



Escuela Técnica Superior de Ingenieros
Universidad de Sevilla



Estrategias De Control Para Vehículos Híbridos Con Pilas De Combustible

Trabajo de Máster

Máster en Automática, Robótica y Telemática

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.

Autor: David Marcos Rodríguez

Tutor: Carlos Bordóns Alba

Sevilla, June 29, 2010

DEDICATORIA

A quienes no pueden leer este proyecto.

Agradecimientos

|

*A mis compañeros de laboratorio:
Elena González, Carlos Montero,
Manuel Rodríguez, Vicente Madero,
Alejandro Oliva y Antonio Pérez por su ayuda,
su implicación en todos los proyectos,
y sobre todo por su compañía y cercanía.*

*A mis jefes:
Teodoro Álamo, Eduardo F. Camacho,
Miguel Ángel Ridao y especialmente a mi tutor,
Carlos Bordóns, por su apoyo,
por todo lo que he aprendido de ellos
y por la confianza que siempre han tenido en mí.
Aunque sobre todo les agradezco el trato
y el comportamiento que han tenido conmigo,
en unos años en los que el trabajo
ha supuesto un punto de apoyo imprescindible en mi vida.*

*A Malele, por el tiempo que para
este proyecto le he quitado.
Y por el que ella me ha dado.*

*Y sobre todo a mis padres.
Por su ilusión y su compañía.
Y por todas las cosas que, por obvias,
no merece la pena que sean escritas.*

|

- GRACIAS -

Contenido

Contenido	i
Índice de Figuras	vi
Índice de Tablas	xi
Lista de Acrónimos	xiii
1 Introducción	1
1.1 Objetivos	1
1.2 Punto de partida.	1
1.3 Antecedentes: el Proyecto Hércules.	1
1.3.1 Introducción.	1
1.3.2 Las Columnas y El Olimpo.	1
1.3.3 El León.	2
1.3.4 Vehículo Original.	3
2 Estado del Arte	5
2.1 Controladores Heurísticos.	5
2.2 Controladores Lineales.	5
2.3 Redes Neuronales.	6
2.4 Control Óptimo.	6
2.5 Control Subóptimo.	6
2.6 Control Predictivo.	6

3	Descripción del sistema	8
3.1	Descripción del Vehículo.	8
3.2	Almacenamiento de Hidrógeno	8
3.3	Descripción del Sistema de Gestión de Potencia.	9
3.4	Descripciones de los componentes.	12
3.4.1	Motor eléctrico.	12
3.4.2	Pila de combustible.	12
3.4.3	Baterías.	12
3.4.4	Súper Condensadores.	14
3.4.4.1	Justificación de su uso.	14
3.4.4.2	Fundamentos Básicos de los Súper Condensadores.	15
3.4.4.3	Diseño de un Conjunto de Súper Condensadores.	19
4	Modelado del Sistema	23
4.1	Introducción.	23
4.2	Funcionamiento Global.	23
4.2.1	Referencias.	24
4.2.2	Controlador.	25
4.2.3	Sistema Real.	25
4.2.4	Elementos Terminales.	25
4.3	Pila de Combustible.	25
4.3.1	Introducción.	25
4.3.2	Modelo Matemático.	26
4.3.3	Implementación en Simulink.	28
4.4	Baterías	30
4.4.1	Introducción.	30
4.4.2	Modelo Matemático.	30
4.4.3	Implementación en Simulink.	31
4.5	Súper Condensadores.	35
4.6	Motor Eléctrico.	35
4.7	Modelo Inverso del Vehículo.	35

4.7.1	Introducción.	35
4.7.2	Modelo Matemático.	35
4.7.3	Implementación en Simulink.	37
5	Controlador MPC	39
5.1	Control Predictivo.	39
5.2	Justificación del uso del controlador MPC.	39
5.3	Implementación.	40
5.3.1	Función objetivo.	40
5.3.2	Variables.	41
5.3.2.1	Variables manipuladas.	41
5.3.2.2	Salidas.	42
5.3.3	Modelo del Sistema.	42
5.3.3.1	Pila de Combustible.	43
5.3.3.2	Baterías.	43
5.3.3.3	Súper Condensadores.	45
5.3.4	Normalización de las variables.	47
5.3.5	Restricciones.	47
5.3.5.1	Valores.	47
5.3.5.2	Dureza.	48
5.3.6	Opción Paro/Marcha.	49
5.4	Puesta a Punto.	50
6	Simulaciones	53
6.1	Introducción	53
6.2	New European Driving Cycle	54
6.2.1	Descripción general	54
6.2.2	Ningún sistema de almacenamiento.	54
6.2.3	Baterías.	54
6.2.4	Súper Condensadores.	63
6.2.5	Baterías y Súper Condensadores.	64

6.3	10-15 Mode.	68
6.3.1	Descripción General	68
6.3.2	Baterías.	68
6.3.3	Súper Condensadores.	69
6.4	HighWay Fuel Economy schedule.	74
6.4.1	Descripción General	74
6.4.2	Baterías.	74
6.4.3	Súper Condensadores.	75
6.5	Urban Dynamometer Driving Schedule.	80
6.5.1	Descripción General	80
6.5.2	Baterías.	80
6.5.3	Súper Condensadores.	81
6.6	New York City Cycle.	86
6.6.1	Descripción General	86
6.6.2	Baterías.	86
6.6.3	Súper Condensadores.	87
6.7	Look Ahead.	92
6.7.1	Introducción.	92
6.7.2	New European Driving Cycle con Look Ahead.	92
6.7.2.1	Baterías (Look Ahead).	92
6.7.2.2	Súper Condensadores (Look Ahead).	92
6.7.3	New York City Cycle con Look Ahead.	97
6.7.3.1	Baterías (Look Ahead).	97
6.7.3.2	Súper Condensadores (Look Ahead).	97
7	Conclusiones	102
7.1	Introducción.	102
7.2	New European Driving Cycle.	102
7.2.1	Comparación de los resultados con la pila siempre en marcha.	102
7.2.2	Comparación de los resultados con la pila en modo marcha/paro.	103
7.3	Otros Ciclos.	104

7.4	Look Ahead.	106
7.5	Controlador MPC	107
7.6	Futuras Mejoras.	108

Referencias		110
--------------------	--	------------

Índice de Figuras

1.1	Hidrogenera de <i>Las Columnas</i>	2
1.2	Vehículo de <i>El León</i>	2
3.1	Colocación de los dispositivos en el vehículo.	9
3.2	Integración de los depósitos de hidrógeno en el vehículo.	10
3.3	Primera Configuración.	10
3.4	Segunda Configuración.	11
3.5	Tercera Configuración.	11
3.6	Motor Eléctrico.	12
3.7	Pila de Combustible.	13
3.8	Pila de combustible integrada en el vehículo.	14
3.9	Plano de la batería.	15
3.10	Curvas de Descarga a Distintas Intensidades.	16
3.11	Curvas de Descarga a Distintas Temperaturas.	17
3.12	Condensadores conectados en serie.	18
3.13	Condensadores conectados en paralelo.	19
4.1	Esquema General del Modelo con Baterías y SC.	24
4.2	Referencias.	24
4.3	Potencia neta de la pila y consumo de los elementos auxiliares.	26
4.4	Pot. neta de la pila frente a potencia de los elementos auxiliares.	26
4.5	Rendimiento de la pila de combustible.	27
4.6	Curva de polarización.	28
4.7	Subsistema de la pila en Simulink.	28

4.8	Subsistema de la pila en Simulink. Stacks.	29
4.9	Curva de descarga a temperatura constante.	31
4.10	Interpolación de la curva de descarga a 25°C.	32
4.11	Pérdidas en el convertidor de baterías para $P_{bat} \geq 0$	32
4.12	Pérdidas en el convertidor de baterías para $P_{bat} < 0$	33
4.13	Modelo del conjunto de baterías.	33
4.14	Modelo de una batería.	34
4.15	Modelo del conjunto de SC.	35
4.16	Modelo Inverso del Vehículo.	38
5.1	Esquema Básico MPC.	40
5.2	Pantalla de variables del <i>toolbox</i> de MPC.	43
5.3	Esquema de la linealización del modelo de las baterías.	44
5.4	Curvas de Descarga a Distintas Intensidades.	45
5.5	Curvas de Descarga a Distintas Temperaturas.	46
5.6	Bloques de normalización y desnormalización en <i>Matlab Simulink</i>	48
5.7	Pantalla de restricciones del toolbox MPC.	49
5.8	Bloques para la Opción Paro/Marcha.	51
6.1	Ciclo NEDC.	54
6.2	Referencia.	55
6.3	Gestión de potencia del sistema sin dispositivo de almacenamiento.	55
6.4	Potencia para NEDC con baterías.	56
6.5	Energía intercambiada por las baterías y por el motor.	57
6.6	SOC baterías para un ciclo NEDC.	57
6.7	SOC baterías para 20 ciclos NEDC.	58
6.8	SOC baterías para 20"o ciclo NEDC.	59
6.9	Curva de eficiencia de la pila de combustible.	59
6.10	Baterías y pila con potencia nominal de 5 kW.	60
6.11	Baterías y pila con potencia nominal de 5 kW.	60
6.12	Baterías y pila con potencia nominal de 8 kW, con paradas.	62

6.13	Baterías y pila con potencia nominal de 8 kW, con paradas.	62
6.14	Súper condensadores y pila con potencia nominal de 5 kW.	63
6.15	Súper condensadores y pila con potencia nominal de 5 kW.	64
6.16	SC y pila con potencia nominal de 8 kW, con paradas.	65
6.17	SC y pila con potencia nominal de 8 kW, con paradas.	65
6.18	Súper condensadores, batería y pila con potencia nominal de 8 kW.	67
6.19	Súper condensadores, batería y pila con potencia nominal de 8 kW.	67
6.20	Perfil de Velocidad del Ciclo 10-15 Mode.	68
6.21	Potencia Demandada Para el Ciclo 10-15 Mode.	69
6.22	Potencia: 10-15 Mode con baterías.	70
6.23	SOC: 10-15 Mode con baterías.	70
6.24	Potencia: 10-15 Mode con baterías; con paradas.	71
6.25	SOC: 10-15 Mode con baterías; con paradas.	71
6.26	Potencia: 10-15 Mode con SC.	72
6.27	SOC: 10-15 Mode con SC.	72
6.28	Potencia: 10-15 Mode con SC; con paradas.	73
6.29	SOC: 10-15 Mode con SC; con paradas.	73
6.30	Perfil de Velocidad del Ciclo HWFET.	74
6.31	Potencia Demandada Para el Ciclo HWFET.	75
6.32	Potencia: HWFET con baterías.	76
6.33	SOC: HWFET con baterías.	76
6.34	Potencia: HWFET con baterías; con paradas.	77
6.35	SOC: HWFET con baterías; con paradas.	77
6.36	Potencia: HWFET con SC.	78
6.37	SOC: HWFET con SC.	78
6.38	Potencia: HWFET con SC; con paradas.	79
6.39	SOC: HWFET con SC; con paradas.	79
6.40	Perfil de Velocidad del Ciclo UDDS.	80
6.41	Potencia Demandada Para el Ciclo UDDS.	81
6.42	Potencia: UDDS con baterías.	82

6.43 SOC: UDDS con baterías.	82
6.44 Potencia: UDDS con baterías; con paradas.	83
6.45 SOC: UDDS con baterías; con paradas.	83
6.46 Potencia: UDDS con SC.	84
6.47 SOC: UDDS con SC.	84
6.48 Potencia: UDDS con SC; con paradas.	85
6.49 SOC: UDDS con SC; con paradas.	85
6.50 Perfil de Velocidad del Ciclo NYCC.	86
6.51 Potencia Demandada Para el Ciclo NYCC.	87
6.52 Potencia: NYCC con baterías.	88
6.53 SOC: NYCC con baterías.	88
6.54 Potencia: NYCC con baterías; con paradas.	89
6.55 SOC: NYCC con baterías; con paradas.	89
6.56 Potencia: NYCC con SC.	90
6.57 SOC: NYCC con SC.	90
6.58 Potencia: NYCC con SC; con paradas.	91
6.59 SOC: NYCC con SC; con paradas.	91
6.60 Potencia: NEDC con baterías (Look Ahead).	92
6.61 SOC: NEDC con baterías (Look Ahead).	93
6.62 Potencia: NEDC con baterías; con paradas (Look Ahead).	93
6.63 SOC: NEDC con baterías; con paradas (Look Ahead).	94
6.64 Potencia: NEDC con SC (Look Ahead).	95
6.65 SOC: NEDC con SC (Look Ahead).	95
6.66 Potencia: NEDC con SC; con paradas (Look Ahead).	96
6.67 SOC: NEDC con SC; con paradas (Look Ahead).	96
6.68 Potencia: NYCC con baterías (Look Ahead).	97
6.69 SOC: NYCC con baterías (Look Ahead).	98
6.70 Potencia: NYCC con baterías; con paradas (Look Ahead).	98
6.71 SOC: NYCC con baterías; con paradas (Look Ahead).	99
6.72 Potencia: NYCC con SC (Look Ahead).	100

6.73 SOC: NYCC con SC (Look Ahead).	100
6.74 Potencia: NYCC con SC; con paradas (Look Ahead).	101
6.75 SOC: NYCC con SC; con paradas (Look Ahead).	101
7.1 Variación del error y el consumo según la pot. nominal de la pila. .	103
7.2 Ídem, con paradas.	104

Índice de Tablas

3.1	Características del motor eléctrico.	12
3.2	Características de la pila de combustible.	13
3.3	Características de las baterías.	13
3.4	Comportamiento eléctrico de las baterías.	14
3.5	Características del conjunto de baterías.	18
3.6	Características del SC Panasonic 1200.	19
3.7	Peso y volumen del conjunto de baterías.	20
3.8	Características del SC <i>Maxwell BCAP 2000</i>	20
3.9	Posibles configuraciones del kit de SC BCAP 2000.	21
3.10	Características del conjunto de SC <i>Maxwell BCAP 2000</i>	22
3.11	Características del SC <i>Maxwell BCAP 3000</i>	22
3.12	Características del conjunto de SC <i>Maxwell BCAP 3000</i>	22
4.1	Potencia neta de la pila y potencia de los elementos auxiliares.	26
4.2	Parámetros para el modelo del coche.	36
5.1	Restricciones de las variables del controlador.	48
5.2	Parámetro ECR para las restricciones.	50
5.3	Parámetros del controlador.	52
6.1	Características NEDC.	54
6.2	Resultados para el sistema sin dispositivo de almacenamiento	56
6.3	Resultados para NEDC con baterías.	56
6.4	Energía almacenada por la batería y energía del motor.	58

6.5	Simulaciones para distintas pot. nominales de la pila.	61
6.6	Ídem, con paradas.	61
6.7	Simulaciones para distintas pot. nominales de la pila.	63
6.8	Ídem, con paradas.	64
6.9	Simulaciones para distintas configuraciones baterías/SC.	66
6.10	Características 10-15 Mode.	68
6.11	Simulaciones 10-15 Mode con Baterías.	69
6.12	Simulaciones 10-15 Mode con SC.	69
6.13	Características HWFET.	74
6.14	Simulaciones HWFET con Baterías.	75
6.15	Simulaciones HWFET con SC.	75
6.16	Características UDDS.	80
6.17	Simulaciones UDDS con Baterías.	81
6.18	Simulaciones UDDS con SC.	81
6.19	Características NYCC.	86
6.20	Simulaciones NYCC con Baterías.	87
6.21	Simulaciones NYCC con SC.	87
6.22	Simulaciones NEDC con Baterías (Look Ahead).	94
6.23	Simulaciones NEDC con SC (Look Ahead).	94
6.24	Simulaciones NYCC con Baterías (Look Ahead).	97
6.25	Simulaciones NYCC con SC (Look Ahead).	99
7.1	Comparativa para distintos sistemas de almacenamiento.	102
7.2	Simulaciones resto de ciclos.	105
7.3	Comparación para simulaciones con y sin Look Ahead.	106
7.4	Mejora con Look Ahead.	107

Lista de Acrónimos

ADVISOR	ADvanced VehIcle SimulatOR
ECMS	Equivalent Consumption Minimization Strategy
ECR	Equal Concern for the Relaxation
EEUU	Estados Unidos
ETSI	Escuela Técnica Superior de Ingenieros
EUDC	Extra Urban Driving Cycle
EUDC	Extra Urban Driving Cycle
HWFET	HighWay Fuel Economy schedule
LQR	Linear-Quadratic Regulator
LTI	Linear Time Invariant
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MPC	Model Predictive Control
MV	Manipulated Variables
NEDC	New European Driving Cycle
NEDC	New European Driving Cycle
NYCC	New York City Cycle
SC	Súper Condensador
SOC	State Of Charge
TM	Trabajo de Máster
UDDS	Urban Dynamometer Driving Schedule
US	Universidad de Sevilla

Capítulo 1

Introducción

1.1 Objetivos

El objetivo del presente trabajo es el diseño de una estrategia de control para gestionar, de la mejor manera posible, los flujos de energía entre los distintos elementos de un vehículo eléctrico con pila de hidrógeno.

Para ello se partirá de un sistema previamente diseñado: el vehículo del subproyecto "El León", perteneciente al proyecto "Hércules". Se trata, como se explica en el apartado 1.2 de un *Santana 350*. En este momento el vehículo está en fase de montaje, por lo que no resulta posible hacer pruebas reales sobre el mismo, teniendo por tanto que recurrir a la simulación para obtener resultados.

1.2 Punto de partida.

Un primer gestor de potencia fue diseñado para el presente vehículo por Antonio Pérez de los Monteros en [1]. Allí se proponen varios tipos de controladores. Se toma como

1.3 Antecedentes: el Proyecto Hércules.

1.3.1 Introducción.

El proyecto de investigación *Hércules* es una iniciativa de varias entidades con el que se pretende avanzar en el campo de el uso del hidrógeno como fuente de energía. Así, el proyecto comprende tres subproyectos, denominados *Las Columnas*, *El Olimpo* y *El León*.

1.3.2 Las Columnas y El Olimpo.

Con el subproyecto *Las Columnas* se pretende crear una planta de producción de hidrógeno a partir de energía eléctrica de origen solar, en concreto mediante paneles fotovoltaicos y sistemas Stirling. Para el almacenamiento y distribución del hidrógeno producido se ha desarrollado una estación de servicio (hidrogenera) en el que su diseño incorpora características de seguridad y manejo para el operador, de modo que el sistema de repostado sea semejante al planteado en una gasolinera convencional. Por su parte, el subproyecto *El Olimpo* engloba labores de coordinación y seguimiento del Proyecto Hércules en su conjunto, de manera

que se garantice la adecuada gestión y desarrollo de sus actividades. De esta forma, se asegura un correcto dimensionado del sistema completo estableciendo, además, las especificaciones que deberá satisfacer el Proyecto Hércules en su evaluación y pruebas finales. Así mismo el Olimpo contempla actuaciones orientadas a la divulgación y difusión de los resultados que pretende superar los ámbitos académicos llegando a las empresas, administración y al conjunto de la sociedad.



Figure 1.1: Hidrogenera de *Las Columnas*.

1.3.3 El León.

Este subproyecto se encarga de la adaptación de un vehículo comercial, en concreto el Todo Terreno Santana Motor 350, de forma que se sustituya su sistema de propulsión convencional por un nuevo sistema de potencia compuesto principalmente por una pila de combustible y un motor eléctrico. La adaptación, además, se realiza de manera que su conducción no difiera del modelo comercial. La propulsión de este vehículo se conseguirá a partir del hidrógeno generado en la estación de servicio (hidrogenera) diseñada a tal efecto dentro del Proyecto Hércules.



Figure 1.2: Vehículo de *El León*.

Este Trabajo de Máster (TM) utiliza un modelo de este vehículo, así como de los componentes de su sistema de potencia, como la base sobre la que desarrollar el sistema de gestión de potencia que se pretende estudiar. Sobre los componentes del sistema de potencia se hablará en el apartado 3.4 (pg 12). Las características físicas del vehículo original se presentan en el siguiente apartado.

1.3.4 Vehículo Original.

▷ Bastidor:

- Tipo: Monocasco en chapa de acero, unido a chasis de largueros y travesaños de acero.

▷ Suspensión:

- Delantera: De ruedas independientes con brazos oscilantes, tipo McPherson, muelles helicoidales y amortiguadores.
- Trasera: Eje rígido con brazos longitudinales oscilantes, triángulo central, muelles helicoidales y amortiguadores.
- Amortiguadores:
 - Delanteros: Telescópicos de doble acción.
 - Traseros: Telescópicos de doble acción.
- Barra estabilizadora:
 - Delantera: Sí.
 - Trasera: No.

▷ Transmisión:

- Tipo mecánica, a las ruedas traseras, opcionalmente a las cuatro ruedas.

▷ Motor:

- Marca o fabricante: PEUGEOT-CITRÖEN.
- Tipo (siglas): 9HX.
- Potencia efectiva/fiscal: 66,2kW/11,47CV F.
- Combustible: Gasoleo A.
- Número de cilindros: 4.
- Cilindrada y diámetro: 1560cm³ y 75mm.

▷ Embrague:

- Tipo: M/T.- De diafragma, monodisco en seco.

▷ Caja de cambios:

- Tipo: Manual de 5 velocidades hace delante y 1 atrás.
- Mando: Manual.
- Numero de relaciones: 12 (6 carretera+6 campo).

▷ Dispositivos de alumbrado y señalización:

- No proyectores corto alcance: 2.
 - No proyectores largo alcance: 2.
 - No proyectores marcha atrás: 1.
 - No proyectores antiniebla: 2 opcional.
 - No proyectores antiniebla atrás: 1.
 - No proyectores de pare (S1): 2.
 - No proyectores de pare (S3): 1.
- ▷ Dirección:
- Diámetro volante: 375 mm (sin Air Bag), 385 mm (con Air Bag).
 - Asistencia: Sí.
- ▷ Neumático:
- Número: 4 más 1 de repuesto.
 - Dimensiones: 195R15 94Q ó 94R ó 94S.
 - Neumáticos de uso temporal: N.A.
- ▷ Dispositivos de frenado:
- Servicio: Doble circuito hidráulico en paralelo servo asistido, delante de disco y trasero de tambor.
 - Estacionamiento: Mecánico a las ruedas traseras.
 - Socorro: uno de los circuitos de frenado de servicio.
 - Asistencia: Servofreno de vacío y depresor.
 - Dispositivo antibloqueo: Opcional.
- ▷ Instalación eléctrica:
- Tensión: 12 voltios.
 - Batería: 1.
 - Alternador/dinamo: Alternador.
- ▷ Sistema de combustible:
- Capacidad del depósito: 55 l.
- ▷ Equipamiento:
- Espejos retrovisores: 3.
 - Exteriores: 2.
 - Interiores: 1.
 - Asientos: 2 delanteros y 2 traseros.
 - Número de plazas: 5.
- ▷ Puertas:
- 4 puertas y portón trasero.
- ▷ Ruido vehículo parado:
- 81dB (A) a 3000 rpm.