

# Capítulo 7

## Conclusiones

### 7.1 Introducción.

A la hora de estudiar los resultados de las simulaciones, lo primero que se ha hecho es analizar los resultados para el ciclo NEDC, ya que, como se comentó en el apartado 6.1, es el que se utiliza como referente en Europa, y por lo tanto el vehículo ha de estar configurado para optimizar el seguimiento de este ciclo. A partir de las conclusiones del análisis del ciclo europeo, se estudiarán el resto de ciclos, concluyendo los puntos fuertes y débiles de la gestión de potencia.

### 7.2 New European Driving Cycle.

#### 7.2.1 Comparación de los resultados con la pila siempre en marcha.

Los resultados de las simulaciones se resumen en la tabla 7.1

Dispositivo (W)	Error(%)	Consumo $H_2$ (kg)
Ninguno	0'99%	0'25456
Baterías	0'75-1'07%	0'20035-0'23291
SC	0'71-1'56%	0'19857-0'23579
Ambos	0'84-1'00%	0'19160-0'19962

Table 7.1: Comparativa de simulaciones con distintos sistemas de almacenamiento.

El error máximo no es demasiado elevado (1'56%), por lo que en todos los casos se tiene una buena respuesta. El error es el parámetro más importante, ya que el conductor del vehículo necesita que su demanda de potencia sea satisfecha; el consumo es secundario, aunque no por ello poco importante.

Cuando hay un único dispositivo de almacenamiento, la respuesta mejora cuanto mayor sea la potencia nominal de la pila. Sin embargo, como se puede ver en la figura 7.1, el consumo de hidrógeno incrementa con la potencia nominal.

Como se dijo antes, todos los resultados pueden considerarse válidos. El consumo de combustible es siempre menor que en el peor de los casos, es decir, sin sistema de almacenamiento. Sin embargo este parámetro varía mucho más que

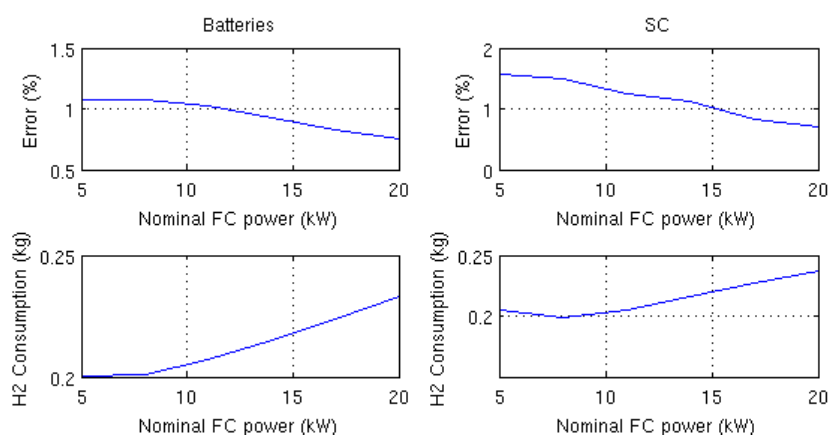


Figure 7.1: Variación del error y el consumo para baterías y SC, según la potencia nominal de la pila.

el error, por lo que, pese a ser menos importante, es el valor que hay que optimizar. De entre todas las simulaciones, las que han dado mejor consumo han sido aquéllas en las que la potencia nominal de la pila era de 8 kW.

El primer intento para mejorar estos resultados fue la combinación de baterías y súper condensadores. El sistema respondió bien, y los valores mejoran. Pero la mejora no es representativa, y en la realidad el uso de baterías y súper condensadores al mismo tiempo resulta mucho más complejo que el uso de uno solo. Técnicamente no supondría sólo tener dos dispositivos de almacenamiento: también se tendría un convertidor más, lo que implica más trabajo y una mayor probabilidad de fallos. Por otra parte, físicamente dos convertidores ocupan un espacio mayor y pesan más que uno solo de mayor potencia. Consecuentemente la opción del uso de baterías y súper condensadores a la vez sólo merecería la pena si se consiguiera un comportamiento general mucho mejor. De esta manera se iría recortando el tamaño de baterías y súper condensadores, y con ellos el de sus convertidores, hasta que se pudiera comparar de verdad con los casos de los dispositivos por separado. Pero, como se ha visto, esto no sucede, por lo que el uso de los dos dispositivos al mismo tiempo resulta una mala alternativa, que se desestima y no se vuelve a probar en otros ciclos.

En cuanto a la elección de baterías o súper condensadores por separado, según las simulaciones ambos sistemas son prácticamente equivalentes para el ciclo NEDC.

### 7.2.2 Comparación de los resultados con la pila en modo marcha/paro.

El segundo intento para mejorar los resultados fue permitir que la pila se desconectara en determinados casos, y de esta manera mejorar los consumos. Y en efecto los consumos mejoran, pero a cambio de un gran incremento del error:

Para los súper condensadores el error incrementa demasiado (hasta el 5%), lo cual es inaceptable. Sin embargo, si el sistema de almacenamiento se compone sólo de baterías, el error pasa a ser significativo (hasta un 2'5%), pero se podría seguir considerando aceptable. El ahorro de combustible es de más del 30% comparado

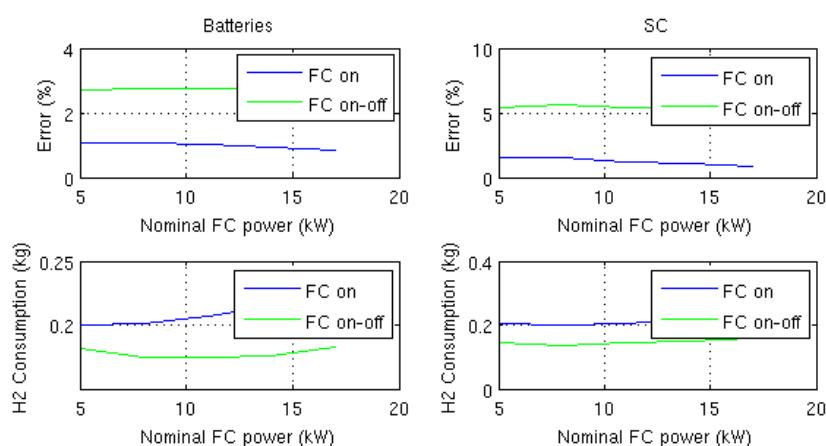


Figure 7.2: Variación del error y el consumo para baterías y SC, según la potencia nominal de la pila, con paradas.

con el caso en el que la pila nunca se para, por lo que merece la pena plantearse el caso.

### 7.3 Otros Ciclos.

Un resumen de los resultados de las simulaciones para todos los ciclos se puede ver en la tabla 7.2.

Los dos primeros ciclos (el europeo NEDC y el japonés 10-15 Mode) tienen un relativo parecido, y los resultados en ambos son cualitativamente similares. De esta manera se confirma que los buenos resultados obtenidos para el ciclo europeo no son exclusivos para el mismo, y que una buena configuración del controlador puede hacer que el vehículo siga bien otros ciclos estándares. Sin embargo ambos ciclos resultan muy lineales, y ello implica que sean poco realistas (figs. 6.1 y 6.20). Sin embargo, los ciclos americanos, mucho más curvos, sí reflejan lo que podría ser un ciclo real de conducción (figs. 6.30, 6.40 y 6.50). Esto justifica la diferencia de comportamiento respecto a los dos primeros ciclos. Para el ciclo de autopista (HWFET), los resultados son muy diferentes: el sistema con baterías consume menos, pero tiene peor respuesta, si bien la diferencia respecto al sistema con SC es muy pequeña. Este resultado tiene mucha lógica, ya que el vehículo lleva una velocidad alta y relativamente constante. Esto provoca una demanda de potencia sin grandes picos ni fluctuaciones, pero relativamente alta, ya que será necesaria para el mantenimiento de la velocidad. Lo primero hace innecesario el uso de un sistema de almacenamiento para ayudar a la pila en los picos. Lo segundo conlleva el uso continuo de la pila de combustible, pues los sistemas de almacenamiento, por sí solos, no pueden entregar tanta potencia. Ésta es también la razón de la escasa diferencia entre los valores tanto de error como de consumo entre el caso de pila siempre activa y el de marcha/parado: al requerirse tanta potencia, la pila casi siempre habrá de estar activa. El seguimiento no es demasiado bueno (2'30%-3'01%), si bien se mueve entre valores aceptables. En el primer ciclo de ciudad (UDDS) las diferencias entre el sistema con baterías y con SC son mucho mayores. Si la pila se mantiene activa, los SC tienen un

Ciclo	Disp. Alm.	Estado pila	Error(%)	Consumo $H_2$ (kg)
NEDC	Baterías	Siempre Activa	1.03%	0.20109
		Con Paradas	2.73%	0.17416
	SC	Siempre Activa	1.49%	0.19857
		Con Paradas	5.57%	0.13545
10-15 Mode	Baterías	Siempre Activa	1.51%	0.10121
		Con Paradas	3.36%	0.07321
	SC	Siempre Activa	0.75%	0.08825
		Con Paradas	4.65%	0.04537
HWFET	Baterías	Siempre Activa	2.71 %	0.16759
		Con Paradas	2.84%	0.16441
	SC	Siempre Activa	2.30%	0.19661
		Con Paradas	3.01%	0.19321
UDDS	Baterías	Siempre Activa	4.00%	0.22961
		Con Paradas	5.30%	0.19176
	SC	Siempre Activa	2.28%	0.19141
		Con Paradas	7.23%	0.11775
NYCC	Baterías	Siempre Activa	7.79%	0.08825
		Con Paradas	10.66%	0.05685
	SC	Siempre Activa	3.56%	0.07995
		Con Paradas	9.94%	0.02984

Table 7.2: Simulaciones resto de ciclos.

comportamiento mucho mejor (en torno al un 40% menos de error), y un consumo sensiblemente inferior, con un ahorro de más de un 15%. en caso de que la pila tuviera la posibilidad de pararse, el ahorro rondaría el 40%. Sin embargo, el error sería mayor que en el caso de que sólo hubiera baterías. eso sí, ambos superarían el 5%, lo cual supone un desvío excesivo de la demanda del conductor. Para el segundo ciclo de ciudad, al ser más agresivo, las diferencias son mayores. Así, si la pila se mantiene funcionando de manera continua, el consumo del sistema con SC es del orden de un 10% menor. Pero la gran diferencia se encuentra en el comportamiento. El error en el seguimiento que se produce con las baterías (7'79%) duplica que se produce con los SC (3'56%). Este último no resulta un buen seguimiento, si bien el de las baterías es a todas luces inaceptable. Los resultados en ciudad resultan igualmente lógicos. Por una parte es normal que con los SC se produzca un mejor seguimiento, ya que, al tener la posibilidad de aportar una mayor potencia, aunque la pueda mantener poco tiempo, el sistema puede seguir mejor los picos de potencia que se producen continuamente en un ciclo urbano. Por otra, al tener menos restringida la potencia de recarga, también puede aprovechar mejor el frenado regenerativo, y esto le lleva a consumir menos. En cuanto a los resultados de las simulaciones con la posibilidad de paro de la pila, las diferencias se disparan, sobre todo en el NYCC, donde, para el caso de los condensadores el ahorro de combustible supera el 60%, debido sobre todo al tiempo que el vehículo permanece parado (semáforos, etc.). Sin embargo, el error aumenta exageradamente, llegando a superar el 10%, que es más que excesivo. Sin embargo, y debido al gran ahorro de combustible que se consigue, quizás

fuera bueno dejar abierta la opción. Esto podría hacerse otorgándole al usuario la posibilidad de elegir entre ambos modos. De esta manera el conductor podría elegir entre mejores prestaciones o menor consumo, según sus necesidades en cada momento. Esta opción sería fácilmente implementable mediante un botón en el habitáculo, como ya tienen la mayor parte de los coches con sistemas de ahorro de combustible.

## 7.4 Look Ahead.

Como se ha repetido varias veces en el TM, esta opción, tal cual está implementada en la simulación, resulta inviable, puesto que no resulta posible conocer las demandas futuras del conductor a ciencia cierta. Sin embargo, sí sería posible predecirlas para cada muestreo, teniendo en cuenta las últimas referencias, haciendo, por ejemplo, una extrapolación. Es evidente que los resultados diferirían del valor real de la consigna, pero probablemente la diferencia fuera menor, y se consiguiera una mejora en el control. Para calibrar si merece la pena la implementación del presente algoritmo se procede con la simulación en el mejor de los casos: que la predicción fuera perfecta y se supieran con total precisión las referencias futuras. Las simulaciones se han hecho para dos ciclos: el NEDC por ser el más importante, y el NYCC, por ser el más desfavorable, según lo visto en la tabla 7.2. Los resultados se muestran, junto a los casos sin *Look Ahead*, en la tabla 7.3.

Ciclo	Disp. Alm.	Estado pila	Error(%)	Consumo $H_2$ (kg)
NEDC	Baterías	Activa	1.03%	0.20109
		Activa (LA)	0.83%	0.20235
		Con Paradas	2.73%	0.17416
		Con Paradas (LA)	2.13%	0.16553
	SC	Activa	1.49%	0.19857
		Activa(LA)	0.83%	0.19764
		Con Paradas	5.57%	0.13545
		Con Paradas (LA)	4.26%	0.13554
NYCC	Baterías	Activa	7.79%	0.08825
		Activa(LA)	4.75%	0.08858
		Con Paradas	10.66%	0.05685
		Con Paradas (LA)	8.55%	0.05667
	SC	Activa	3.56%	0.07995
		Activa (LA)	2.34%	0.07984
		Con Paradas	9.94%	0.02984
		Con Paradas (LA)	9.61%	0.02956

Table 7.3: Comparación para simulaciones con y sin Look Ahead.

Se comprueba que existe una ligera mejoría en los consumos, apenas apreciable. Sin embargo llama la atención la mejora sustancial del comportamiento. Así, el decremento del error, para los casos en los que la pila no se detiene, se muestran en la tabla 7.4.

El margen de mejora es, por tanto, muy amplio, por lo que sí merece la pena

Ciclo	Disp. Alm.	Error Ref. cte.	Error Look A.	Decr. Error
NEDC	Baterías	1'03%	0'83%	19%
	Súper Condensador	1'49%	0'83%	44%
NYCC	Baterías	7'79%	4'75%	39%
	Súper Condensador	3'56%	2'34%	34%

Table 7.4: Mejora con Look Ahead.

intentar predecir la demanda del conductor, y acercarse de esta manera a los resultados óptimos (tabla 7.4).

## 7.5 Controlador MPC

**En lo positivo...** El controlador ha sido capaz de acercar el sistema a la referencia de un modo eficiente. De hecho, los mayores errores a la hora de seguir el sistema se dan más por las limitaciones del vehículo y sus componentes que por una mala gestión de la potencia. Además el controlador resulta fácil de diseñar, ya que, como se expuso en el apartado 5.2, al ser el objetivo del control minimizar el consumo, que no es una variable de control, ésta se puede introducir mediante la función objetivo del sistema, a la vez que, mediante el peso de la potencia del motor, se evita un error excesivo respecto a la consigna de potencia. Por otra parte, y aunque este dato no se haya añadido en el apartado de simulaciones, la duración en tiempo real de éstas ha sido, en todos los ciclos, de entre el 10% y el 15% del tiempo total de simulación. La máquina donde se han realizado estas pruebas (doble núcleo Genuine Intel T2300 @ 1'66GHz) es bastante más potente que el dispositivo empotrado que iría dentro del coche (Pentium III 933, 800MHz). Además el PC empotrado habrá de hacer ciertas tareas que el PC de simulación no (adquisición de datos, comunicaciones, etc). Sin embargo, el coste computacional es menor, ya que el para las pruebas el sistema real es simulado. Pero la principal diferencia es que el entorno de programación de Matlab es mucho más lento que el programa compilado que llevaría la máquina empotrada, y mucho más cuando se ha hecho uso de la herramienta Simulink. Consecuentemente se entiende que la implementación del presente algoritmo en el vehículo es posible, y en caso de no serlo siempre se podría adquirir una máquina más potente para el PC empotrado, de manera que pudiera llevar el control. Respecto al Toolbox de Matlab, es una herramienta que resulta de gran utilidad, ya que permite implementar y configurar el controlador de manera sencilla, bien desde el espacio de estados, bien desde la utilidad gráfica de diseño que el incluye el toolbox.

**En lo negativo...** El principal inconveniente del uso de un controlador predictivo es la complejidad que conlleva su configuración. Así, si un controlador lineal del tipo PID tiene tres parámetros que configurar, el controlador predictivo implementado en este TM tiene 3 parámetros por cada variable manipulada (valor nominal de la variable, peso y peso de su derivada) y 2 parámetros por cada variable de salida (referencia y peso de la variable), lo cual, teniendo en cuenta que hay 2 variables de salida y 4 manipuladas (5.3.2), hace un total de 16 parámetros, a los que hay que sumar los horizontes de predicción y de control,

que hacen un total de 18 parámetros a sintonizar. Además, existe la opción de permitir la parada de la pila, y en caso de permitirlo, se pueden cambiar las reglas de parada y marcha de la misma. En consecuencia, resulta tremendamente complicado estar seguro de que la sintonización sea la óptima. En cuanto al uso del Toolbox de Matlab, la principal pega son sus limitaciones. Debido a las mismas no ha sido posible incluir modelos no lineales en los controladores, ni la previsión de la referencia de potencia que se comentó anteriormente.

## 7.6 Futuras Mejoras.

- ▷ Uso de un modelo no lineal como modelo interno del MPC.
- ▷ Creación de un algoritmo que mejore la previsión de referencias futuras.
- ▷ Mejora de la sintonización del controlador.
- ▷ Crear un controlador adaptativo, con distintas configuraciones, de manera que, según la velocidad y la potencia del vehículo se detecte un tipo de conducción determinado (ciudad, carretera, autopista) se elija una u otra.
- ▷ Hacer pruebas sobre el vehículo real.





# Referencias

- [1] Antonio Pérez Espinosa de los Monteros. "*Control de Potencia en Vehículos Híbridos con Pila de Combustible*". Proyecto Fin de Carrera. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Sevilla. Citado en las páginas 1, 6, 7, 23, 27, 30, 35, 37 y 39.
- [2] Diego Feroldi. "*Control and design of PEM fuel cell-based systems. Chapter 7*". Tesis Doctoral. Institut d'Organizació i Control de Sistemes Industrials. Universitat Politècnica de Catalunya. Enero 2009. Citado en las páginas 5 y 14.
- [3] Zenhua Jiang, Lijun Gao, Roger A. Dougal. "*Adaptive Control Strategy for Active Power Sharing in Hybrid Fuel Cell-Battery Power Sources*". June 2007. Citado en la página 14.
- [4] Zenhua Jiang, Roger A. Dougal. "*A Compact Digitally Controlled Fuel Cell/Battery Power Source*". 2006. Citado en las páginas 5 y 14.
- [5] He Hong-wen, Zhang Ying-qi and Wan Fan "*Control Strategies Design for a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle*". Beijing Institute of Technology, 2008. Citado en las páginas 5 y 14.
- [6] J. Jia, D. Lian, Y. Wang. "*Matlab / Simulink Based-study on PEM Fuel Cell and Battery Hybrid System*". December 2008. Citado en las páginas 5 y 14.
- [7] Ke Jin, Ximbo Ruan, Mengxion Yang and Min Xu "*A Hybrid Fuel Cell Power System*". April 2009. Citado en las páginas 5 y 14.
- [8] Phatiphat Thounthong, Stéphane Raël, Bernard Davat "*Control Strategy of Fuel Cell/Supercapacitors Hybrid Power Sources for Electric Vehicle*". September 2005. Citado en la página 5.
- [9] M. Cavalletti, J. Piovesan C. T. Abdallah, S. Longhi, P. Dorato and G. Ippoliti "*Statistical Learning Controller for the Energy Management in a Fuel Cell Electric Vehicle*" Cancun, Mexico, December 2008. Citado en las páginas 6 y 14.
- [10] Guidong Liu, Wensheng Yu and Zhishou Tu "*Power Management for Alleviation of the Impact on PEM Fuel Cell due to Load fluctuation*". IEEE 2006. Citado en la página 6.
- [11] Lino Guzzella, Antonio Sciarretta. "*Vehicle propulsion systems: Introduction to Modeling and Optimization*". Springer 2007. Citado en la página 6.

- [12] P. Rodatz, G. Paganelli, A. Sciarretta, L. Guzzella. "Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle". Science Direct; Control Engineering Practice 13 (2005) 41–53. Citado en las páginas 6, 21 y 22.
- [13] Antonio Sciarretta, Michael Back, and Lino Guzzella. "Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles". IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 12, NO. 3, MAY 2004. Citado en las páginas 6 y 14.
- [14] G Paganelli, T M Guerra, S Delprat, J-J Santin, M Delhom, E Combes . "Simulation and Assessment of Power Control Strategies for a Parallel Hybrid Car". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Volume 214, Number 7 (October 9, 2000), pp. 705-717 Citado en la página 6.
- [15] Ardalan Vahidi, Anna Stephanopoulou and Huei Peng "Current Management in a Hybrid Fuel Cell Power System: A Model-Predictive Control Approach". IEEE, November 2006. Citado en las páginas 6, 14, 21 y 22.
- [16] Alicia Arce, Alejandro J. Del Real and Carlos Bordóns. "Predictive Control for Battery Improvement in Hybrid PEM Fuel Cell Vehicles" September, 2008. Citado en las páginas 7 y 14.
- [17] R. Kötzt, M. Carlen. "Principles and Applications of Electrochemical Capacitors" Electrochemica Acta 45 (2000). Citado en la página 14.
- [18] P. Rodatz, O. Garcia, L. Guzzella, F. Bucci, M. Bärstchi, A. Tsukada, P. Dietrich, R. Kötzt, G. Scherer, A. Wokaun. "Performance and Operational Characteristics of a Vehicle Powered by Fuel Cells and Supercapacitors" Society of Automotive Engineers, Inc. 2003. Citado en la página 14.
- [19] Vanessa Paladini, Teresa Donato, Arturo de Risi, Domenico Laforgia. "Super-Capacitors Fuel-Cell Hybrid Vehicle Optimization and Control Strategy Development" Energy Conversion and Management 48 (2007). Citado en la página 14.
- [20] Xu Liang-fei, Hua Jiang-feng, Li Xiang-jun, Meng Qing-ran, Li Jian-qi, Ouyang Ming-gao "Control Strategy Optimization of a Hybrid Fuel Cell Vehicle With Braking Energy Regeneration" IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, September 2008. Citado en la página 14.
- [21] J. Ramón Domínguez Frejo "Control of the Energy in a Racing Cart" Final Project Report, Imperial College London, 2009. Citado en la página 14.
- [22] Andrew F. Burke "Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles" Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No. 4, April 2007. Citado en la página 15.
- [23] Wenzhong Gao "Performance Comparison of a Fuel Cell-Battery Hybrid Powertrain and a Fuel Cell-Ultracapacitor Hybrid Powertrain." IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 54, No. 3, May 2005. Citado en la página 15.

- 
- [24] A. Burke M. Miller *Characteristics of Advanced Carbon-based Ultracapacitors* University of California-Davis Institute of Transportation Studies, 2001. Citado en la página 19.
- [25] *MC power series 650 F - 3000 F Ultracapacitors datasheet* Maxwell Technologies. Citado en la página 20.
- [26] Jay T. Pukrushpan, Anna G. Stephanopoulou and Huei Peng *Control of fuel Cell Power Systems. Principles, Modeling, Analisis and Feedback Design* Springer, 2004. Citado en las páginas 25 y 26.
- [27] Lijun Gao, Shengyi Liu, Robert A. Dougal *Dynamic Lithium-ion Battery Model for System Simulation* IEEE Transactions on components and packaging technologies, vol. 25 ,No. 3 September 2002 Citado en la página 30.
- [28] E.F. Camacho and C. Bordons *Model Predictive Control* Springer, 2004 Citado en la página 39.