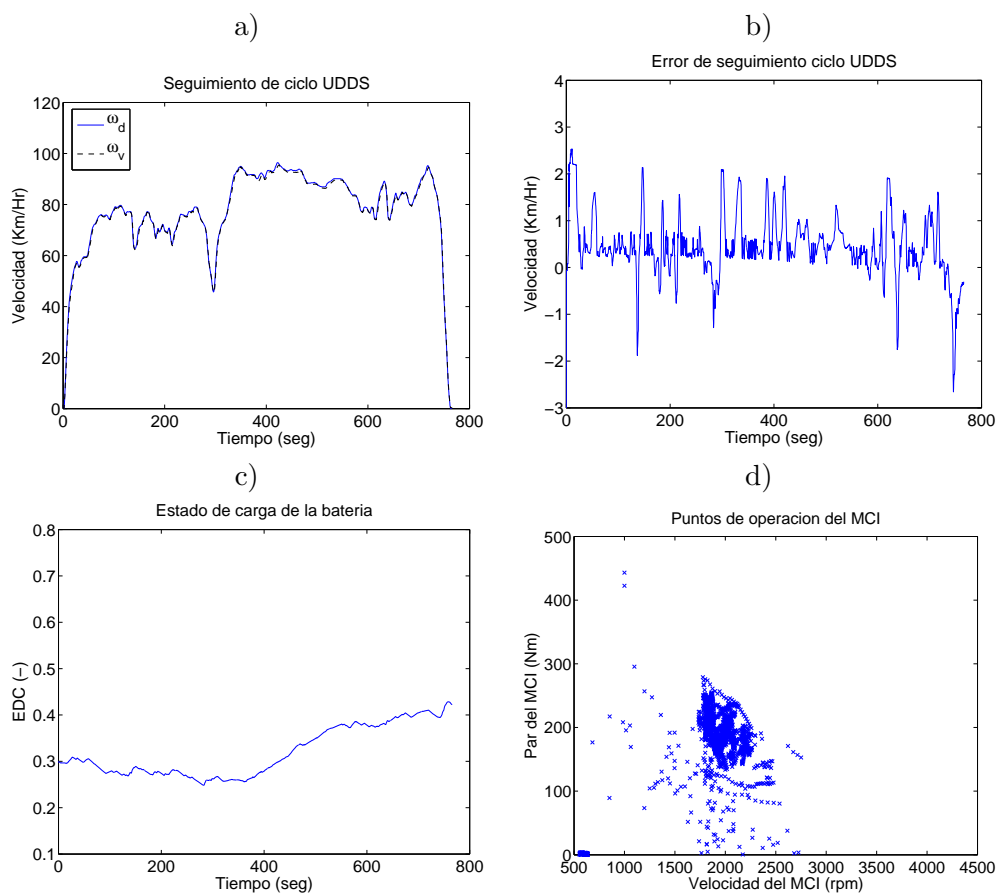


Figura 4.23: HWFET con EDC inicial bajo.

Ciclo UDDS con HWFET alto

Otra prueba que se hizo para el ciclo HWFET, fue tener un estado de carga de la batería alto, y como resultado se obtuvo que el controlador tiende a llevar el estado de carga a la región fijada como normal. En la figura 4.24 a) se muestra el seguimiento de velocidad del ciclo UDDS. En la figura 4.24 b) se muestra el error de seguimiento de velocidad, y en la figura 4.24 c) se muestra la evolución del estado de carga. En la figura 4.24 d) se muestra la gráfica de los puntos de operación del MCI.

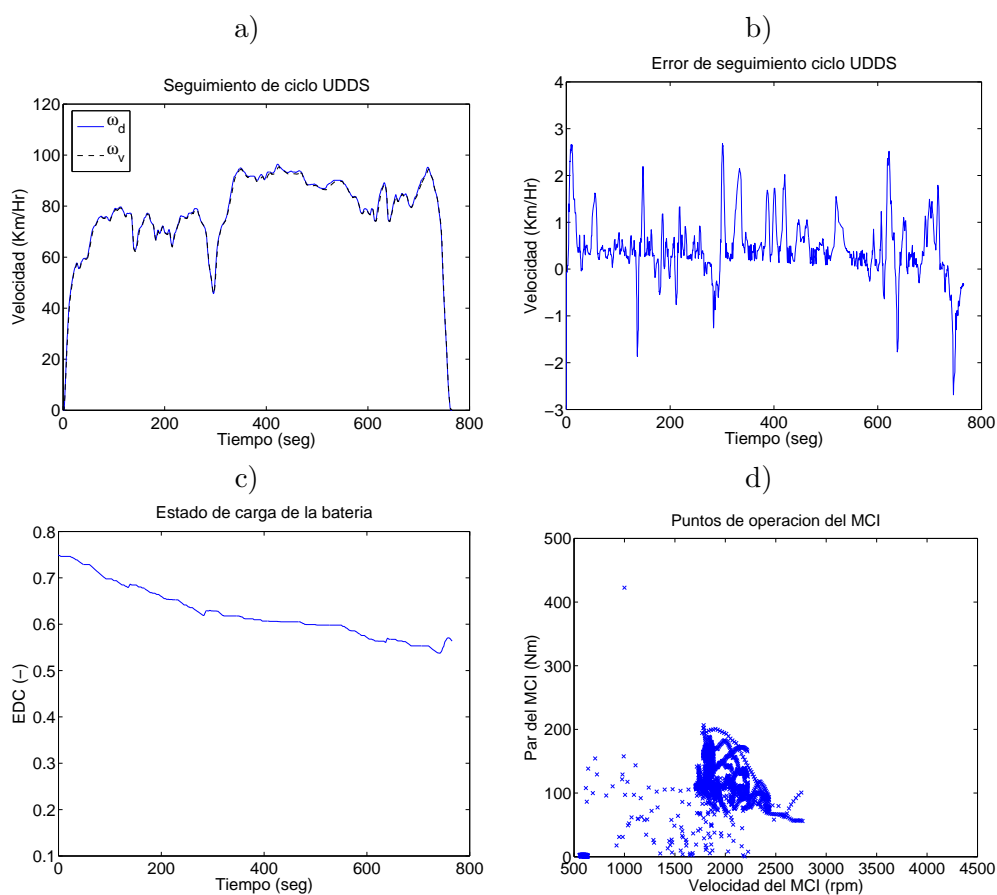


Figura 4.24: HWFET con EDC inicial alto.

4.3.3 Comparación con vehículo convencional

En esta sección se hizo una comparación con la configuración de un vehículo convencional. Para esta comparación se usaron los mismos parámetros que con el vehículo híbrido, es decir, el mismo MCI y la misma inercia, se usó el ciclo de manejo UDDS 4.1. Para el vehículo híbrido se tiene un estado inicial de carga de 0.63% de la batería.

En la figura 4.25 a) se muestra la operación del MCI en el vehículo convencional y en la figura 4.25 b) se muestra la operación del MCI en el vehículo híbrido. Como se puede apreciar, en el vehículo convencional el uso del MCI es mayor que en el del vehículo híbrido.

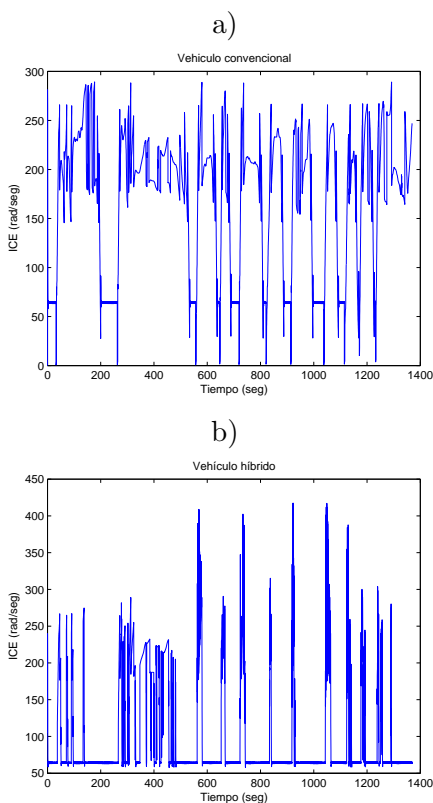


Figura 4.25: a) Operación del MCI vehículo convencional. b) Operación del MCI en un vehículo híbrido.

Como era de esperarse, con el uso del vehículo híbrido se tuvo un mayor ahorro de combustible. En la tabla 4.2 se muestra el consumo de combustible para cada configuración con el ciclo UDDS.

	Convencional	Híbrido
Consumo (lt)	1.301	1.043
Distancia (Km)	13.39	13.39
Rendimiento (Km/lt)	10.3	12.84

Tabla 4.2: Rendimiento

Capítulo 5

Conclusiones

En este capítulo se dan las conclusiones obtenidas a lo largo de este trabajo, algunas recomendaciones para mejorar este trabajo y otras opciones que se tienen para seguir trabajando en el desarrollo de este tema.

5.1 Conclusiones

Uno de los principales puntos faltantes en este trabajo es que necesita ser validado el modelo del vehículo, ya que a pesar que se tienen buenos modelos de cada subsistema, es necesario validar la dinámica de todos ellos juntos. Sin embargo, el modelo desarrollado en este trabajo sí da una buena representación de un sistema de propulsión híbrido y ayuda a entender el comportamiento de cada uno de los subsistemas que lo conforman, así como también da una buena representación de todo el vehículo considerando la interconexión de los subsistemas.

Otro aspecto donde hay necesidad de mejorar, es el relacionado con el almacenamiento de energía, ya que el modelo de la batería es muy idealizado. Se requiere agregar otro tipo de dinámicas al modelo para tener una mejor representación. A pesar de esto, el modelo usado funcionó bien para el objetivo deseado, es decir, dar una representación básica del sistema de almacenamiento eléctrico en el vehículo. Además de la batería es necesario modelar algunos otros sistemas, como un inversor, ya que la dinámica de este no está considerada.

El control basado en reglas es una estrategia de control de potencia básica, pero dió

buenos resultados, pues mantuvo al estado de carga de la batería en niveles deseados. El seguimiento de velocidad fue muy bueno y lo principal, se mantuvo la región de operación del MCI en una región determinada, por lo tanto, con este controlador se puede mover esta región de ser necesario para obtener mejor rendimiento del MCI. Un aspecto desfavorable de este controlador es que en los valores donde se dan los cambios de ME a MCI y viceversa, se da un efecto de "switchero", es decir, mientras la potencia deseada está cercana a estos valores, el control provoca que se esté cambiando entre ME y MCI hasta que se abandona esta región. Por lo tanto es necesario desarrollar un nuevo tipo de controlador donde no se de este tipo de efectos que son no deseados.

Un aspecto que fue poco desarrollado en este trabajo es un análisis dimensional detallado de cada elemento del sistema de propulsión híbrido, ya que es posible que se esté sobredimensionando algún elemento. Es decir, primero se tiene que analizar cual es el tamaño del vehículo que se requiere y cuales son sus características deseadas, para que así a partir de estos datos se vaya dimensionando cada elemento en el sistema de propulsión.

Una conclusión importante en este trabajo es que con el uso de un sistema de propulsión híbrido se pueden usar MCI más pequeños dando las mismas prestaciones que un sistema convencional. En este trabajo se usó el modelo de un motor de un vehículo de tamaño medio (sedán) para movilizar una inercia de un vehículo más grande (camión de carga mediano), lo cual implica un ahorro en el consumo de combustible y asociado a este ahorro, una menor contaminación.

Finalmente, este trabajo es un inicio en el estudio de las propiedades, ventajas y desventajas de los vehículos híbridos. Hasta ahora en México es poco el trabajo formal que se ha desarrollado en este tema. Parece prometedor seguir estudiando este tipo de vehículos, ya que son una buena opción para disminuir el consumo de combustibles derivados del petróleo así como para reducir la contaminación.

5.2 Trabajo futuro

- Validar el modelo y el controlador con sistemas físicos.
- Hacer una buena estimación del consumo de combustible para hacer comparaciones y

estimar las mejoras.

- Probar otros ciclos de manejo y otros EDC iniciales que prueben la efectividad del controlador y del sistema en general.
- Desarrollar controladores más eficientes.
- Detectar las condiciones de manejo para que el mismo controlador haga ajustes de acuerdo a estas condiciones de manejo, por ejemplo, usar ciertos parámetros para ciudad y ciertos parámetros para carretera.
- Realizar estudios comparativos de impacto ambiental y energético entre un vehículos híbridos, vehículos convencionales y vehículos eléctricos.

Apéndice A

Diagramas

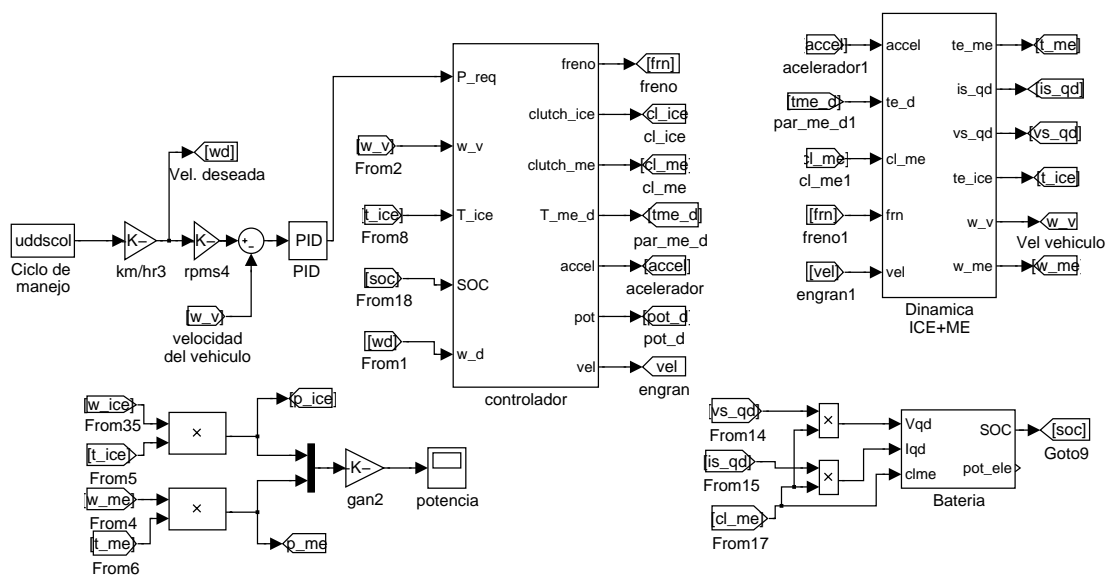


Figura A.1: Diagrama principal en simulink

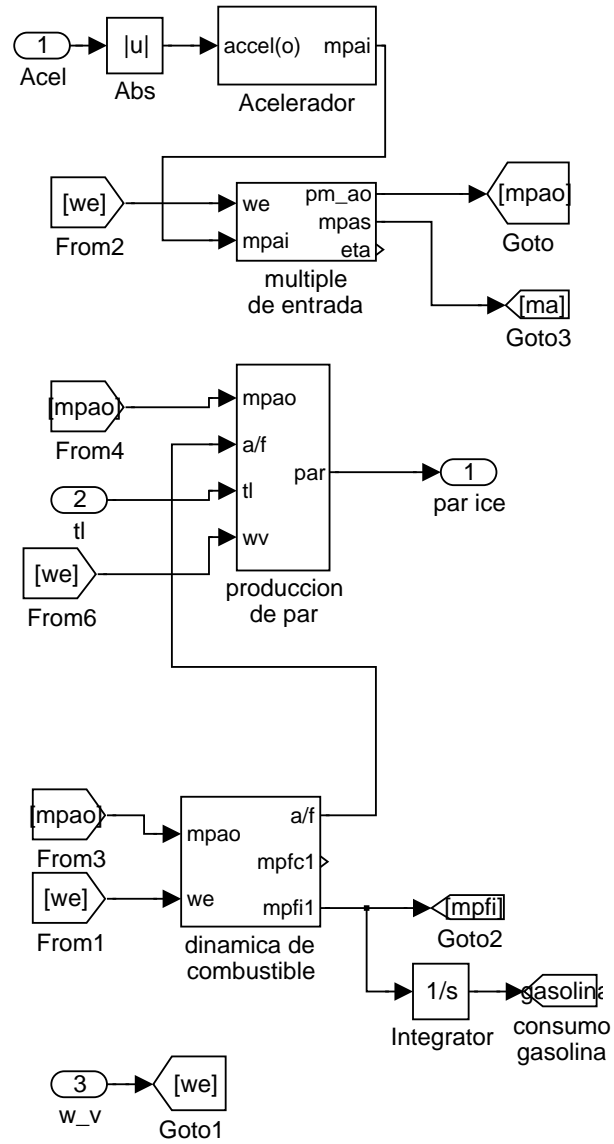


Figura A.2: Diagrama del MCI en simulink

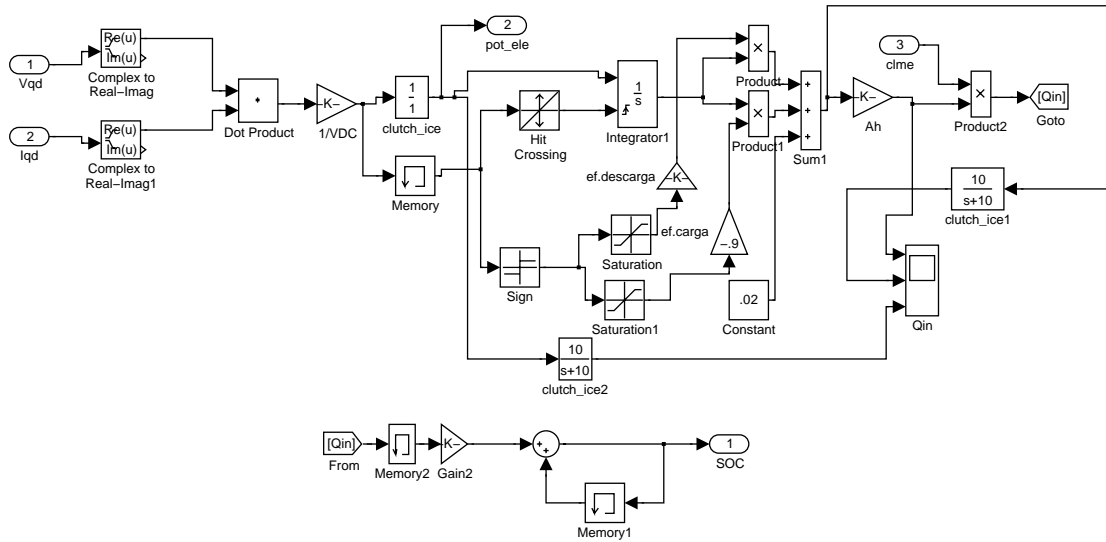


Figura A.3: Diagrama de la batería en simulink

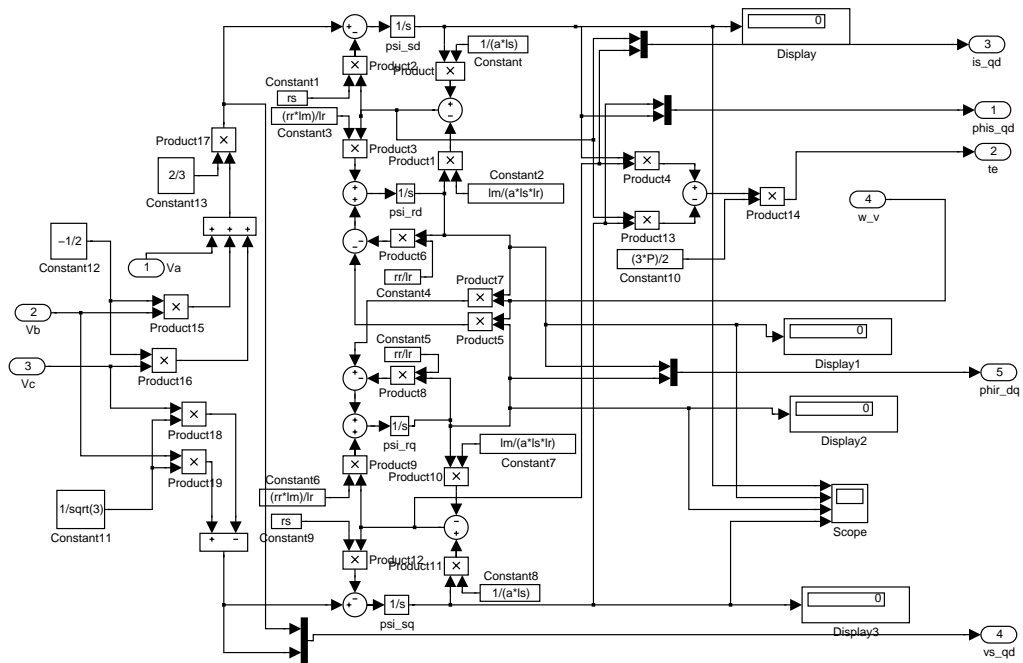


Figura A.4: Diagrama del ME en simulink

Bibliografía

- [1] U.S. Environmental Protection Agency. *http://www.epa.gov*.
- [2] Andrew C. Baisden and Ali Emadi. Advisor-based model of a battery as an ultracapacitor energy source for hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pages 199–205, January 2004.
- [3] Paul Bowles, Huei Peng, and Xianjie Zhang. Energy management in a parallel hybrid electric vehicle with a continuously variable transmission. *Proceedings of the American Control Conference, Chicago, Illinois*, pages 55–59, June 2000.
- [4] Hybrid Cars. *http://www.hybridcars.com*.
- [5] Erik J. Cegnar, Herb L. Hess, and Brian K. Johnson. A purely ultracapacitor energy storage system for hybrid electric vehicles utilizing a microcontroller-based dc-dc boost converter. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pages 1160–1164, 2004.
- [6] D. Cho and J. K. Hedrick. Automotive powertrain modeling for control. *Journal of Dynamic System, Measurement, and Control*, Vol. 111:568–576, December 1989.
- [7] S. R. Cikanek, K. E. Bailey, R. C. Baraszu, and B.K. Powell. Control system and dynamic model validation for a parallel hybrid electric vehicle. *Proceedings of the American Control Conference, Sand Diego, California*, pages 1222–1227, June 1999.
- [8] Jeffrey A. Cook and B. K. Powell. Modeling of an internal combustion engine for control analysis. *IEEE Control Systems Magazine*, pages 20–26, August 1988.

- [9] Sebastien Delprat, Jimmy Lauber, Thierry Marie Guerra, and J. Rimaux. Control of a parallel hybrid powertrain: optimal control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 53(3):872–881, May 2004.
- [10] K. David Huang and Sheng-Chung Tzeng. A new parallel-type hybrid electric-vehicle. *Applied Energy*, pages 51–64, January 2004.
- [11] Lucio Ippolito, Vincenzo Loia, and Pierluigi Siano. Extended fuzzy c-means and genetic algorithms to optimize power flow management in hybrid electric vehicles. *Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications*, pages 115–119, June 2003.
- [12] Euh-Suh Koo, Hyeoun-Dong Lee, Seung-Ki Sul, and Joohn-Sheok Kim. Torque control strategy for a parallel hybrid vehicle using fuzzy logic. *Industry Applications Conference*, pages 1715–1720, October 1998.
- [13] Reza Langari and Jong-Seob Won. Integrated drive cycle analysis for fuzzy logic based energy management in hybrid vehicles. *The IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pages 290–295, 2003.
- [14] Chan-Chiao Lin, Huei Peng, Jessy W. Grizzle, and Jun-Mo Kang. Power management strategy for a parallel hybrid electric truck. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, pages 839–849, November 2003.
- [15] John J. Moskwa and J. Karl Hedrick. Nonlinear algorithms for automotive engine control. *IEEE Control Systems Magazine*, pages 88–93, 1990.
- [16] John J. Moskwa and Robert W. Weeks. Automotive engine modeling for real-time control using matlab/simulink. *International Congress and Exposition, Detroit, MI*, pages 1–15, March 1995.
- [17] G. Paganelli, S. Delprat, T.M. Guerra, J. Rimaux, and J.J Santin. Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains. *Vehicular Technology Conference*, pages 2079–2081, May 2002.

- [18] B. K. Powell and K. E. Bailey. A hybrid electric vehicle powertrain dynamic model. *Proceedings of the American Control Conference, Seattle, Washington*, pages 1677–1682, June 1995.
- [19] B. K. Powell, K. E. Bailey, and S. R. Cikanek. Dynamic modeling and control of hybrid electric vehicle powertrain systems. *IEEE Control Systems*, pages 17–33, October 1998.
- [20] Barry Powell, Xianjie Zhang, and Robert Baraszu. Computer model for a parallel hybrid electric vehicle (phev) with cvt. *Proceedings of the American Control Conference, Chicago, Illinois*, pages 1011–1015, June 2000.
- [21] B.K. Powell and T.E. Pilutti. A range extender hybrid electric vehicle model. *Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control, Lake Buena Vista, FL*, pages 2736–2741, December 1994.
- [22] Niels J. Schouten, Mutasim A. Salman, and Naim A. Kheir. Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 10:460–468, May 2002.
- [23] Antonio Sciarretta, Michael Back, and Lino Guzzella. Optimal control of parallel hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, pages 352–362, May 2004.
- [24] Delprat Sebastien, Guerra Thierry Marie, Paganelli Gino, LAuber Jimmy, and Delhom Michel. Control strategy optimization for an hybrid parallel powertrain. *Proceedings of the American Control Conference, Arlington, VA*, pages 1315–1320, June 2001.
- [25] Shueiwen Shen and Frans E. Veldpaus. Analysis and control of a flywheel hybrid vehicular powertrain. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, pages 645–660, September 2004.
- [26] Xiaofeng Yin and Anlin Ge. A dynamic model of engine using neural network description. *Proceedings of the IEEE International Vehicle Electronics Conference*, pages 109–114, September 2001.

- [27] Xiangqun Zhang, Jack Katzberg, Bruce Cooke, and J.Kos. Modeling and simulation of a hybrid-engine. *Conference on Communications, Power and Computing, Winnipeg, MB*, pages 286–291, May 1997.

Nomenclatura

- α ángulo del acelerador, véase la ec. 2.4, página 11
- β Relación aire/combustible deseada, véase la ec. 2.25, página 21
- Δt_{it} Retraso de la admisión a la producción de par, véase la ec. 2.31 , página 23
- Δt_{st} Retraso de la chispa a la producción de par, véase la ec. 2.31 , página 23
- \dot{m} Flujo de aire en el cuerpo del acelerador, véase la ec. 2.6, página 13
- \dot{m}_a Masa de aire en el múltiple de entrada, véase la ec. 2.18, página 17
- \dot{m}_m Flujo másico de entrada en el múltiple, véase la ec. 2.16, página 16
- \dot{m}_o Flujo másico de salida en el múltiple, véase la ec. 2.16, página 16
- \dot{m}_{ai} Cantidad de masa que entra al múltiple, véase la ec. 2.18, página 17
- \dot{m}_{ao} Cantidad de masa que sale del múltiple, véase la ec. 2.18, página 17
- \dot{m}_{fc} Comando de flujo de inyección de combustible deseado, véase la ec. 2.14, página 15
- \dot{m}_{fi} Flujo de combustible inyectado, véase la ec. 2.14, página 15
- \dot{m}_{fi} Relación actual de combustible entrando a la cámara de combustión, véase la ec. 2.26, página 21
- \dot{m}_f Flujo de combustible en el múltiple, véase la ec. 2.14, página 15
- \dot{m}_p Velocidad de evaporación del combustible, véase la ec. 2.14, página 15
- \dot{P} Presión en el múltiple de entrada, véase la ec. 2.16, página 16
- \dot{Q}_m Variación de flujo de calor en el múltiple, véase la ec. 2.16, página 16
- \dot{T} Variación de temperatura en el múltiple, véase la ec. 2.16, página 16

- η Parámetro de acumulación de combustible, véase la ec. 2.14, página 15
- η_{vol} Efectividad del proceso de inducción del motor, véase la ec. 2.24, página 20
- γ Es la relación entre los calores específicos a presión constante y a volumen constante, véase la ec. 2.6, página 13
- \dot{m}_{fc} Flujo de combustible deseado, véase la ec. 2.25, página 21
- neurona (s, i) i -ésima neurona de la s -ésima capa, véase la ec. 2.1, página 10
- τ_f Constante de tiempo del inyector, véase la ec. 2.14, página 15
- τ_f Constante de tiempo efectiva de la inyección de combustible, véase la ec. 2.26, página 21
- τ_p Tiempo de evaporación y condensación del combustible, véase la ec. 2.14, página 15
- θ Ángulo del acelerador, véase la ec. 2.8, página 13
- ω_e Velocidad angular del MCI, véase la ec. 2.22, página 19
- A Área de flujo, véase la ec. 2.8, página 13
- A/C Relación aire combustible, véase la ec. 2.11, página 14
- A_e Área efectiva, véase la ec. 2.6, página 13
- c_1 Constante física, véase la ec. 2.22, página 19
- C_d Coeficiente de descarga, véase la ec. 2.8, página 13
- C_p Calor específico a presión constante, véase la ec. 2.16, página 16
- c_T Representa la capacidad máxima de par de un MCI, véase la ec. 2.31, página 22
- C_v Calor específico a volumen constante, véase la ec. 2.16, página 16
- $f(\cdot)$ función de transferencia no lineal, véase la ec. 2.2, página 10
- I_e Inercia motor y de la bomba convertidora de par, véase la ec.2.28, página 21

- J_e Inercia de la masa giratoria (flywheel), véase la ec. 2.17, página 16
- J_l Inercia de la carga, véase la ec. 2.17, página 16
- J_{eg} Inercia del engranaje en la flecha del MCI, véase la ec. 2.17, página 16
- K_a Relación de engranaje del MCI a la carga, véase la ec. 2.17, página 16
- M Flujo de masa de salida del múltiple de entrada, véase la ec. 2.9, página 14
- m Masa en el múltiple en cualquier momento, véase la ec. 2.16, página 16
- MAX Flujo máximo, véase la ec. 2.19, página 18
- N Velocidad angular del MCI, véase la ec. 2.9, página 14
- n_s total de neuronas de la s-ésima capa, véase la ec. 2.1, página 10
- P Presión en el múltiple de entrada, véase la ec. 2.9, página 14
- P_d Presión de después de la garganta, véase la ec. 2.7, página 13
- P_d Presión después de la garganta, véase la ec. 2.6, página 13
- P_m Presión del múltiple de entrada, véase la ec. 2.21, página 19
- P_u Presión de salida antes de la garganta, véase la ec. 2.6, página 13
- PRI Influencia normalizada de la presión, véase la ec. 2.19, página 18
- Q_t^D consumo de combustible, véase la ec. 2.5, página 11
- R Es la constante de gas específico, véase la ec. 2.6, página 13
- R_a Radio del engrane de la flecha de transmisión, véase la ec. 2.17, página 16
- R_e Radio del engrane de la flecha del MCI, véase la ec. 2.17, página 16
- T_a Par debido a los accesorios, véase la ec. 2.28, página 21
- T_e Par generado por el MCI, véase la ec. 2.10, página 14

- T_e^D par de salida del MCI, véase la ec. 2.4, página 11
- T_f Fricción del motor, véase la ec. 2.28, página 21
- T_i Par del motor, véase la ec. 2.28, página 21
- T_i Temperatura de la masa de entrada, véase la ec. 2.16, página 16
- T_p Par de la bomba convertidora de par, véase la ec. 2.28, página 21
- T_u Temperatura antes de la garganta, véase la ec. 2.6, página 13
- T_l Par de carga, véase la ec. 2.17, página 16
- TC Caracterización normalizada del acelerador, véase la ec. 2.19, página 18
- U entrada del MCI, véase la página 11.
- V_e Desplazamiento del motor, véase la ec. 2.23, página 20
- V_m Volumen del múltiple de entrada, véase la ec. 2.23, página 20
- w_e velocidad angular del motor, véase la ec. 2.4, página 11
- x_i^s salida de la neurona (s, i) , véase la ec. 2.2, página 10
- y salida del MCI, véase la página 11
- z_i^s Entrada en la red de la neurona (s, i) , véase la ec. 2.1, página 10
- A/C Relación aire combustible, véase la página 22
- ACH Avance/retroceso de la chispa, véase la ec. 2.31, página 22
- IAC Influencia normalizada de aire combustible, véase la página 22