



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Dimensionado y evaluación de un vehículo
automóvil basado en una pila de combustible
con almacenamiento a bordo de hidrógeno

Autor: D. David Casado Cerezal

Tutor: D. Francisco Vicente Tinaut Fluixá

Valladolid, Junio 2016

RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

Resumen

Los actuales problemas medioambientales hacen necesario un cambio en el panorama energético mundial que reduzca el empleo de combustibles fósiles y apueste por energías alternativas más limpias.

En este trabajo de fin de máster (TFM) se aborda la utilización del hidrógeno como combustible alternativo en el sector de la automoción. Inicialmente se recopilan las características y capacidades del hidrógeno como portador de energía para su empleo en un sistema de propulsión para un automóvil basado en una pila de combustible y almacenamiento a bordo de hidrógeno. Posteriormente se considera un vehículo existente como base para su adaptación y se someterá a un ciclo de conducción homologado para conocer sus requerimientos energéticos. A continuación se realiza el cálculo y dimensionamiento de los elementos necesarios para el nuevo sistema. Por último se evalúan y comparan los resultados en términos de prestaciones, costes y reducción de emisiones.

Palabras clave

Pila de combustible, Hidrógeno, Automóvil, Ciclo de conducción, Reducción de emisiones

ABSTRACT AND KEYWORDS

Abstract

Current environmental problems necessitate a change in the global energy landscape that reduces the use of fossil fuels and bet on cleaner alternatives energy.

In this Master's Thesis it is addressed the use of hydrogen as an alternative fuel in the automotive sector. Initially it is gathered the features and capabilities of hydrogen as an energy vector for use in a propulsion system for a car based on fuel cell and hydrogen storage on board. Subsequently it is considered an existing vehicle as the basis for adaptation and will undergo a driving cycle approved to meet its energy requirements. Then it is performed the calculation and dimensioning of the necessary elements for the new system. Finally it is evaluated and compared the results in terms of performance, cost and emission reductions.

Keywords

Fuel cell, Hydrogen, Car, Driving Cycle, Reducing Emissions

CONTENIDO

1.	Introducción	3
1.1.	Antecedentes.....	3
1.2.	Objetivos.....	4
1.3.	Desarrollo del trabajo.....	4
2.	Marco de referencia del hidrógeno	7
2.1.	Panorama energético actual	7
2.2.	El hidrógeno.....	10
2.3.	Métodos de producción de H ₂	12
2.4.	Pila de combustible	14
3.	Sistema de propulsión basado en pila de combustible	19
3.1.	Elección y descripción del vehículo base.....	19
3.2.	Descripción del nuevo sistema a implementar	24
4.	Requerimientos energéticos del vehículo.....	29
4.1.	NEDC (New European Driving Cycle).....	30
4.2.	Cálculo de la potencia instantánea en el ciclo NEDC	31
4.3.	Cálculo de la energía consumida en el ciclo NEDC.....	34
4.4.	Sistema de gestión y conversión de energía	36
5.	Cálculo y dimensionamiento del nuevo sistema de propulsión	41
5.1.	Cálculo y dimensionamiento de elementos suministradores de potencia	42
5.1.1.	Cálculo y dimensionamiento del motor eléctrico	42
5.1.2.	Cálculo y dimensionamiento de la pila de combustible.....	44
5.1.3.	Cálculo y dimensionamiento de la batería eléctrica (Potencia).....	45
5.2.	Cálculo y dimensionamiento de elementos suministradores de energía.....	46
5.2.1.	Cálculo y dimensionamiento del depósito de hidrógeno.....	46
5.2.2.	Cálculo y dimensionamiento de la batería eléctrica (Energía).....	55

5.3. Comparación entre las masas del vehículo base y el propuesto	57
6. Conclusiones y análisis de resultados	61
6.1. Conclusiones generales	61
6.2. Líneas de desarrollo futuro para el hidrógeno.....	61
6.3. Análisis de resultados de la transformación del vehículo	62
6.3.1. Comparación de potencias	62
6.3.2. Comparación de autonomía	62
6.3.3. Comparación de masas.....	63
6.3.4. Comparación económica	63
6.3.5. Comparación medioambiental	64
6.4. Propuesta de desarrollos futuros	65
7. Referencias.....	69
ANEXOS.....	73
Anexo I: Ficha técnica motor diésel Energy dCi 90 ECO2.....	73
Anexo II: Ficha técnica: Transmisión manual de 5 vel. JRQ MT5 200Nm	77
Anexo III: Ficha técnica de Motor Eléctrico 5A de 65 kW	81
Anexo IV: Ficha técnica pila de combustible	87
Anexo V: Ficha técnica batería eléctrica	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Consumo mundial de energía primaria en 2014 [IEA, 2016]	7
Figura 2: Evolución de la generación eléctrica mundial por fuentes de energía [IEA, 2016].....	8
Figura 3: Consumo mundial de energía final en 2014 [IEA, 2016].....	8
Figura 4: Evolución de las emisiones mundiales de CO ₂ en Mt de CO ₂ [IEA, 2016].....	9
Figura 5: Hidrógeno	10
Figura 6: Integración del H ₂ en el sistema energético actual [Aguer, 2007].....	11
Figura 7: Producción actual H ₂ [Aguer, 2007]	12
Figura 8: Proceso típico de obtención de H ₂ a partir de gas natural	13
Figura 9: Esquema de una pila de combustible.....	14
Figura 10: Toyota Mirai	16
Figura 11: Renault Captur.....	19
Figura 12: Ficha técnica del motor de combustión diésel ENERGY dCi 90 ECO2.....	22
Figura 13: Ficha técnica de la caja de cambios JRQ MT5 200Nm	22
Figura 14: Vehículo con pila de hidrógeno.....	24
Figura 15: Esquema de un vehículo con pila de H ₂	24
Figura 16: Estación de recarga de vehículos de hidrógeno.....	25
Figura 17: Esquema del cálculo del nuevo sistema.....	29
Figura 18: Fuerza gravitatoria.....	32
Figura 19: Esquema del sistema de gestión y conversión de energía.....	36
Figura 20: Esquema de cálculo y dimensionamiento.....	41
Figura 21: Esquema de elementos suministradores de potencia	42
Figura 22: Ficha técnica del motor eléctrico Renault.....	43
Figura 23: Ficha técnica de la pila de combustible Hydrogenics HD 30.....	44
Figura 24: Esquema de los elementos suministradores de energía.....	46
Figura 25: Depósito de hidrógeno Toyota.....	48

Figura 26: Forma óptima del depósito de hidrógeno	49
Figura 27: Dimensiones Renault Captur	50
Figura 28: Esquema de fuerzas de presión en el interior del depósito.....	51
Figura 29: Autonomía vs Peso	53
Figura 30: Plano depósito de hidrógeno	54
Figura 31: Vista 3D depósito de hidrógeno.....	55
Figura 32: Comparativa de distintas tecnologías de baterías eléctricas.....	56
Figura 33: Ficha técnica de batería eléctrica.....	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tipos de pilas de combustible	15
Tabla 2: Esquema de los tipos de pilas de combustible.....	15
Tabla 3: Ficha técnica Renault Captur (Prestaciones y consumos homologados).....	19
Tabla 4: Ficha técnica Renault Captur (Dimensiones, peso y capacidades).....	20
Tabla 5: Ficha técnica Renault Captur (Motor de Combustión).....	20
Tabla 6: Ficha técnica Renault Captur (Transmisión).....	20
Tabla 7: Ficha técnica Renault Captur (Chasis)	21
Tabla 8: Características del ciclo NEDC.....	30
Tabla 9: Tabla resumen de características del depósito de hidrógeno.....	54

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Ciclo NEDC.....	30
Gráfica 2: Potencia instantánea demandada en el ciclo urbano	33
Gráfica 3: Potencia instantánea demandada en el ciclo NEDC	33
Gráfica 4: Espacio recorrido en el ciclo NEDC	34
Gráfica 5: Energía consumida en el ciclo urbano	35
Gráfica 6: Energía consumida en el ciclo NEDC.....	35
Gráfica 7: Fuente de potencia en el ciclo NEDC	37
Gráfica 8: Fuente de energía en el ciclo NEDC	38



Universidad de Valladolid

Escuela de Ingenierías Industriales

Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

1. Introducción

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El aumento de la demanda energética por parte del ser humano en su continua evolución nos ha conducido a una situación de crisis energética debido a la utilización de energía procedente de fuentes no renovables y perjudiciales para el medio ambiente como son fundamentalmente los combustibles fósiles.

Siguiendo al ritmo de consumo actual, la sobreexplotación del petróleo hace prever el agotamiento de las reservas en poco tiempo. A esto se debe añadir las consecuencias medioambientales que ocasiona, como son: la lluvia ácida, el calentamiento global y la contaminación atmosférica por las cenizas, así como de muchos de los problemas respiratorios que podemos sufrir las personas.

Con esta perspectiva desalentadora merece la pena la búsqueda de soluciones que puedan sustituir esta dependencia de los combustibles fósiles, tanto a nivel de ahorro energético en general, como en la inversión en fuentes de energía renovables.

Dentro de los sectores con mayor demanda energética se sitúa la industria del Automóvil, esta industria presenta una serie de características que la diferencian de otras, como son su producción masiva y sus constantes avances tecnológicos. Es además una industria con gran competencia por el elevado número de fabricantes de vehículos, dónde la calidad se torna el elemento diferenciador por parte del consumidor, aunque también debe cumplir una normativa cada vez más restrictiva a nivel de emisiones contaminantes. (Euro V y Euro VI).

Por otra parte debido a que los vehículos actuales son propulsados en su gran mayoría por motores de combustión interna alternativos (MCI), alimentados por combustibles fósiles, generalmente gasolina o diésel (productos derivados del petróleo y de recurso finito), se demanda cada vez más alternativas que acaben con los problemas asociados al uso de estos combustibles.

El gran trabajo y esfuerzo que se ha destinado a la obtención de alternativas que reduzcan el uso de combustibles fósiles dentro del sector del automóvil ha empezado a dar sus frutos con vehículos híbridos y vehículos 100% eléctricos que empiezan a ocupar un hueco dentro de esta industria.

A pesar de todo ello, las dificultades y limitaciones que ofrecen estas alternativas hacen que se deba seguir trabajando y encontrando nuevas alternativas como puede ser el uso del hidrógeno, una fuente de energía más novedosa y desconocida pero con un potencial muy prometedor.

En este Trabajo Fin de Máster se ha querido dar un paso en la utilización del hidrógeno dentro del sector de la automoción y por tanto se plantea la adaptación de un vehículo automóvil para la incorporación de una pila de combustible alimentada por hidrógeno.

1.2. Objetivos

Para la elaboración de este Trabajo de Fin de Máster se han marcado los siguientes objetivos que se pretenden abordar a lo largo del mismo:

El **objetivo general** de este TFM es el **cálculo, dimensionamiento y evaluación de un vehículo propulsado por una pila de combustible con almacenamiento a bordo de hidrógeno, basado en un modelo existente con motor diésel.**

Como **objetivos específicos** se han marcado los siguientes:

- Recopilar las características y capacidades del hidrógeno como portador de energía
- Considerar las características de una pila de combustible para su uso en un automóvil
- Considerar un vehículo existente como base para su adaptación
- Describir la alternativa planteada para el sistema de propulsión y almacenamiento de hidrógeno
- Realizar el cálculo y dimensionamiento de los elementos necesarios
- Evaluar y comparar las prestaciones que ofrece la alternativa propuesta frente al vehículo base.

1.3. Desarrollo del trabajo

Para abordar los objetivos marcados se ha dividido este trabajo en siete capítulos.

En este capítulo 1 se describen los antecedentes, objetivos y desarrollo del trabajo.

En el capítulo 2 se aborda el marco de referencia en el cual se sitúa este trabajo, se realiza un estudio del panorama energético actual, se describen las características del hidrógeno como portador de energía y se explica el funcionamiento de una pila de combustible.

En el capítulo 3 se realiza la elección de un vehículo existente como base para la adaptación y se describe el nuevo sistema a implantar.

En el capítulo 4 se utiliza un modelo de cálculo basado en el ciclo de conducción NEDC para obtener los requerimientos energéticos del vehículo durante la conducción.

En el capítulo 5 se desarrolla el cálculo y dimensionamiento de todos los elementos que forman parte de nuevo sistema de propulsión y almacenamiento del vehículo.

En el capítulo 6 se analizan los resultados obtenidos durante este trabajo para evaluar la alternativa propuesta y obtener las conclusiones finales y líneas futuras que ofrece este TFM.

Por último en el capítulo 7 se recogen las referencias bibliográficas utilizadas.



Universidad de Valladolid

Escuela de Ingenierías Industriales

Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

2. Marco de referencia del hidrógeno

2. MARCO DE REFERENCIA DEL HIDRÓGENO

2.1. Panorama energético actual

El empleo globalizado de los combustibles fósiles como principal fuente de energía en la sociedad actual ha provocado que se llegue a la presente situación medioambiental, donde la contaminación se ha convertido en uno de los problemas más graves de la sociedad contribuyendo al cambio climático y a la pérdida de biodiversidad. Las medidas adoptadas en la actualidad para contrarrestar dicha tendencia pretenden desacelerar esta tasa de crecimiento. Los progresos tecnológicos están consiguiendo reducir, pese a los crecientes volúmenes de tráfico, los niveles de contaminación atmosférica generados por diversos tipos de transporte. Son el transporte aéreo y por carretera los que crecen a mayor velocidad en la actualidad y por ello, los que mayores emisiones de CO₂ generan.

A continuación, en la Figura 1, se muestra el **consumo mundial de energía primaria** por fuentes de energía en 2014. Se puede observar que los combustibles fósiles acaparan el 86% del consumo mundial de energía primaria.

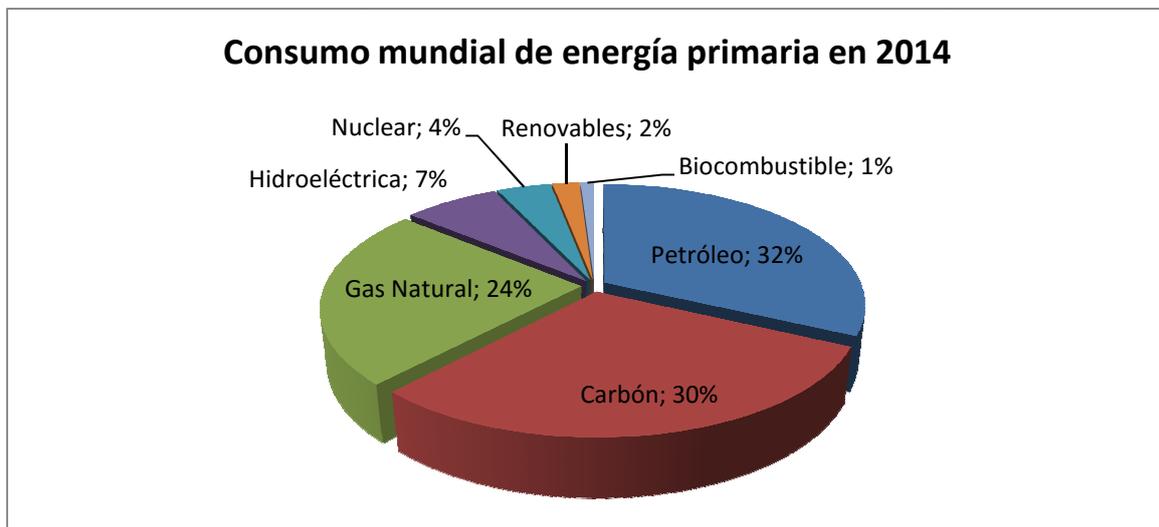


Figura 1: Consumo mundial de energía primaria en 2014 [IEA, 2016]

El consumo de energía primaria en el mundo sigue aumentando aunque, en los últimos años, lo hace en menor medida. La aportación de las energías renovables está creciendo pero, en cualquier caso, sigue siendo un aporte minoritario y se debe continuar con su desarrollo e implantación.

El **petróleo** es la energía primaria más consumida mundialmente seguida del **carbón** que es la principal fuente de energía en los países emergentes y tiene como principal consumidor a China. También destaca el **gas natural** que ha vuelto a aumentar como consecuencia de las nuevas técnicas para su extracción, que han aumentado las reservas y abaratado su precio, principalmente en EEUU.

En cuanto a la **generación eléctrica** se observa, con ayuda de la Figura 2, que del año 1985 al año 2011, se ha multiplicado por más de dos la energía eléctrica producida a nivel mundial. Esto se debe al constante aumento de su demanda por parte de una sociedad creciente en la que la electricidad es el principal vector energético. La electricidad no es una energía primaria, ni tampoco un recurso energético, porque no se encuentra en la naturaleza, hay que producirla a partir de fuentes de energía, que sí son primarias, como, por ejemplo: energía nuclear, energía hidráulica, energía térmica, etc.

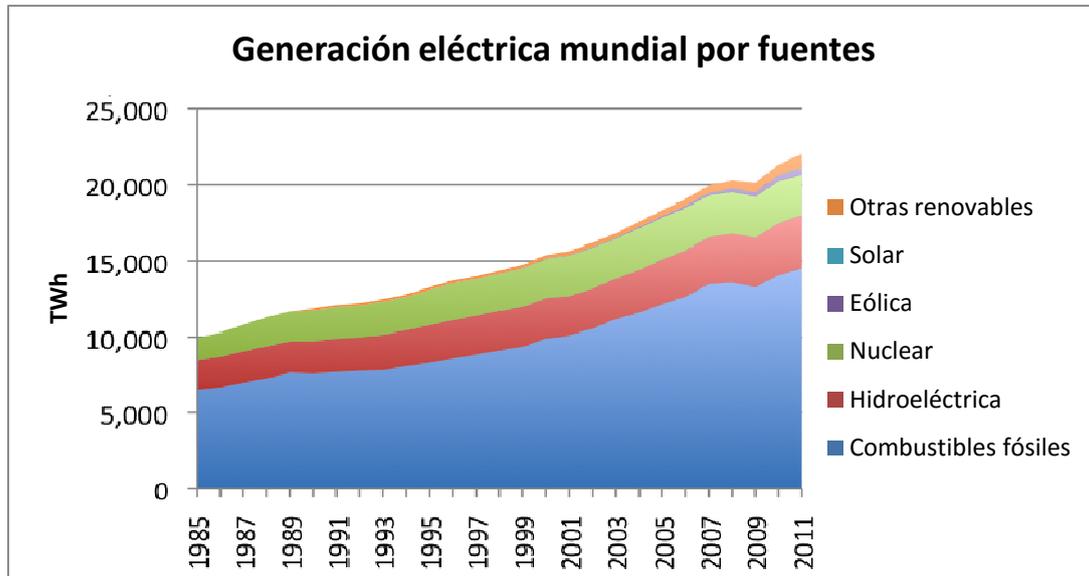


Figura 2: Evolución de la generación eléctrica mundial por fuentes de energía [IEA, 2016]

Por último, en la Figura 3, se muestra la **energía final consumida** a nivel mundial en el año 2014. Una vez más, se vuelve a la conclusión inicial de esta introducción: el panorama energético actual se basa en los combustibles fósiles, que, como se puede observar, acaparan el 66% del consumo final de energía en el mundo. Además, hay que tener en cuenta que de la electricidad consumida a nivel mundial dos terceras partes proviene de combustibles fósiles, como se ha mostrado en la Figura 2.

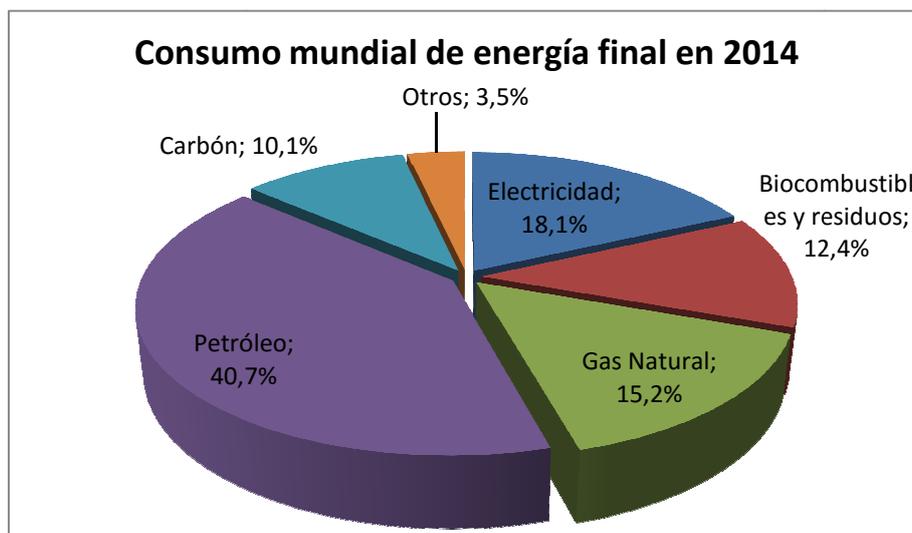


Figura 3: Consumo mundial de energía final en 2014 [IEA, 2016]

Como consecuencia de todo ello, se ha alcanzado la actual situación medioambiental, una situación insostenible a la que se ha llegado debido al continuo aumento de las emisiones producidas por el uso masificado de estos combustibles tal y como se muestra en la Figura 4.

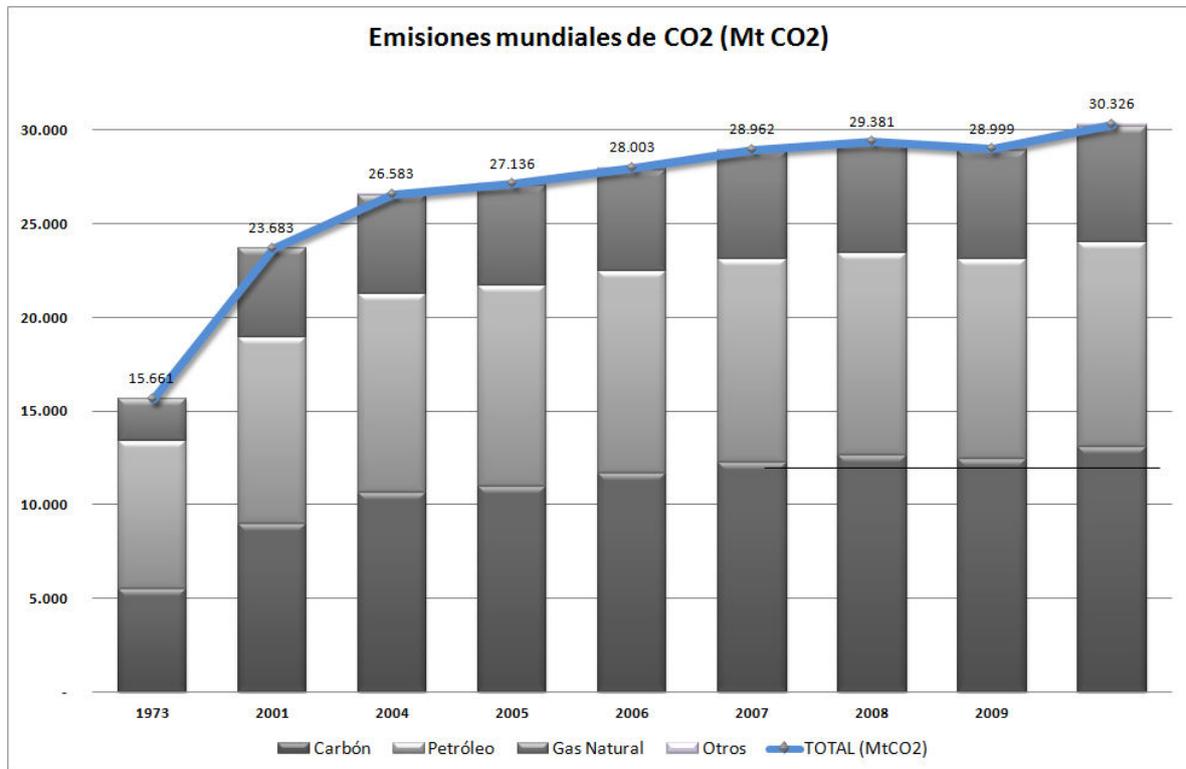


Figura 4: Evolución de las emisiones mundiales de CO₂ en Mt de CO₂ [IEA, 2016]

Si se continúa por este camino, en el que estos tres combustibles representan más de la mitad del mix energético, no se alcanzará de ninguna manera un desarrollo sostenible de nuestra sociedad que no comprometa el futuro de la misma. Teniendo en cuenta todos estos aspectos, el ser humano está obligado a reconducir el sistema energético mundial hacia un camino más sostenible. Para conseguir alcanzar los objetivos planteados en protocolos como el protocolo de Kioto o la cumbre de Durban, hay que cambiar la manera en la que el ser humano obtiene energía.

Para ello es necesario un cambio en el sistema energético mundial en el que se apueste por una disminución progresiva en el empleo de combustibles fósiles. Hay que frenar la fuerte dependencia que existe con estos combustibles, lo que hará que se vayan reduciendo paulatinamente las emisiones producidas. El hueco que, poco a poco, vayan dejando tanto el petróleo como el carbón y el gas natural, debe ser asumido por fuentes de energías limpias y sin emisiones, como lo son las energías renovables, y por combustibles que contaminen menos como los biocombustibles o el hidrógeno.

En este marco, se posiciona el hidrógeno como una opción de futuro muy prometedora, pues se trata de un **vector energético** que muestra una gran ventaja respecto a la electricidad y es que además de la gran variedad de fuentes de la que puede ser obtenido, incluida las fuentes renovables, puede ser almacenado.

2.2. El hidrógeno

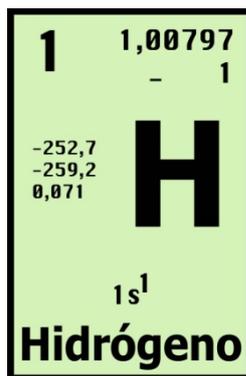


Figura 5: Hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más ligero y más abundante en el universo (Figura 5), pero en la Tierra raramente se encuentra en estado libre, pues, debido a su naturaleza altamente reactiva, suele encontrarse formando, junto a otros elementos, moléculas, como por ejemplo agua o hidrocarburos. Por tanto, no es un recurso natural y tampoco es una fuente de energía primaria. Se define el **hidrógeno como un vector energético**, que al igual que la electricidad, se ha de producir y transportar, pero que además muestra una gran ventaja respecto a la electricidad, y es que puede ser almacenado.

En la actualidad, no se conoce ningún método eficiente de almacenar grandes cantidades de electricidad, lo cual supone un gran problema para el sistema energético actual y para la integración de las energías renovables en el mismo. Hoy en día, las centrales hidroeléctricas de bombeo, o reversibles, son la única tecnología extendida para el almacenamiento de grandes cantidades de energía. El hecho de que el hidrógeno pueda almacenarse, lo hace una opción de futuro muy prometedora.

El hidrógeno cumple con los requisitos que debe de tener un vector energético. Puede ser obtenido por medio de cualquiera de las fuentes de energía primaria, incluidas las fuentes renovables, requisito imprescindible para poder convertir el sistema energético actual en un sistema menos contaminante. Además es limpio y benigno medioambientalmente, en su combustión no se producen subproductos nocivos, solo se produce agua y calor, convirtiéndose en un combustible ideal para el transporte.

A largo plazo, el hidrógeno se vislumbra como el sustituto perfecto del petróleo como combustible para el transporte gracias a los vehículos con pilas de combustible integradas. En la actualidad, se están empezando a comercializar este tipo de vehículos. Además, los vehículos que funcionen con pilas de combustible serán más eficientes energéticamente que los actuales vehículos basados en motores de combustión interna, manteniendo las mismas prestaciones, y reduciendo de forma drástica las emisiones del sector del transporte.

La perspectiva de futuro del hidrógeno en sintonía con el cambio, mencionado en la primera parte de la introducción, que debe producirse en el panorama energético mundial de nuestros días, es la obtención de “hidrógeno renovable”, es decir, hidrógeno producido a partir de fuentes de energía renovable sin emisiones contaminantes a la atmósfera.

A la vista de la Figura 6, se observa otra de las grandes ventajas que presenta el hidrógeno, la gran variedad de fuentes disponibles para su producción. Además puede cubrir la demanda de necesidades energéticas para el transporte, el consumo de los edificios y de la industria.

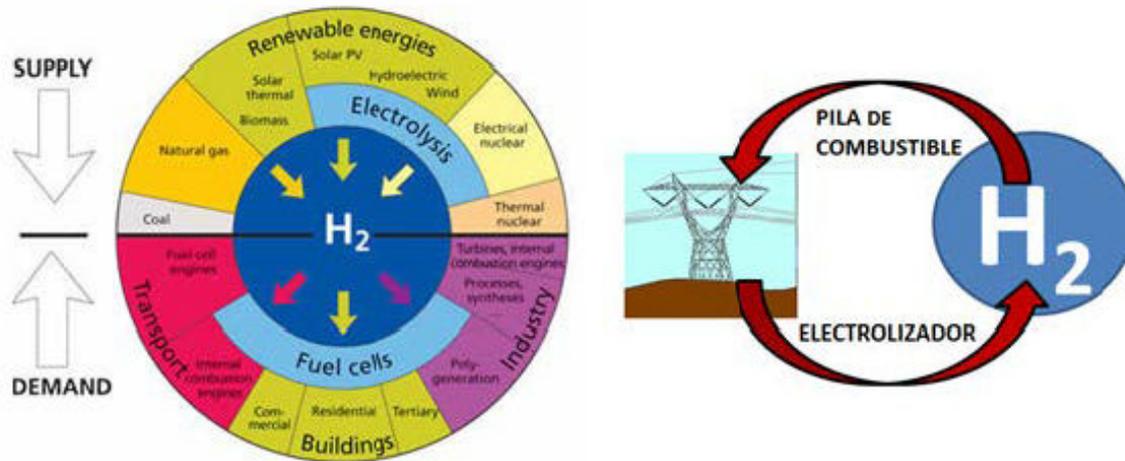


Figura 6: Integración del H₂ en el sistema energético actual [Aguer, 2007]

Adicionalmente, el hidrógeno tiene la gran ventaja de que puede complementarse con el vector energético actual, es decir, con la electricidad. El excedente de electricidad producida se transformaría, por medio de un electrolizador, en hidrógeno que sería almacenado. Este hidrógeno almacenado podría ser de nuevo transformado en electricidad empleando una pila de combustible, o se podría emplear directamente como combustible. Tanto las pilas de combustible como los electrolizadores son, por tanto, dos equipos fundamentales a la hora de trabajar con hidrógeno y cuentan con la gran ventaja de que son equipos que presentan una eficiencia alta ya que no son máquinas térmicas y están libres de las limitaciones del ciclo de Carnot.

El hidrógeno posee un gran contenido de energía por unidad de masa, un kilogramo de hidrógeno puede liberar más energía que un kilogramo de cualquier otro combustible habitual (casi el triple que la gasolina o el gas natural). Como inconveniente posee una muy baja densidad a presión y temperatura ambiente, haciéndolo poco práctico para muchas aplicaciones y convirtiendo su almacenamiento en un problema en estas condiciones.

El almacenamiento de hidrógeno posee ciertas dificultades técnicas, sobre todo para el transporte, donde el espacio en los vehículos es muy limitado, haciendo inviables grandes depósitos. Éste es un factor, junto a la escasez de infraestructuras, que está influyendo en que no se esté desarrollando e implementando la economía del hidrógeno en los plazos marcados por la comunidad científica. Algunas de las soluciones para el almacenamiento de hidrógeno son el almacenamiento físico por compresión, la licuefacción y la adsorción química o física en sólidos. Cada opción de almacenamiento cuenta con ventajas y desventajas respecto a las otras, pero hasta el momento no se ha encontrado ningún método que cumpla todos los requisitos que debe tener un buen sistema de almacenamiento: alta eficiencia, un tamaño adecuado, un peso que no sea excesivo, un coste competitivo en el mercado y alta seguridad del sistema exenta del riesgo de accidentes.

Actualmente, el hidrógeno se utiliza para numerosas aplicaciones como la producción de amoníaco y fertilizantes (36%), en procesos de refinería para aumentar la calidad del combustible (27%), en la síntesis de metanol (6%), en procesos metalúrgicos (8%) y como combustible aeroespacial (3%), entre otras aplicaciones.

2.3. Métodos de producción de H₂

Como ya se ha comentado, el hidrógeno debe producirse a partir de fuentes renovables. Si no fuera así, no se solucionaría el actual problema de contaminación. Pero, puesto que los precios de producción de hidrógeno obtenido mediante fuentes de energía renovables siguen sin ser competitivos, en la actualidad, la mayoría del hidrógeno producido proviene de los combustibles fósiles. A la vista de la Figura 7, se observa que la principal materia prima para la producción del hidrógeno en la actualidad es el gas natural. Además, se concluye que, hoy por hoy, el hidrógeno obtenido no es de origen renovable, pues el 96% de la producción total proviene directamente de combustibles fósiles. El resto, un 4%, se obtiene mediante electrolisis, es decir, a partir de electricidad, que posiblemente tampoco tenga un origen renovable.

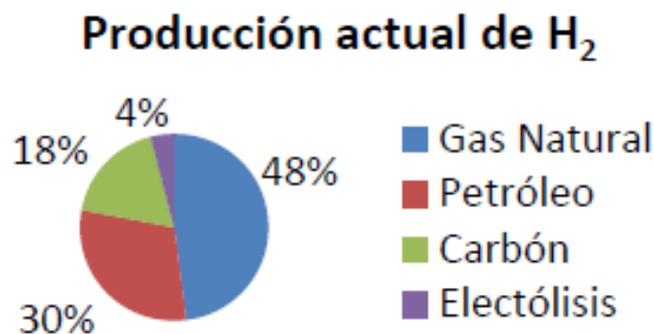


Figura 7: Producción actual H₂ [Aguer, 2007]

La obtención de hidrógeno a partir de combustibles fósiles es un primer paso hacia el uso del hidrógeno a gran escala, y paulatinamente debe introducirse el hidrógeno de origen renovable.

Existen un gran número de métodos para la producción de hidrógeno, es más, el número va incrementándose debido a toda la investigación que existe en torno a este tema. Habitualmente, todos los procesos conocidos para la producción de hidrógeno se agrupan en tres grandes grupos:

- **Métodos termoquímicos:** Consisten en reacciones químicas, que pueden ser de oxidación o no, para la separación del hidrógeno de la materia prima empleada en el proceso y a las que hay que aportar energía para que se produzcan. Algunos de los métodos termoquímicos empleados constituyen tecnologías de producción bien establecidas a nivel industrial, principalmente el reformado de gas natural con vapor de agua, pero también otros como la oxidación parcial, el reformado autotérmico o el proceso Steam-Iron.

- **Métodos electroquímicos:** Se basan en el empleo de una corriente eléctrica para la producción del hidrógeno. Es aquí donde se encuadra la electrolisis, que es la tecnología más limpia para la producción de hidrógeno, siempre que la electricidad provenga de una energía renovable, pero esto hace que su precio aumente demasiado. Otro método electroquímico es la producción de hidrógeno de forma fotoelectroquímica, basada en la utilización de la energía derivada de los fotones.

- **Métodos biológicos:** El hidrógeno es producido de forma biológica o de forma fotosintética a partir de microorganismos anaeróbicos y fotosintéticos, respectivamente. Para ello hacen uso de materias primas no tóxicas y ricas en carbohidratos. Es una técnica emergente y prometedora que, a escala de laboratorio, presenta altas eficiencias.

Obtención de H₂ a partir de gas natural

De todos los métodos conocidos para la producción de hidrógeno en la actualidad, es el reformado de gas natural con vapor de agua el más empleado para la producción comercial de hidrógeno a nivel mundial con mucha diferencia, pues se trata de uno de los métodos más desarrollados y de los pocos verdaderamente rentables económicamente.

Los procesos básicos que componen el reformado con vapor de gas natural son los aparecen en la Figura 8:

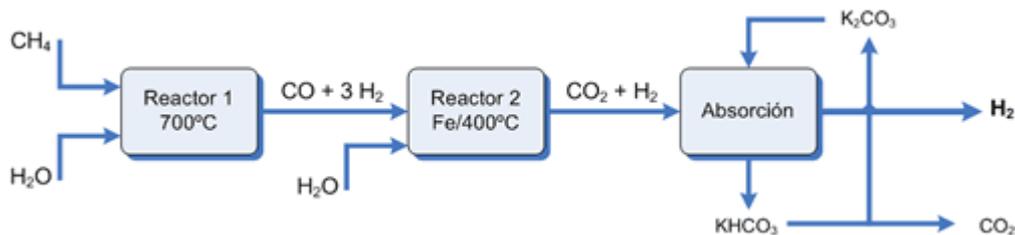
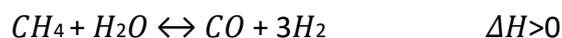


Figura 8: Proceso típico de obtención de H₂ a partir de gas natural

Las reacciones que componen el proceso son:



El reformado de gas natural con vapor de agua es un proceso catalítico puesto que la reacción de reformado es altamente endotérmica, siendo el catalizador un factor determinante del mismo, pues acelera el proceso.

Además del alto precio de los catalizadores, y de que se está usando un hidrocarburo para la producción de hidrógeno, lo que supone que no es de origen renovable, otro de los problemas de este proceso es que hay que purificar la corriente de salida del proceso para separar el hidrógeno del resto de compuestos. Esta operación de separación se realiza en las unidades PSA (Pressure Swing Adsorption) con zeolitas y carbones activos, y añade mucho coste al proceso.

2.4. Pila de combustible

La transformación del hidrógeno en electricidad se realiza a través de un elemento que recibe el nombre de pila de combustible.

Una pila de combustible, también llamada célula o celda de combustible es un dispositivo electroquímico que transforma de forma directa la energía química en eléctrica. Es similar a una batería, aunque se diferencia en que tiene alimentación continua de los reactivos y en que sus electrodos son catalíticos y relativamente estables.

Se parte de unos reactivos, un combustible, generalmente hidrógeno, y de un comburente, en muchos casos oxígeno, y se consigue obtener como productos: agua, electricidad en forma de corriente continua y calor.

En una pila de combustible se distinguen las siguientes partes (Figura 9):

- Electrodos (ánodo, donde se reduce el H_2 y cátodo, donde reacciona H^+ y O_2)
- Electrolito (separa los gases, permite el paso de iones H^+ al cátodo y separa los e^-)
- Placas bipolares (separan las celdas, conducen los gases y evacuan H_2O)

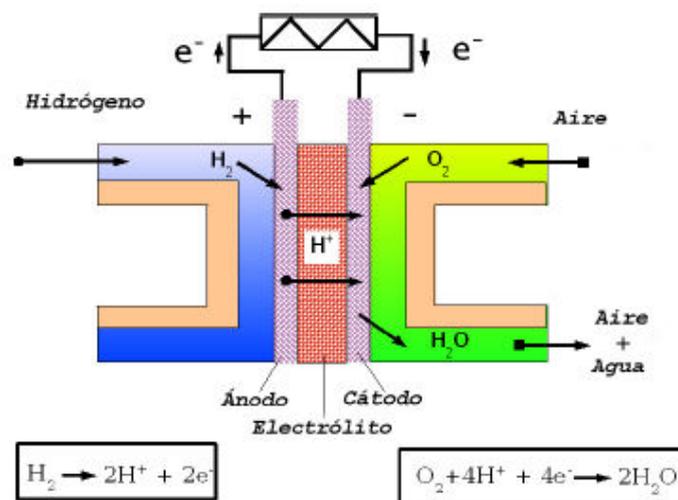


Figura 9: Esquema de una pila de combustible

Las reacciones que tienen lugar en cada uno de los electrodos son:

- Reacción en el ánodo: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
- Reacción en el cátodo: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
- Reacción global: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

En el lado del ánodo, el hidrógeno que llega se disocia en protones y electrones. Los protones son conducidos a través de la membrana al cátodo, pero los electrones están forzados a viajar por un circuito externo (produciendo energía eléctrica) ya que la membrana está aislada eléctricamente. En el cátodo, las moléculas del oxígeno reaccionan con los electrones (conducidos a través del circuito externo) y protones para formar el agua. En este caso, el único residuo es vapor de agua o agua líquida.

Los principales atractivos que presenta el uso de pilas de combustible son:

- Alta eficacia de conversión, incluso a cargas parciales.
- Diseño modular.
- No tiene emisiones químicas y por tanto no contamina durante su uso.
- Empleo de hidrógeno procedente de diversas fuentes.
- Rápida respuesta frente a variaciones de la carga.
- La energía eléctrica resultante en forma de corriente continua puede ser transformada en alterna mediante inversores y empleada en motores eléctricos de corriente alterna, o bien ser acondicionada para ser empleada directamente en motores de corriente continua.
- NO ES UN PROCESO TÉRMICO, por lo que el rendimiento máximo teórico es el 100%, teniendo rendimientos en la práctica del 50-60%.
- Sin partes internas móviles, por tanto son muy silenciosas.

Existen una gran variedad de pilas de combustible en función del tipo de electrolito utilizado y de la temperatura aproximada de operación. Según estas características se pueden clasificar, como se detalla en las Tablas 1 y 2.

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Electrolito	Membrana de Polímero Sólido	Solución Alcalina	Ácido Fosfórico	Carbonatos Fundidos	Óxido Sólido	Membrana de Polímero Sólido
Temperatura Trabajo (°C)	60 – 80	100 – 120	200 – 250	600 – 700	800 – 1000	50 -120
Combustible	Hidrógeno	Hidrógeno	Hidrógeno Gas Natural	Gas Natural	Gas Natural	Metanol
Ventajas	Baja Tª Arranque rápido Baja corrosión y mantenimiento	Mayor eficiencia Reacción catódica más rápida	Acepta H2 con 1% de CO	Reformado interno Cogeneración	Reformado interno Cogeneración	No necesita reformador de combustible
Aplicaciones	Transporte Portátiles Residencial	Espaciales	Generación eléctrica distribuida Automoción	Generación eléctrica	Generación eléctrica	Portátiles

Tabla 1: Tipos de pilas de combustible

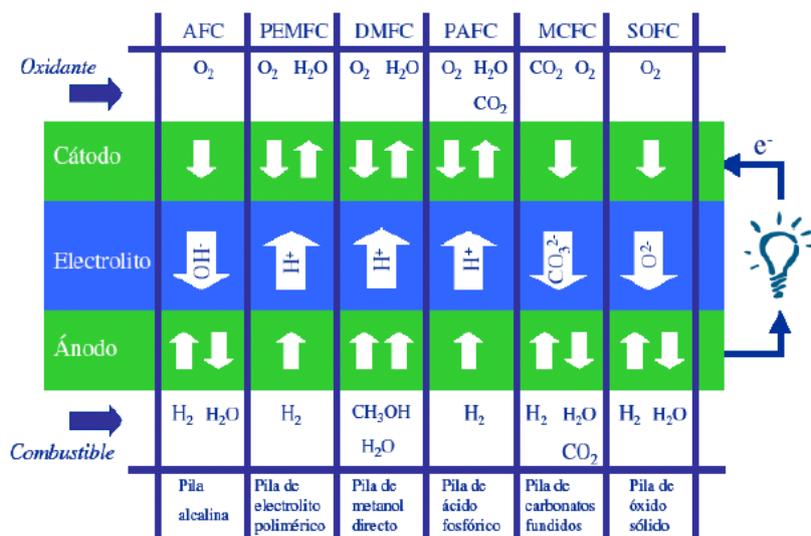


Tabla 2: Esquema de los tipos de pilas de combustible

Las aplicaciones de las pilas de combustibles son muy amplias: desde dispositivos portátiles, vehículos de todo tipo (coches, autobuses, barcos), hasta sistemas estacionarios de generación de calor y energía para empresas, hospitales, zonas residenciales, etc.

Las celdas de combustible son muy útiles como fuentes de energía en lugares remotos, como por ejemplo naves espaciales, estaciones meteorológicas alejadas, localizaciones rurales, y en ciertos usos militares.

Dentro de todas estas aplicaciones destaca como la más ambiciosa y prometedora el uso de vehículo basados en pila de combustible. Actualmente algunas marca de automóviles están empezando a lanzar los primeros prototipos de estas características como el que aparece en la Figura 10.



Figura 10: Toyota Mirai



Universidad de Valladolid

Escuela de Ingenierías Industriales

Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

3. Sistema de propulsión basado en pila de combustible

3. SISTEMA DE PROPULSIÓN BASADO EN PILA DE COMBUSTIBLE

3.1. Elección y descripción del vehículo base

A pesar de que este trabajo pretende dar una visión global de los aspectos más significativos a tener en cuenta a la hora del cálculo y dimensionamiento de un vehículo basado en pila de combustible se debe ser preciso en los cálculos que posteriormente se llevarán a cabo, por tanto es necesario disponer de una base a partir de la cual poder abordar el trabajo.

En este punto se procederá a la elección de un modelo comercial de automóvil que se empleará posteriormente como vehículo base para la adaptación. Al tratarse de un vehículo comercial se dispondrá de todos los datos que el fabricante hace públicos (ficha técnica, prestaciones, dimensiones, etc.)

En este trabajo por tratarse de una empresa conocida con sede en Valladolid y por disponer más fácilmente de los datos necesarios se ha elegido la marca "Renault". Dentro de sus modelos comerciales actuales se ha optado por un modelo cuyas características hagan más viable el empleo del hidrógeno en su motorización, se trata del "Renault Captur" (Figura 11).



Figura 11: Renault Captur

Las especificaciones técnicas del vehículo base vienen recogidas en las Tablas 3-7 [Renault, 2016]

Prestaciones y consumos homologados	
Velocidad máxima (km/h)	171
Aceleración 0.100 km/h (s)	13.1
Aceleración 0.1000 m (s)	34.7
Recuperación 80.120 km/h en 4ª (s)	-
Consumo urbano (1/100 km)	3.9
Consumo extraurbano (1/100 km)	3.5
Consumo medio (1/100 km)	3.7
Emisiones de CO₂ (g/km)	95
Normativa de emisiones	Euro VI

Tabla 3: Ficha técnica Renault Captur (Prestaciones y consumos homologados)

Dimensiones, peso y capacidades	
Tipo de Carrocería	Todo terreno
Número de puertas	5
Largo / ancho / alto (mm)	4122/1778/1566
Batalla / vía delantera-trasera (mm)	2606/1531/1516
Coefficiente Cx / Superficie frontal (m²) / Factor de resistencia	0.35/2.29/0.79
Peso en vacío (kg)	1178
Masa máxima autorizada MMA (kg)	1727
Tipo de depósito:	
Combustible Gasóleo (litros)	45
Volúmenes de maletero:	
Volumen con una fila de asientos disponible (litros)	1235
Volumen máximo con dos filas de asientos disponibles (litros)	455
Volumen mínimo con dos filas de asientos disponibles (litros)	377
Número de plazas / Distribución de asientos	5/2+3

Tabla 4: Ficha técnica Renault Captur (Dimensiones, peso y capacidades)

Motor de Combustión	
Combustible	Gasóleo
Potencia máxima CV-KW/rpm	90-66/4000
Par máximo Nm/rpm	220/1750
Situación	Delantero transversal
Número de cilindros	4 – En línea
Material del bloque/culata	Hierro / Aluminio
Diámetro x carrera (mm)	76.0 x 80.5
Cilindrada (cm³)	1461
Relación de compresión	15.2 a 1
Distribución	2 válvulas por cilindro. Un árbol de levas en la culata
Alimentación	Inyección directa por conducto común. Turbo. Intercooler
Automatismo de parada y arranque del motor ("Stop/Start")	Sí

Tabla 5: Ficha técnica Renault Captur (Motor de Combustión)

Transmisión		
Tracción		Delantera
Caja de cambios		Manual: 5 velocidades
Tipo de Embrague		--
Tipo de mecanismo		--
Desarrollos (km/h a 1.000 rpm)		
	1 ^a	8.6
	2 ^a	16.4
	3 ^a	26.0
	4 ^a	35.5
	5 ^a	48.6

Tabla 6: Ficha técnica Renault Captur (Transmisión)

Chasis	
Suspensión delantera (estructura/muelle)	Tipo McPherson/Resorte helicoidal
Suspensión trasera (estructura/muelle)	Rueda tirada con elemento torsional/Resorte helicoidal
Barra estabilizadora (delante/detrás)	Sí/Sí
Frenos delanteros (diámetro mm)	Disco ventilado (280)
Frenos traseros (diámetro mm)	Tambor
Dirección:	
Tipo	Cremallera
Tipo de asistencia	Eléctrica
Asistencia en función de velocidad	Sí
Desmultiplicación en función de la velocidad	No
Desmultiplicación no lineal	No
Desmultiplicación dirección	--
Dirección a las cuatro ruedas	No
Diámetro de giro entre bordillos/paredes(m)	10.4/--
Vueltas de volante entre topes	2.7
Neumáticos delanteros	205/60 R16
Neumáticos traseros	205/60 R16
Llantas delanteras	--x 16
Llantas traseras	--x 16

Tabla 7: Ficha técnica Renault Captur (Chasis)

En el diseño que se va a llevar a cabo se procederá a la retirada de los elementos que conforman el motor de combustión de diésel y a la incorporación de los elementos que conformarán el nuevo sistema a implantar.

Puesto que se trata de un rediseño del sistema de propulsión del vehículo no se contempla ningún cambio en el chasis ni en la carrocería, esto obliga a que la **masa de los nuevos elementos instalados sea similar a la de los elementos retirados**.

Para analizar el cumplimiento de esta hipótesis y atendiendo a los datos de los que se disponen, analizaremos los **elementos más significativos en cuanto a masa** se refiere que conforman el actual sistema de motorización diésel del vehículo base. Estos elementos son:

- Motor de combustión diésel
- Caja de cambios
- Depósito de gasóleo

Motor de combustión diésel

El motor que incorpora el vehículo base es el ENERGY dCi 90 ECO2 cuyas especificaciones se muestran en la Figura 12 donde se puede ver que la masa es de **145 kg**. En el Anexo I se adjunta la ficha técnica completa.

	dCi 75	dCi 90	dCi 110
Number of Cylinders	4		
Number of Valves	8		
Bore x Stroke (mm)	76 x 80.5		
Total Displacement (cc)	1461		
Max. Power (kW (PS))	55 (75)	66 (90)	81 (110)
Speed at max Power (RPM)	4000		
Max. Torque (Nm (lbf.ft))	180-200(133-147)	200-220 (147-162)	260 (192)
Speed at max Torque (RPM)	1750- 2500	1750 – 2500	1750- 2750
Compression Ratio	15.5 : 1		
Fuel Injection	Common Rail Direct Injection		
Turbocharger	Waste Gate		VNT
Fuel	Diesel, 10 ppm S B30 Compatible		
Emissions Standard	Euro5 (Euro6 ready)		
Dimensions (LxWxH)	599 x 624 x 707		
Weight (kg)	145		

Figura 12: Ficha técnica del motor de combustión diésel ENERGY dCi 90 ECO2

Caja de cambios

La caja de cambios que incorpora el vehículo base es de transmisión manual de 5 velocidades JRQ MT5 200Nm cuyas especificaciones se muestran en la Figura 13 y donde se puede ver que la masa es de **36 kg**. En el Anexo II se adjunta la ficha técnica completa.

	JR/JRQ
Maximum torque capacity (Nm):	200
Maximum speed (rpm):	6,500
Number of forward speeds:	5
Differential type	Open/close
Synchronisation:	5 synchronised forward speeds
Dry weight (kg):	36
Type of clutch operation	annular hydraulic (CSC)
Differential material:	Cast iron
Oil capacity (liters):	2, 3
Upper or lower shift	Upper cable
Gears information	reverse gear brake 1st and 2nd double cone
option	tachymeter

Figura 13: Ficha técnica de la caja de cambios JRQ MT5 200Nm

Depósito de gasóleo

En cuanto al depósito no se dispone de ficha técnica, por tanto se calculará su masa aproximada ya que se conoce su capacidad que es igual a 45 l.

$$m_{total\ depósito} = m_{depósito} + m_{gasóleo}$$

$$m_{gasóleo} = V_{combustible} \cdot \rho_{gasóleo}$$

$$m_{gasóleo} = 45\ l \cdot 0,832\ \frac{kg}{l} = 37,44\ kg$$

Dado que el depósito es de plástico su peso no es muy excesivo por tanto haremos la siguiente aproximación:

$$\mathbf{m_{total\ depósito} = 40\ kg}$$

Total masa de elementos del motor diésel

$$m_{total} = m_{motor} + m_{caja\ de\ cambios} + m_{depósito}$$

$$m_{total} = 145\ kg + 36\ kg + 40\ kg$$

$$\mathbf{m_{total} = 221\ kg}$$

Este dato es de gran importante en los cálculos sucesivos ya que limita la masa de los componentes del nuevo sistema de propulsión que se instalarán en el vehículo.

3.2. Descripción del nuevo sistema a implementar

La adaptación que se pretende llevar a cabo consiste en colocar en el vehículo un sistema de propulsión con pila de combustible y almacenamiento a bordo de hidrógeno como aparece en la Figura 14.

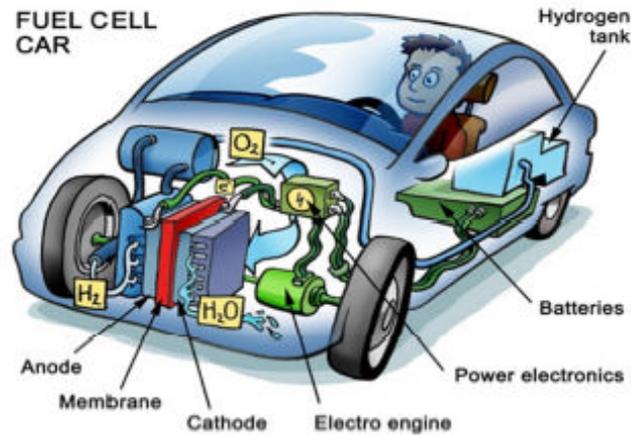


Figura 14: Vehículo con pila de hidrógeno

Se compone de los siguientes elementos (Figura 15):

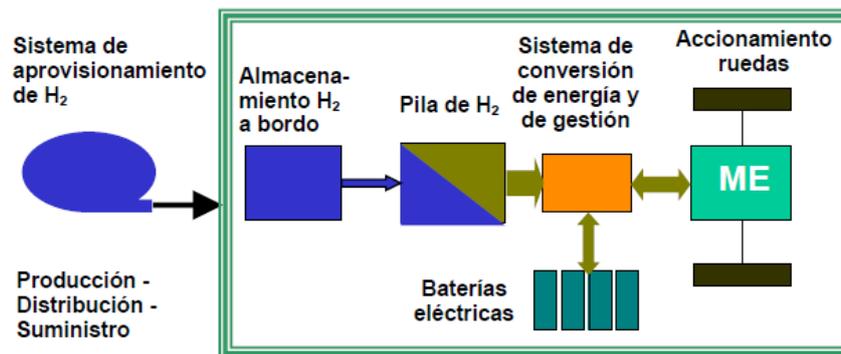


Figura 15: Esquema de un vehículo con pila de H₂

Motor eléctrico

Se trata de un motor eléctrico que recibe la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento del sistema de conversión y gestión y la transforma en energía mecánica para el accionamiento de las ruedas motrices.

Sistema de conversión y gestión de energía

El motor eléctrico debe ser alimentado por energía eléctrica que debe ser gestionada y transformada para su correcto funcionamiento, este sistema es el encargado de tal misión. También es el encargado de gestionar a través de una central electrónica el funcionamiento de la pila de combustible junto con la batería eléctrica para el funcionamiento óptimo durante la conducción.

Baterías eléctricas

Se dispone de una batería eléctrica que se utilizará de buffer de energía, su función será la de acumular la energía sobrante de la pila cuando ésta no sea demandada en su totalidad por el motor eléctrico y poder emplearla cuando sea necesario. El vehículo también incorporará un sistema de recuperación de energía en la frenada que será almacenada en la misma batería eléctrica.

Pila de combustible

Se trata del sistema encargado de realizar la reacción química necesaria para la generación de energía eléctrica a partir del hidrógeno.

Almacenamiento de H₂ a bordo

Se trata del sistema de almacenamiento de hidrógeno que será el “combustible” necesario para el funcionamiento de la pila de combustible. Constará de uno o varios depósitos presurizados que albergarán hidrógeno en estado gaseoso.

Sistema de aprovisionamiento de H₂

No es un componente del vehículo, se trata de la infraestructura necesaria para disponer de estaciones de suministro de hidrógeno que sería lo equivalente a las actuales estaciones de servicio o gasolineras y se encargan de la recarga de los depósitos de hidrógeno que incorpora el automóvil como se muestra en la Figura 16.



Figura 16: Estación de recarga de vehículos de hidrógeno



Universidad de Valladolid

Escuela de Ingenierías Industriales

Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

4. Requerimientos energéticos del vehículo

4. REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS DEL VEHÍCULO

Como se ha especificado anteriormente el objetivo de este trabajo radica en el cálculo y dimensionamiento de los elementos necesarios para la implantación de un nuevo sistema de propulsión basado en una pila de combustible de hidrógeno al vehículo base descrito anteriormente.

El diseño de este sistema debe hacerse **manteniendo** en la medida de lo posible las **características técnicas del vehículo base** y ofreciendo unas especificaciones acordes con la conducción del futuro usuario del automóvil.

Las especificaciones que conforman el nuevo sistema de pila de combustible, están directamente supeditadas a dos características fundamentales de este sistema que son:

- La potencia nominal
- La energía almacenada

La obtención de estas características será la base para el cálculo del resto de especificaciones del nuevo diseño siguiendo el esquema de la Figura 17.

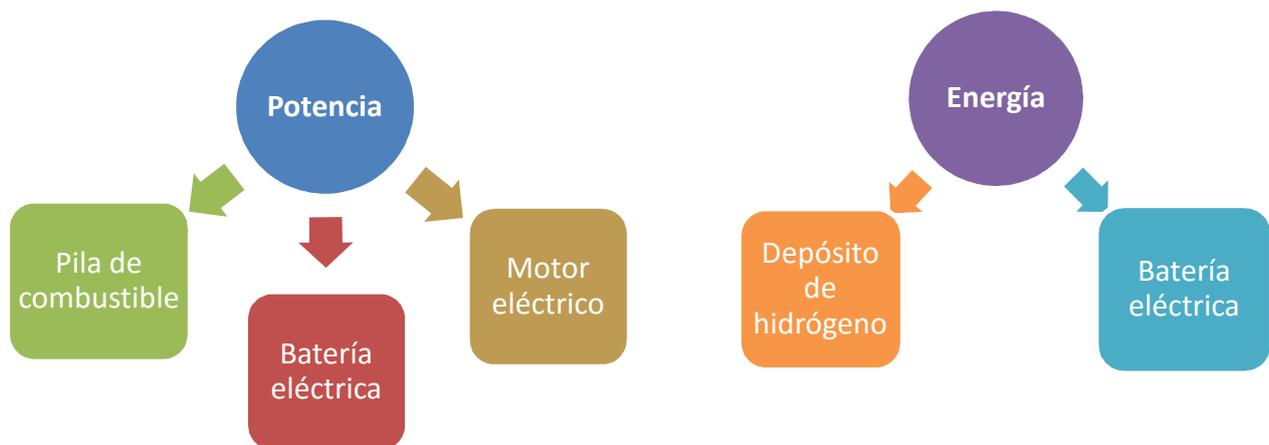


Figura 17: Esquema del cálculo del nuevo sistema

Para conocer los datos de potencia y energía que requiere el vehículo se han de evaluar en un ciclo de conducción, por lo que se ha contemplado la idea de someter el vehículo base a una prueba de conducción homologada a nivel europeo conocido como ciclo NEDC.

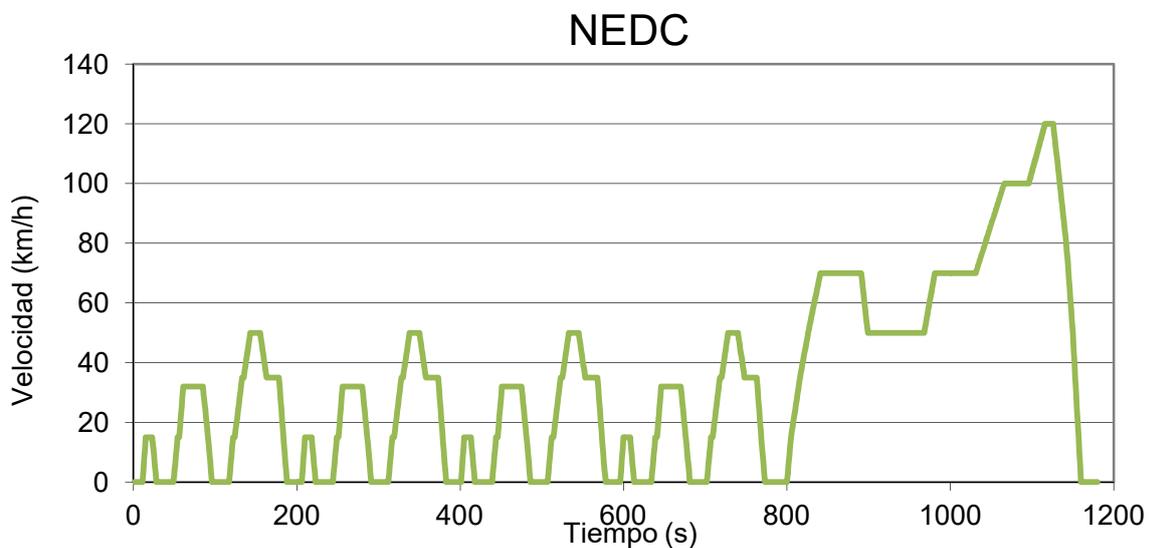
Los datos tanto de potencia como de energía obtenidos con el ciclo NEDC junto con las características técnicas del vehículo base sirven para el cálculo y dimensionamiento de cada uno de los elementos que formarán el nuevo sistema de propulsión.

4.1. NEDC (New European Driving Cycle)

El NEDC (New European Driving Cycle) es un ciclo de conducción diseñado para evaluar los niveles de emisión de motores de automóviles y el ahorro de combustible en los vehículos de pasajeros.

El NEDC se supone que representa el uso típico de un automóvil en Europa, consta de cuatro ciclos de conducción ECE-15 repetidos y un ciclo de conducción extra-urbano (Extra-Urban Driving Cycle EUDC) se puede representar en términos de velocidad y tiempo (Gráfica 1).

Las pruebas se basan en la legislación europea sobre emisiones y es reconocido por la CEPE Foro Mundial para la Armonización de los Reglamentos sobre Vehículos.



Gráfica 1: Ciclo NEDC

Características	ECE 15	EUDC
Distancia (km)	4 x 1,013 = 4,052	6,955
Tiempo (s)	4 x 195 = 780	400
Velocidad media (km/h)	19	62,6
Velocidad máxima (km/h)	50	120
Aceleración (%)	21,6	--
Aceleración máxima	--	0,833
Desaceleración (%)	13,6	--
Desaceleración máxima (m/s ²)	--	1,389
Parado (%)	35,4	--
Velocidad constante (%)	29,3	--

Tabla 8: Características del ciclo NEDC

Los datos del ciclo NEDC se han volcado en un libro Excel, parametrizando el ciclo NEDC a través del tiempo y la velocidad. El objetivo es utilizar este ciclo para conocer los valores de potencia y energía que son claves en el diseño y cálculo de los elementos del nuevo sistema de propulsión, de acuerdo con lo que se describe a continuación.

4.2. Cálculo de la potencia instantánea en el ciclo NEDC

Se dispone por tanto de un conjunto de datos de tiempo y velocidad con los cuales se obtiene la potencia que requiere el vehículo en cada instante del ciclo de conducción.

Para el cálculo de la potencia instantánea son necesarios junto con los datos del ciclo NEDC una serie de datos del vehículo base que se pueden localizar en la ficha técnica adjunta en el apartado "3.1. Elección y descripción del vehículo base".

Los datos necesarios son:

Largo /ancho/alto (mm)	4122/1778/1566
Coefficiente Cx / Superficie frontal (m ²)/ Factor de resistencia	0.35/2.29/0.79
Peso (kg)	1245

La **potencia total** necesaria para el vehículo se calcula como el producto de la velocidad por la suma de varias fuerzas que actúan sobre el vehículo, se puede obtener a través de la siguiente fórmula:

$$P = \frac{v}{\eta_t} \cdot \left(F_f + F_\omega + F_g + m_v \cdot \frac{dv}{dt} \right)$$

Donde:

P → Potencia empleada por el vehículo

v → Velocidad

η_t → Rendimiento de la transmisión

F_f → Fuerza de resistencia aerodinámica

F_ω → Fuerza de rodadura

F_g → Fuerza gravitatoria

m_v → Masa del vehículo

$\frac{dv}{dt}$ → Variación de la velocidad

Fuerza de resistencia a la rodadura

Es la fuerza que se produce por el rozamiento del vehículo con el suelo al desplazarse a una cierta velocidad. Se puede obtener con la fórmula siguiente:

$$F_f = m_v \cdot g \cdot f_r$$

F_f → Fuerza de resistencia a la rodadura

m_v → Masa del vehículo

g → Aceleración de la gravedad

f_r → Coeficiente de resistencia a la rodadura

Para las velocidades de un automóvil se puede estimar que:

$$f_r = 0,01 \cdot \left(1 + \frac{v}{160} \right) \quad v \text{ en km/h}$$

Fuerza de resistencia aerodinámica

Es la fuerza que se produce por el rozamiento del vehículo con el aire al desplazarse a una cierta velocidad. Se puede obtener con la fórmula siguiente:

$$F_{\omega} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot (v + v_{\omega})^2$$

F_{ω} → Fuerza de resistencia aerodinámica

ρ → Densidad del aire

A_f → Área frontal del vehículo

C_D → Coeficiente aerodinámico

v → Velocidad

v_{ω} → Velocidad del viento (Se considera igual a cero)

Fuerza gravitatoria

Es la fuerza que debe vencer el vehículo para superar una pendiente (Figura 18). Se puede obtener con la fórmula siguiente:

$$F_g = m_v \cdot g \cdot \sin \alpha$$

F_g → Fuerza gravitatoria

m_v → Masa del vehículo

g → Aceleración de la gravedad

α → Ángulo de la pendiente

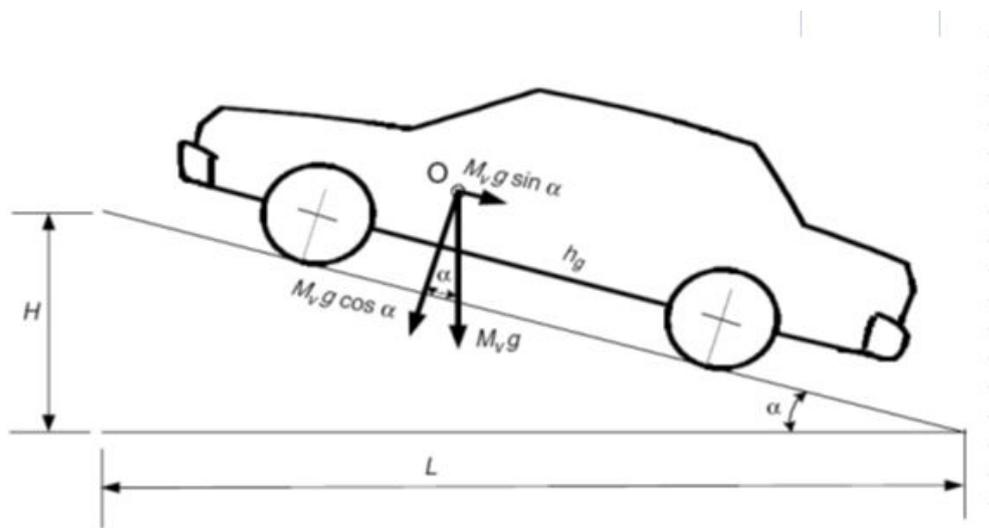


Figura 18: Fuerza gravitatoria

Para el diseño se supondrá que la pendiente es nula y por tanto el término de fuerza gravitatoria se considera igual a cero.

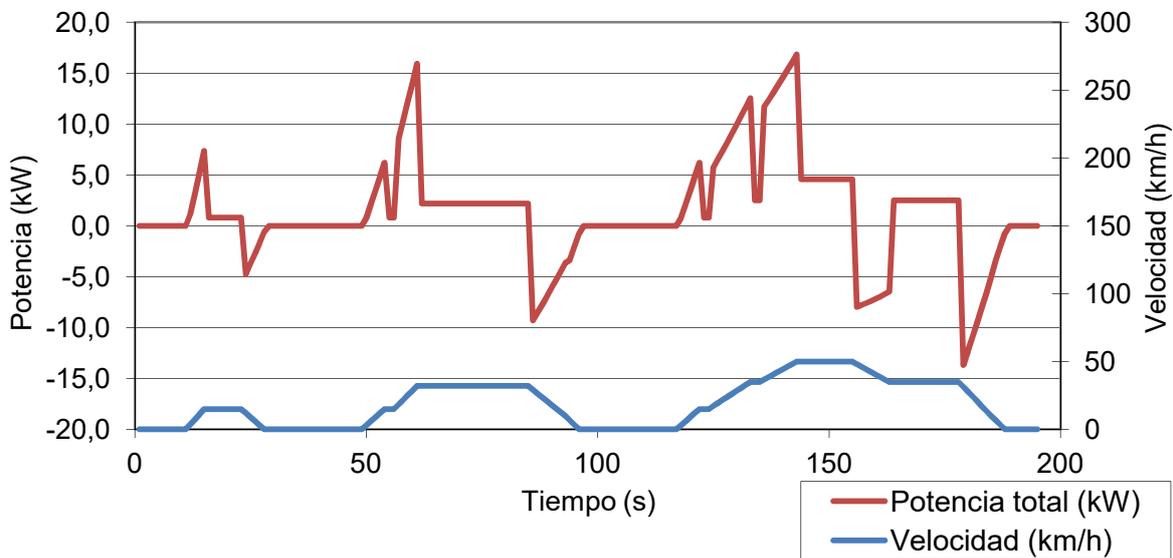
Si incluimos todas estas expresiones en la fórmula de la potencia obtenemos la siguiente expresión:

$$P = \frac{v}{\eta_t} \cdot \left(F_f + F_\omega + F_g + m_v \cdot \frac{dv}{dt} \right)$$

$$P = \frac{v}{\eta_t} \cdot \left(m_v \cdot g \cdot 0,01 \cdot \left(1 + \frac{v}{160} \right) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot v^2 + m_v \cdot \frac{dv}{dt} \right)$$

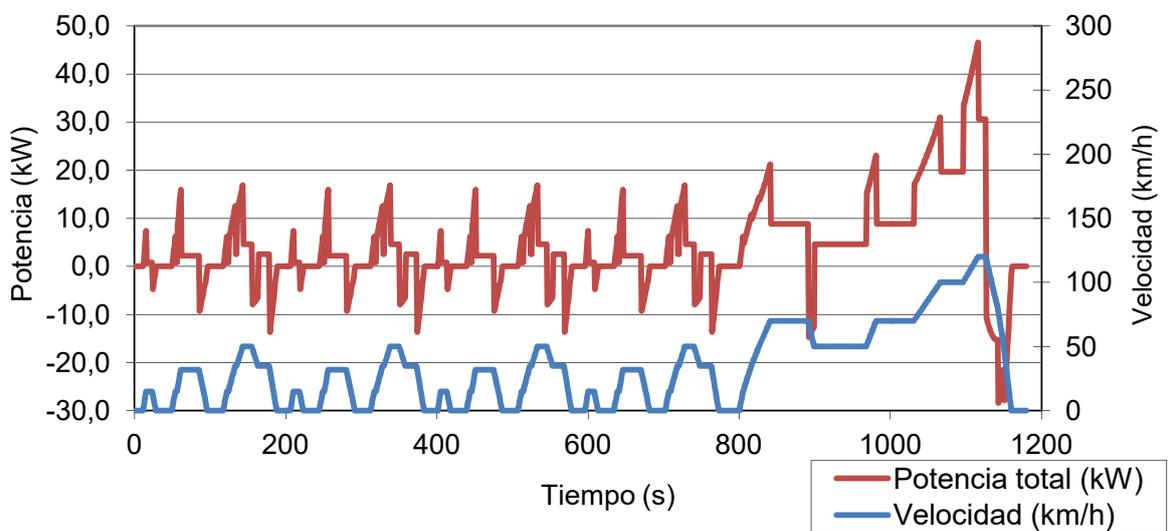
Disponemos de todos los datos necesarios para calcular la potencia en cada instante del ciclo utilizando la tabla Excel. De este modo podemos obtener las siguientes gráficas tanto para ciclo urbano como interurbano (Gráficas 2 y 3).

Potencia en el ciclo urbano



Gráfica 2: Potencia instantánea demandada en el ciclo urbano

Potencia en el ciclo NEDC



Gráfica 3: Potencia instantánea demandada en el ciclo NEDC

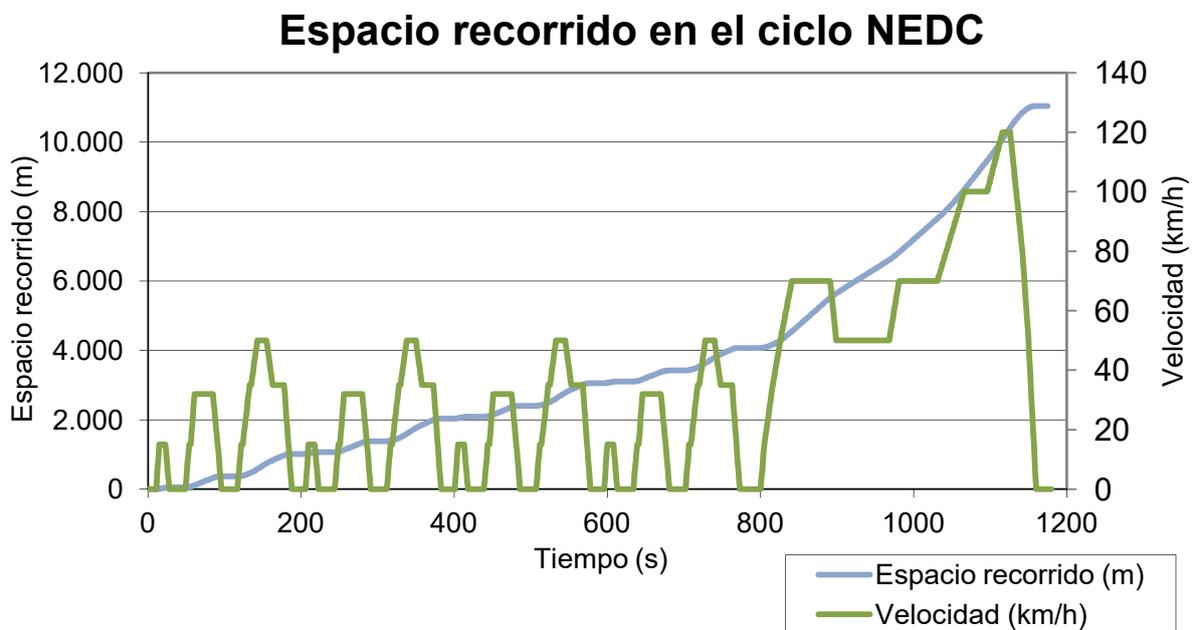
Observando las gráficas aparece algo llamativo, existen potencias negativas, esto ocurre en las partes de frenado del ciclo. Esta potencia será empleada por el sistema de recuperación de energía de frenado para cargar la batería eléctrica.

Por otro lado para cálculos que se realizaran más adelante se debe observar en la gráfica el punto de máxima potencia que en concreto es **46,56 kW**.

4.3. Cálculo de la energía consumida en el ciclo NEDC

El objetivo de cara a los cálculos posteriores es calcular la energía en rueda por unidad de distancia, para ello se utiliza la energía consumida en el ciclo NEDC entre la distancia recorrida en el ciclo.

La distancia recorrida se puede observar en el Gráfico 4:



Gráfica 4: Espacio recorrido en el ciclo NEDC

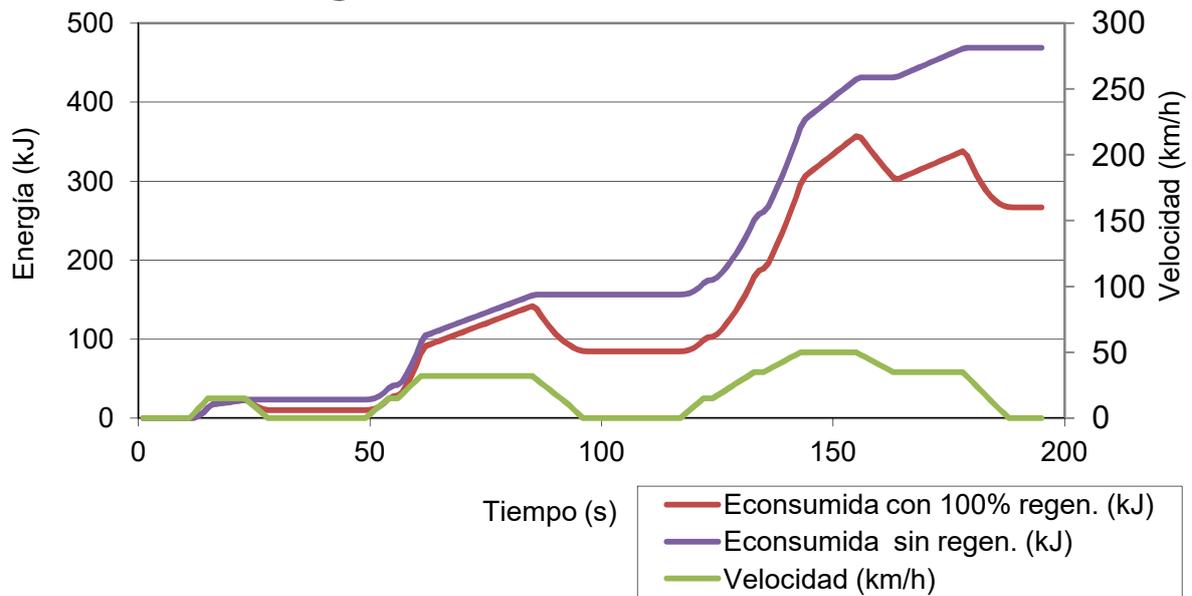
En la gráfica se puede obtener la distancia recorrida que es de **11041,4 m**.

El ciclo NEDC no solo proporciona la potencia en cada instante sino también la energía que consumirá el vehículo a lo largo del ciclo. Para ello debemos integrar la expresión de la potencia respecto al tiempo:

$$E = \int_0^t P \cdot dt$$

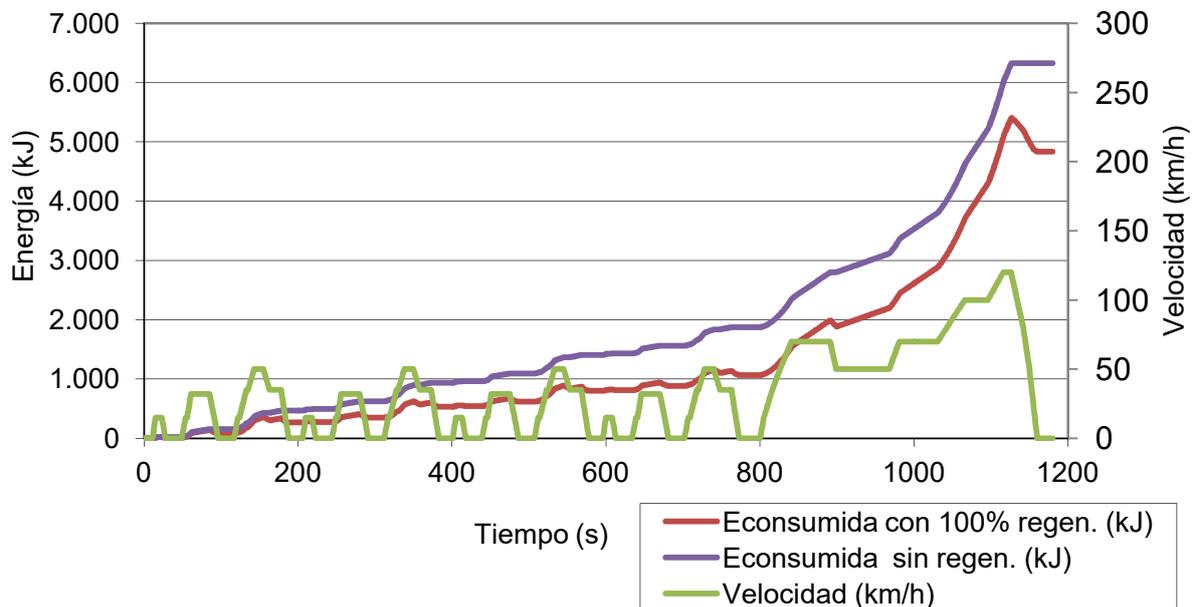
Esta expresión corresponde al área bajo la curva de la gráfica de la potencia que nos dará el sumatorio de la energía consumida por el vehículo (Gráficas 5 y 6).

Energía consumida en el ciclo urbano



Gráfica 5: Energía consumida en el ciclo urbano

Energía consumida en el ciclo NEDC



Gráfica 6: Energía consumida en el ciclo NEDC

Se puede observar en las gráficas anteriores una distinción entre la energía consumida con regeneración y sin regeneración que será útil para conocer el ahorro que supone la incorporación del sistema de recuperación de energía en la frenada.

Para los cálculos que se realizarán más adelante debemos observar en la gráfica la energía total consumida con regeneración que es de **4837,73 kJ**.

Con todos los datos obtenidos se está en disposición de calcular la energía que consume el vehículo por unidad de longitud:

$$\left(\frac{E}{L}\right)_v = \frac{4837,73 \text{ kJ}}{11041,4 \text{ m}} \cdot \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \cdot \frac{1 \text{ kW} \cdot \text{s}}{1 \text{ kJ}} \cdot \frac{1000 \text{ W}}{1 \text{ kW}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 121,71 \text{ Wh/km}$$

$$\text{Energía en rueda por unidad de longitud} = \left(\frac{E}{L}\right)_v = 121,71 \text{ Wh/km}$$

4.4. Sistema de gestión y conversión de energía

Como se ha descrito anteriormente, en el nuevo sistema a implantar la energía recibida por el motor eléctrico proviene bien de la pila de combustible y/o bien de la batería eléctrica. Para ello es necesario un sistema capaz de controlar la demanda de energía del vehículo durante la conducción.

El **sistema de gestión y conversión de energía** que se plantea posee una estructura similar a la que aparece en la Figura 19. Se trata de un circuito eléctrico (bus de continua) encargado de transportar la corriente eléctrica entre los distintos elementos que forman el sistema, junto a un bus de gestión y control que envía las órdenes del sistema de gestión a los distintos convertidores.

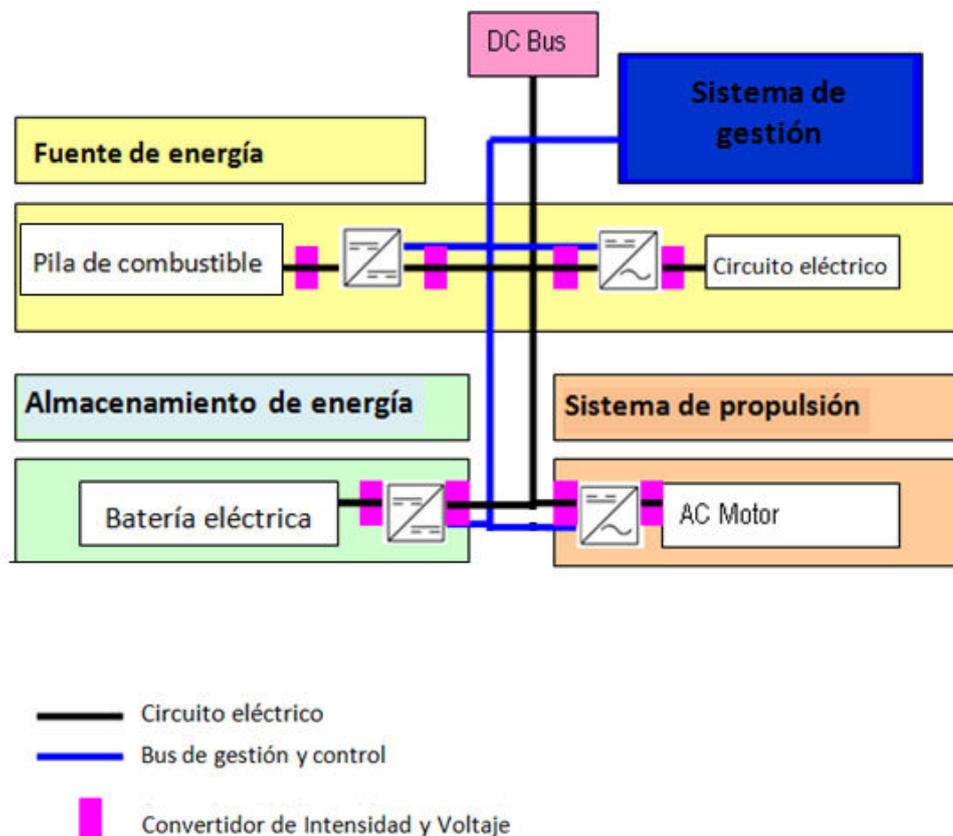


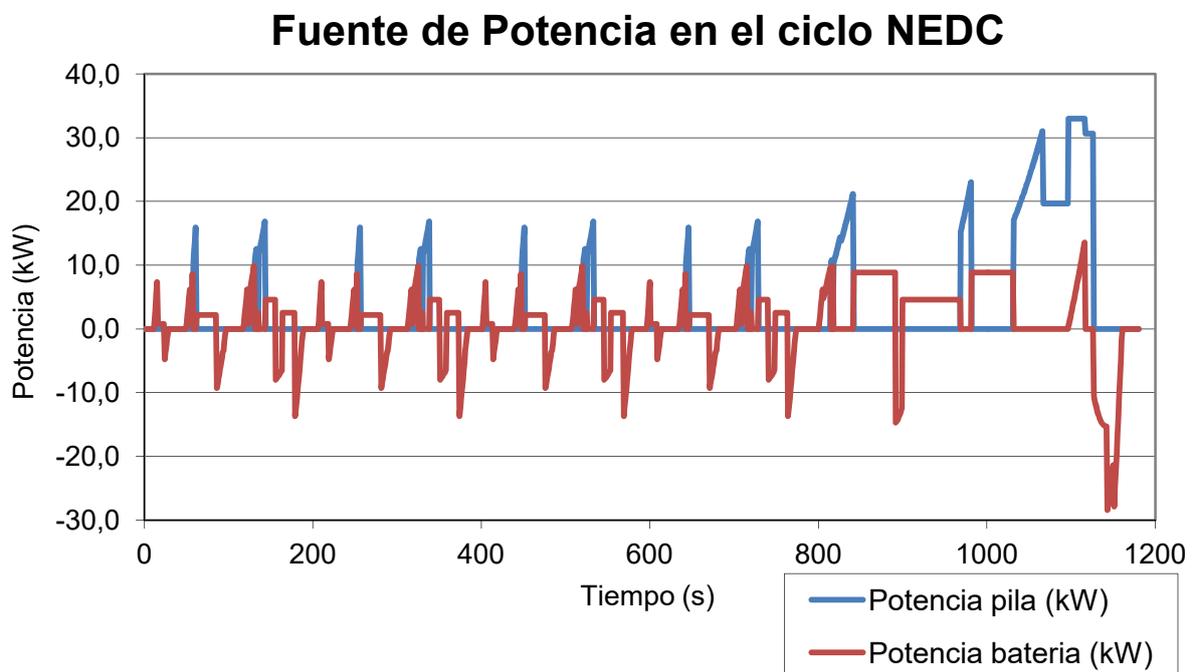
Figura 19: Esquema del sistema de gestión y conversión de energía

Por tanto el sistema de gestión debe partir de una serie de premisas o estrategias, a través de las cuales es capaz de actuar sobre cada uno de los elementos del sistema y satisfacer la demanda de potencia y energía del vehículo, combinando el funcionamiento de la pila de combustible, la batería y el motor eléctrico, que en durante el frenado regenerativo actúa como generador.

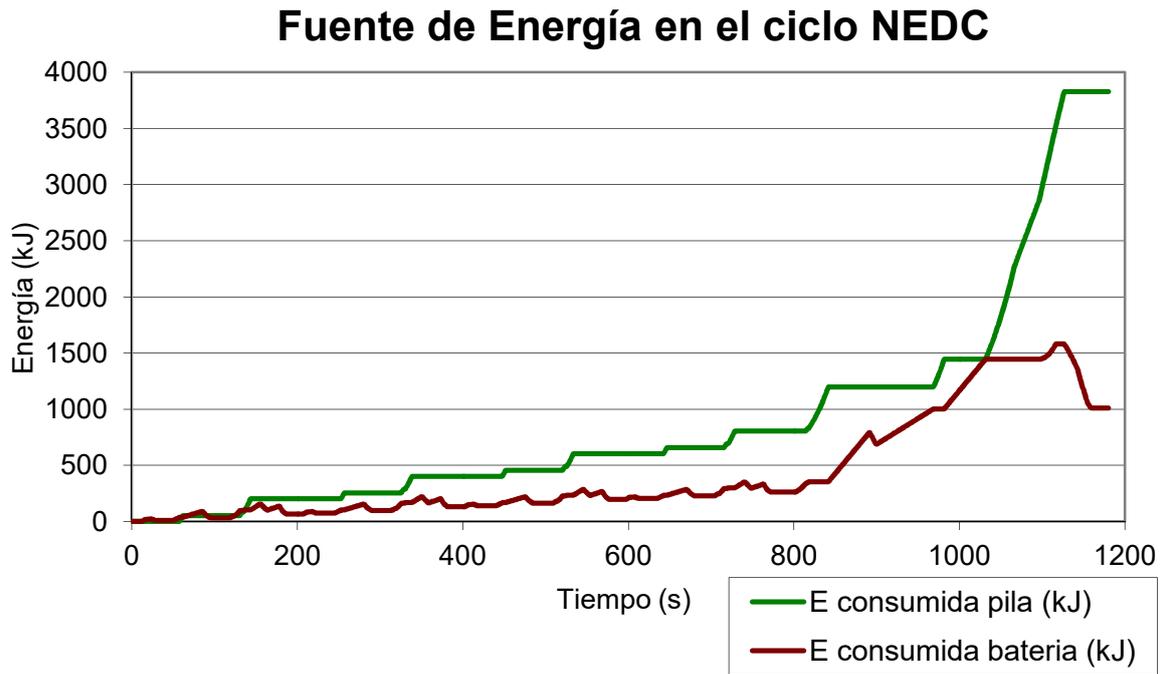
Las premisas que se han contemplado son las siguientes:

- Si la potencia demandada es menor de 10 kW, la proporcionará la batería eléctrica y si es mayor de 10 kW arrancará la pila de combustible.
- Si la batería se encuentra a menos del 25% de su carga nominal arrancará la pila de combustible para aumentar su nivel de carga.
- La energía de la pila no demandada por el motor eléctrico será utilizada para cargar la batería eléctrica.
- El sistema de recuperación de energía en la frenada cargará la batería eléctrica.

Con todas estas premisas se puede elaborar una serie de gráficas que ofrecerán el origen tanto de la potencia como de la energía durante el ciclo NEDC (Gráficas 8 y 9). Estos datos se utilizarán más adelante para el dimensionamiento de la pila de combustible y la batería eléctrica.



Gráfica 7: Fuente de potencia en el ciclo NEDC



Gráfica 8: Fuente de energía en el ciclo NEDC



Universidad de Valladolid

Escuela de Ingenierías Industriales

Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

5. Cálculo y dimensionamiento del nuevo sistema de propulsión

5. CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DEL NUEVO SISTEMA DE PROPULSIÓN

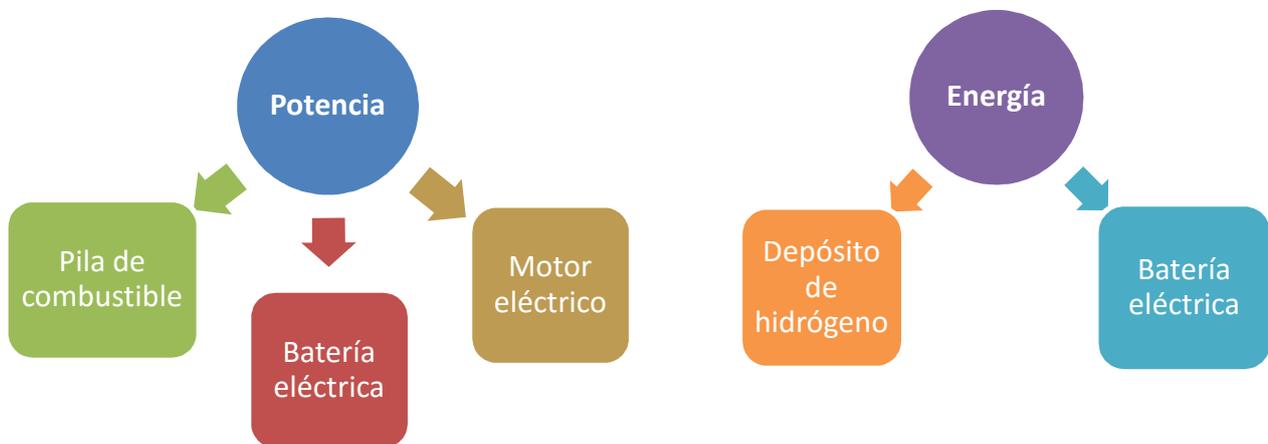
En este punto se aborda el cálculo y dimensionamiento de cada uno de los elementos que forman parte del nuevo sistema de propulsión del vehículo.

En este proceso se combinan los datos de potencia y energía obtenidos en las especificaciones del vehículo a través del ciclo NEDC, con los datos de la ficha técnica como son las dimensiones del vehículo y la condición de que la masa de los nuevos elementos sea similar a la de los elementos retirados del vehículo base.

Se trata por tanto de un proceso iterativo con múltiples alternativas posibles, por lo que cuenta con una cierta dificultad.

La forma en la que se lleva a cabo este proceso de cálculo y dimensionamiento es el siguiente (Figura 20):

- Se realiza un dimensionamiento y elección iniciales de los elementos de potencia.
- Se procede al cálculo y dimensionamiento de los elementos de energía teniendo en cuenta los datos de masa.
- Se realiza un análisis de masas comparando el peso del vehículo base frente a la alternativa propuesta para conocer si hay sobrepeso y si éste es admisible.



$$\text{Peso Neto (Vehículo Diésel)} \approx \text{Peso Neto (Vehículo Hidrógeno)}$$

Figura 20: Esquema de cálculo y dimensionamiento

5.1. Cálculo y dimensionamiento de elementos suministradores de potencia

Como se ha descrito anteriormente con los datos de la potencia necesaria se procede a calcular y dimensionar los elementos siguientes (Figura 21):

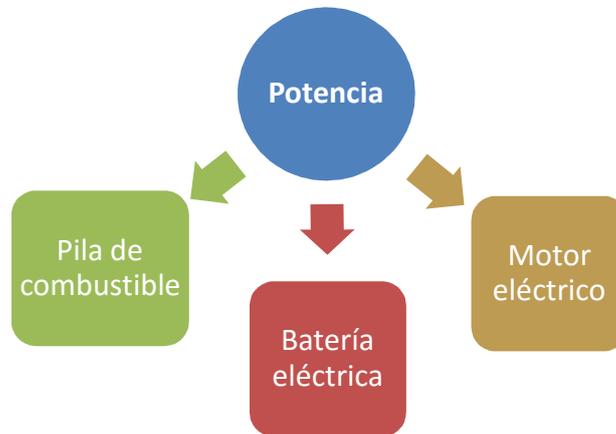


Figura 21: Esquema de elementos suministradores de potencia

Para dimensionar los elementos de potencia se tiene en cuenta que la potencia nominal que debe suministrar el motor eléctrico es la suma de la potencia que suministra la pila de combustible más la de la batería eléctrica.

La idea es no sobredimensionar la pila de combustible de modo que ésta sea capaz de suministrar la potencia necesaria en condiciones de carga por debajo de 33 kW, que como se ha observado en el ciclo NEDC es la mayor parte del tiempo de funcionamiento. Para condiciones de carga elevada se emplea la combinación de ambas fuentes de potencia (pila + batería) para poder ofrecer una potencia elevada.

Siguiendo estas pautas de funcionamiento la potencia nominal del motor eléctrico debe dimensionarse tal que sea aproximadamente la suma de la potencia nominal de la pila de combustible más la potencia que ofrece la batería eléctrica:

$$P_n \text{ motor eléctrico} \approx P_n \text{ pila de combustible} + P_n \text{ batería eléctrica}$$

5.1.1. Cálculo y dimensionamiento del motor eléctrico

La primera parte que se debe dimensionar es el motor eléctrico ya que la potencia de los demás elementos depende de él.

Para el cálculo de la potencia nominal óptima del motor eléctrico se debe atender a la potencia máxima calculada durante el ciclo NEDC que es de **46,56 kW**. Recordemos que esta potencia es la máxima de ciclo de conducción, pero se debe tener en cuenta que es una simulación de un ciclo de conducción estándar por tanto se debe tomar este dato como orientativo.

Por otro lado el objetivo del trabajo es ofrecer una alternativa al vehículo base procurando mantener en la medida de lo posible las prestaciones que ofrece el diseño comercial del vehículo. Por tanto hay que tener en cuenta la potencia nominal del vehículo base que recordemos es de **66 kW**.

Teniendo en cuenta estas condiciones se plantea la idea de elegir un motor eléctrico fabricado por la propia marca “Renault” que usa para sus vehículos eléctricos en concreto en el “Renault Zoe”.

Se disponen de tres alternativas: 44kW, 65kW, 70kW.

Atendiendo a las condiciones marcadas anteriormente se opta por la instalación del motor más similar en cuanto a potencia nominal con el del vehículo base, por tanto se ha optado por el de **65 kW**.

A continuación se recoge la ficha técnica del motor elegido con sus alternativas (Figura 22). En el Anexo III se adjunta la ficha técnica completa.

	5A 44	5A 70	5A 65
Max. Power kW (HP)	44 (60)	70 (90)	65(84)
Speed at max Power (RPM)	3000 to 9000		
Max. torque, Nm (lbf.ft)	226 (222)		
Speed at max torque (RPM)	0 to 9000		
Reducer ratio	9, 32		
Dry Weight (kg)	140		
Engine Cooling System	YES		
Battery Cooling System	YES		
Clutch system	No		
Vacuum pump	Electrical pump		
Air Cond Compressor	electrical pump		
Electric Interface to Vehicle	CAN Bus		

Figura 22: Ficha técnica del motor eléctrico Renault

5.1.2. Cálculo y dimensionamiento de la pila de combustible

En este punto se plantea la elección del equipo que proporcionará la potencia al motor eléctrico del vehículo obtenida mediante el hidrógeno.

La elección de la pila de combustible es un paso importante en el diseño debido al coste que supone, sus dimensiones y su peso. En cuanto a su funcionamiento se pretende aprovechar al máximo sus prestaciones de modo que funcione con niveles de carga altos.

Se plantea la opción de dimensionar la pila con la mitad de la potencia nominal del motor eléctrico. De este modo y atendiendo a la gráfica de potencia en el ciclo NEDC se puede garantizar que se cubre la mayor parte de la potencia requerida durante la conducción.

Se procede por tanto a la elección de una pila de combustible alimentada por hidrógeno de **33 kW** de potencia nominal.

Se ha optado por la marca “**Hydrogenics**”, en la Figura 23 se muestra la ficha técnica del modelo elegido. En el Anexo IV se adjunta la ficha técnica completa.

Technical Data	
Rated Electrical Power	33 kW continuous
Operating Current	0 to 500 A _{DC}
Operating Voltage	60 to 120 V _{DC}
Peak Efficiency	55% ¹⁾
Response	< 5 s from off to idle < 3 s from idle to rated power
Fuel	Dry Hydrogen >99.98%
Oxidant	Ambient Air
Coolant	De-ionized water (DI H ₂ O) or 60% ethylene glycol / DI H ₂ O
Ambient Temperature	-10 to +55°C operating -40 to +65°C storage (<2°C with automated freeze shutdown feature)
Communication	CAN v2.0A (standard 11 bit)
¹⁾ Efficiency based on LHV of H ₂ , 25°C, 101.3 kPa, including onboard parasitic loads, excluding radiator fan and water pump	
Physical	
Dimensions L x W x H ²⁾	605 x 410 x 265 mm
Mass ³⁾	61 kg
Volume ³⁾	66 L
²⁾ Excluding air delivery and optional water pump	
³⁾ Including air delivery and optional water pump	

Figura 23: Ficha técnica de la pila de combustible Hydrogenics HD 30

5.1.3. Cálculo y dimensionamiento de la batería eléctrica (Potencia)

El dimensionamiento de la batería eléctrica tiene la dificultad añadida de formar parte de los elementos que aportan tanto potencia como energía.

En este punto se realizará una primera aproximación de la potencia que debe suministrar este elemento para realizar el cálculo y dimensionamiento de la batería eléctrica en el apartado destinado al “cálculo y dimensionamiento de elementos suministradores de energía”.

La potencia nominal del motor eléctrico, como se ha descrito anteriormente, debe dimensionarse tal que sea aproximadamente la suma de la potencia nominal de la pila de combustible más la potencia que ofrece la batería eléctrica:

$$P_n \text{ motor eléctrico} \approx P_n \text{ pila de combustible} + P_n \text{ batería eléctrica}$$

Dimensionado tanto el motor eléctrico como la pila de combustible, se puede concluir que la potencia nominal que debe proporcionar la batería eléctrica puede ser calculada como se muestra a continuación:

$$P_n \text{ batería eléctrica} \approx P_n \text{ motor eléctrico} - P_n \text{ pila de combustible}$$

$$P_n \text{ batería eléctrica} \approx 65 \text{ kW} - 33 \text{ kW}$$

$$\mathbf{P_n \text{ batería eléctrica} \approx 32 \text{ kW}}$$

Este dato da una aproximación de la potencia que debe suministrar la batería eléctrica para que el motor eléctrico pueda trabajar en su punto de potencia nominal.

Tanto cálculo y dimensionamiento de la batería eléctrica como su elección dependerá tanto de la potencia nominal como de la energía que es capaz de almacenar como se detallará más adelante.

5.2. Cálculo y dimensionamiento de elementos suministradores de energía

En este apartado se utilizarán los valores de energía obtenidos a través del ciclo NEDC para el cálculo y dimensionamiento de los elementos que albergarán la energía necesaria para el vehículo (Figura 24):

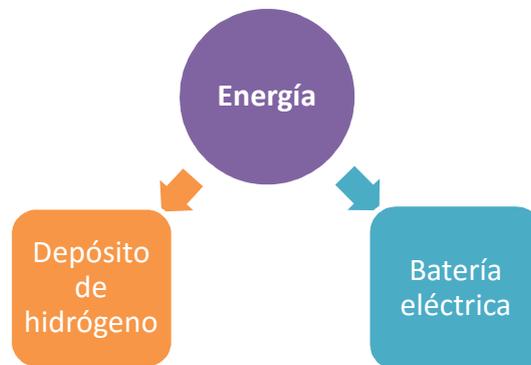


Figura 24: Esquema de los elementos suministradores de energía

Para dimensionar estos elementos en primer lugar se emplearán los datos de energía en rueda obtenidos del ciclo NEDC para calcular el consumo en términos de hidrógeno que tendrá el vehículo.

Posteriormente se efectuará el cálculo y dimensionamiento del depósito de hidrógeno y de la batería eléctrica.

5.2.1. Cálculo y dimensionamiento del depósito de hidrógeno

Uno de los puntos críticos de un vehículo alimentado por hidrógeno es el cálculo y dimensionamiento óptimo de su depósito de hidrógeno.

En los modelos actuales propulsados por un motor de combustión interna alternativo la colocación del depósito no es un factor crítico en su configuración ya que al tratarse de un combustible en estado líquido el depósito puede diseñarse y adaptarse a la forma más óptima para su posterior colocación dentro vehículo.

Las diferencias que genera el almacenaje de un combustible en fase gaseosa y a una alta presión conduce a una serie de dificultades técnicas a las que se debe dar solución.

Se deberá analizar los siguientes puntos para el cálculo y dimensionamiento del depósito de hidrógeno:

- Relación masa-volumen del H_2
- Forma óptima del depósito
- Adecuación de un espacio dentro del vehículo base para alojar el depósito
- Consumo del vehículo ($kg H_2/100 km$)
- Cálculo del material y resistencia del depósito
- Peso del depósito de hidrógeno

5.2.1.1. Relación masa-volumen del H₂

La relación masa-volumen del hidrógeno dentro del depósito es un dato importante que permitirá conocer las dimensiones del mismo y su posterior colocación dentro del vehículo.

El hidrógeno a alta presión no se comporta como gas ideal sino que aparece un factor de compresibilidad que hace que la presión no sea proporcional al volumen.

$$Z = \frac{\rho_{ideal}}{\rho_{real}}$$

$$\rho_{real} = \frac{\rho_{ideal}}{Z}$$

Para conocer la densidad ideal (ρ_{ideal}) se empleará la ecuación de los gases ideales:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$P \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

$$\rho_{ideal} = \frac{P \cdot M}{R \cdot T}$$

ρ_{ideal} → Densidad ideal (kg/m³)

P → Presión (Pa)

M → Masa molar del H₂ (2,016·10⁻³ kg/mol)

R → Constante universal de los gases ideales (8,314 Pa·m³/mol·K)

T → Temperatura ambiente (°K). Se considera 25°C que equivale a 298°K

En este punto se debe tomar una de las primeras decisiones importantes del diseño del depósito de H₂ se trata de elegir la presión del gas. Los modelos actuales de depósito de almacenamiento de H₂ para vehículos suelen disponer de dos presiones estándar de almacenamiento: **350 bar o 700 bar**. Como se ha comentado anteriormente el H₂ a alta presión no sigue el comportamiento de un gas ideal y por tanto el hecho de almacenar el combustible al doble de presión no implica el almacenamiento del doble de masa de combustible, sin embargo se ha optado por la presión de **700 bar** debido a la limitación de espacio para la colocación del depósito, punto que será tratado más adelante.

$$\rho_{ideal} = \frac{700 \text{ bar} \cdot \frac{10^5 \text{ Pa}}{1 \text{ bar}} \cdot 2,016 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}{8,314 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 298 \text{ K}} = 56,96 \text{ kg/m}^3$$

En estas condiciones el hidrógeno no se comporta como gas ideal por lo que se debe tener en cuenta el factor de compresibilidad (Z). Para el caso del hidrógeno a 700 bar este factor es igual a 1,49.

$$\rho_{real} = \frac{\rho_{ideal}}{Z}$$

$$\rho_{real} = \frac{56,96 \text{ kg/m}^3}{1,49} = 38,23 \text{ kg/m}^3$$

Interesa conocer el volumen específico ya que será más cómodo de utilizar en adelante

$$v_{real} = \frac{1}{38,23 \text{ kg/m}^3} = 0,02616 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Analizando el resultado anterior:

$$1 \text{ kg H}_2 \rightarrow 0,02616 \text{ m}^3 \rightarrow 26,16 \text{ l}$$

Necesitamos 26,16 litros para disponer de 1 kg de H_2 a 700 bar.

Este dato hace presente la importancia del volumen del depósito de hidrógeno en el diseño del vehículo.

5.2.1.2. Forma óptima del depósito

Debido a la alta presión que debe soportar el depósito se debe diseñar con una forma capaz de soportar dicha presión y conseguir que el gradiente de presiones en su interior sea nulo lo que significa que la presión sea constante en todo punto del depósito para evitar puntos de sobreesfuerzos. La forma óptima es la de un cilindro con extremos semiesféricos como el que aparece en la Figura 25.



Figura 25: Depósito de hidrógeno Toyota

Se debe tener en cuenta tanto el volumen y dimensiones exteriores para su colocación en el vehículo base, como el volumen interior que será el volumen de combustible que será capaz de almacenar el depósito (Figura 26). Para la obtención del volumen interior se calculará el espesor del depósito que se considerará constante.

$$V_{total} = V_{cilindro} + V_{esfera}$$

$$V_{exterior} = \pi \cdot r^2 \cdot h + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

$$V_{interior} = \pi \cdot (r - e)^2 \cdot (h - 2r) + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (r - e)^3$$

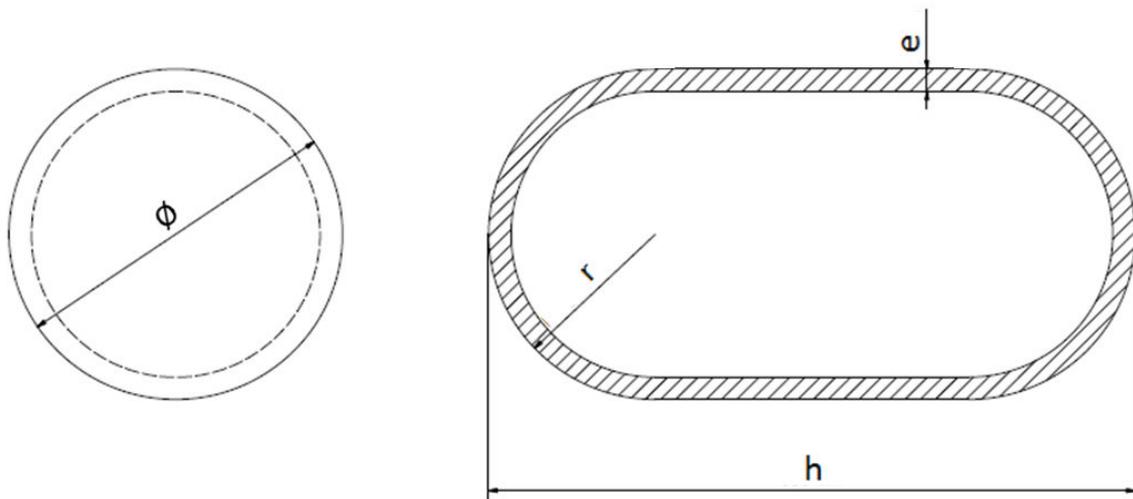


Figura 26: Forma óptima del depósito de hidrógeno

5.2.1.3. Adecuación de un espacio dentro del vehículo base para alojar el depósito

Para elegir el espacio adecuado para la colocación del depósito se emplearán las dimensiones del vehículo base obtenidas a través de su ficha comercial (Figura 27):



Figura 27: Dimensiones Renault Captur

Como se ha descrito en el apartado anterior, la forma que tendrá el depósito es de un cilindro con extremos semiesféricos, por tanto se deberá obtener las medidas máximas de longitud y diámetro del depósito de modo que pueda ser colocado en el lugar habilitado dentro del vehículo.

Atendiendo a la estructura del vehículo base, la facilidad para las recargas y la observación de otros prototipos similares alimentados con hidrógeno se ha decidido que el lugar más adecuado para la colocación del tanque de hidrógeno sea la parte interior del maletero, justo detrás de los asientos traseros del vehículo.

Una vez decidido el lugar adecuado y atendiendo a las dimensiones del automóvil, se plantea que las dimensiones máximas del depósito vendrán dadas por las medidas llamadas **Y2 = 990mm** y **Z3 = 595mm** que hacen referencia a la longitud y diámetro máximos respectivamente.

$$l_{m\acute{a}x} = 990 \text{ mm} \quad \phi_{m\acute{a}x} = 595 \text{ mm}$$

5.2.1.4. Cálculo del material y resistencia del depósito

Conociendo las dimensiones exteriores máximas cabe en este punto detallar la elección del material y el cálculo del espesor que tendrá el depósito y que debe soportar la presión interior del mismo.

Atendiendo al diseño de los depósitos que se fabrican actualmente para albergar hidrógeno a alta presión y a su buena resistencia con un ligero peso se ha decidido construir el depósito en aluminio.

Una vez hecha esta elección se acude a la resistencia de materiales para calcular el espesor de material necesario. En el caso que ocupa se trata de un cilindro con extremos semiesféricos por tanto debemos aplicar los conceptos de resistencia de materiales (Figura 28) obteniendo la siguiente expresión:

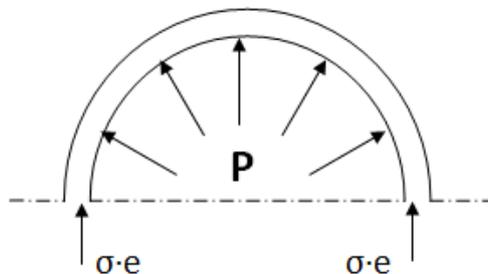


Figura 28: Esquema de fuerzas de presión en el interior del depósito

$$P_{int} \cdot \phi_{int} \cdot L = 2 \cdot e \cdot L \cdot \sigma_{Al}$$

$$\text{Si consideramos que: } \phi_{int} = \phi_{ext} - 2 \cdot e$$

$$P_{int} \cdot (\phi_{ext} - 2 \cdot e) = 2 \cdot e \cdot \sigma_{Al}$$

$$\text{Se considera: } \sigma_{Al} = 450 \text{ MPa}$$

$$e = \frac{P_{int} \cdot \phi_{ext}}{2 \cdot (\sigma_{Al} + P_{int})}$$

El resultado obtenido de espesor se incrementará para tener un coeficiente de seguridad que garantice la resistencia del depósito.

5.2.1.5. Consumo del vehículo (kg H₂/100 km)

En este apartado se procederá al cálculo del consumo que tendrá el vehículo con el nuevo sistema de motorización. Cabe destacar que en los vehículos con motores diésel y gasolina hablamos de unidades de litros de combustible consumidos en 100 kilómetros, en el caso de hidrógeno resulta impreciso hablar de volumen de combustible ya que este depende de la presión, por tanto el consumo de un vehículo de hidrógeno será indicado como la masa de combustible consumida a los 100 kilómetros (kg H₂/100km).

Para su cálculo se parte de la energía en rueda obtenida en el ciclo NEDC y se obtendrá la masa de hidrógeno para recorrer 100 kilómetros.

$$\left(\frac{E}{L}\right)_v = 121,71 \text{ Wh/km}$$

$$\left(\frac{E}{L}\right)_{H_2} = \left(\frac{E}{L}\right)_v \cdot \frac{1}{\eta_{pila} \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_{convertidor}}$$

Debemos dar valores a los términos de rendimiento tanto de la pila de combustible como del motor eléctrico. Se ha optado por considerar unos valores típicos de rendimiento de estos componentes que serán:

$$\eta_{pila} = 0,55 \qquad \eta_{motor} = 0,95 \qquad \eta_{convertidor} = 0,95$$

Continuando con los cálculos:

$$\left(\frac{E}{L}\right)_{H_2} = 121,71 \frac{\text{Wh}}{\text{km}} \cdot \frac{1}{0,55 \cdot 0,95 \cdot 0,95} = 245,2 \text{ Wh/km}$$

$$\left(\frac{m}{L}\right)_{H_2} = 245,2 \frac{\text{Wh}}{\text{km}} \cdot \frac{1 \text{ kg } H_2}{120000 \text{ kJ}} \cdot \frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ W} \cdot \text{s}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \cdot 100 \text{ km}$$

$$\text{Consumo de } H_2 = \left(\frac{m}{L}\right)_{H_2} = 0,7356 \text{ kg } H_2/100\text{km}$$

*En este punto podemos realizar un cálculo simple de la masa necesaria para conseguir la autonomía con la que actualmente cuenta el vehículo base que es de 1216 km con el depósito lleno.

$$m_{H_2} = \frac{0,7356 \text{ kg } H_2}{100 \text{ km}} \cdot 1216 \text{ km} = 8,945 \text{ kg } H_2$$

La masa necesaria es casi de 9 kg de H₂, más adelante se verá si es posible albergar tal cantidad de hidrógeno y cómo afectará a la autonomía del vehículo.

5.2.1.6. *Peso del depósito de hidrógeno*

La masa de este elemento es una de las características críticas, un depósito de grandes dimensiones implica un alto peso para el vehículo, como se mostrará más adelante será necesario llegar a un compromiso entre autonomía y peso.

Para calcular la masa total del depósito de hidrógeno se procederá del siguiente modo:

$$m_{total\ depósito} = m_{depósito} + m_{H_2}$$

La masa de combustible será igual a:

$$m_{H_2} = V_{interior} \cdot \rho_{H_2\ a\ 700bar}$$

$$\rho_{H_2\ a\ 700bar} = 38,23\ kg/m^3 \quad (*\text{Apartado 5.2.1.1 Relación masa-volumen del } H_2)$$

La masa del depósito en este caso no es despreciable y se calculará como:

$$m_{depósito} = (V_{exterior} - V_{interior}) \cdot \rho_{aluminio}$$

Se considera que: $\rho_{aluminio} = 2700\ kg/m^3$

5.2.1.7. *Resumen de los datos del depósito de combustible*

Una vez planteado el cálculo de cada una de las variables que entran en juego para el cálculo del depósito, se puede comprobar que existen una serie de restricciones dentro de las cuales es necesario llegar a un compromiso entre autonomía y peso (Figura 29).

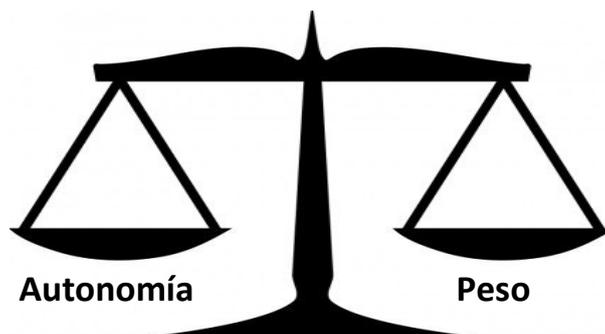


Figura 29: Autonomía vs Peso

Como se comprobará más adelante en el apartado de “Análisis de masas” va a existir un sobrepeso de los elementos del motor de hidrógeno sobre los del motor diésel que reducirá la carga máxima que puede transportar el vehículo. Este sobrepeso proviene en gran medida del depósito de hidrógeno por tanto se intentará dimensionar con una capacidad que asegure una buena autonomía con un peso que no sea excesivo.

La solución a la que se ha llegado ha sido la de **dimensionar el depósito** para que sea capaz de albergar **unos 4 kg de H₂**, correspondientes a una autonomía de 545 km, como se detalla a continuación. En la Tabla 8 se muestra un resumen de las dimensiones, pesos y autonomía del depósito que se instalará en el vehículo.

DIMENSIONES				
	h total (mm)	h cilindro (mm)	Radio (mm)	Espesor (e) (mm)
Exterior	950	460	245	33
Interior	884	460	212	

CAPACIDAD		
	Volumen (l)	Volumen (m3)
Exterior	148	0,148
Interior	105	0,105

PESO Y AUTONOMÍA		
	Masa (kg)	Autonomía (km)
Depósito	117,4	
Combustible	4,0	545,0
Total	121,4	545,0

Tabla 9: Tabla resumen de características del depósito de hidrógeno

Con estos datos se ha realizado un diseño en CAD del depósito de hidrógeno obteniendo su plano (Figura 30) y su vista en 3D (Figura 31).

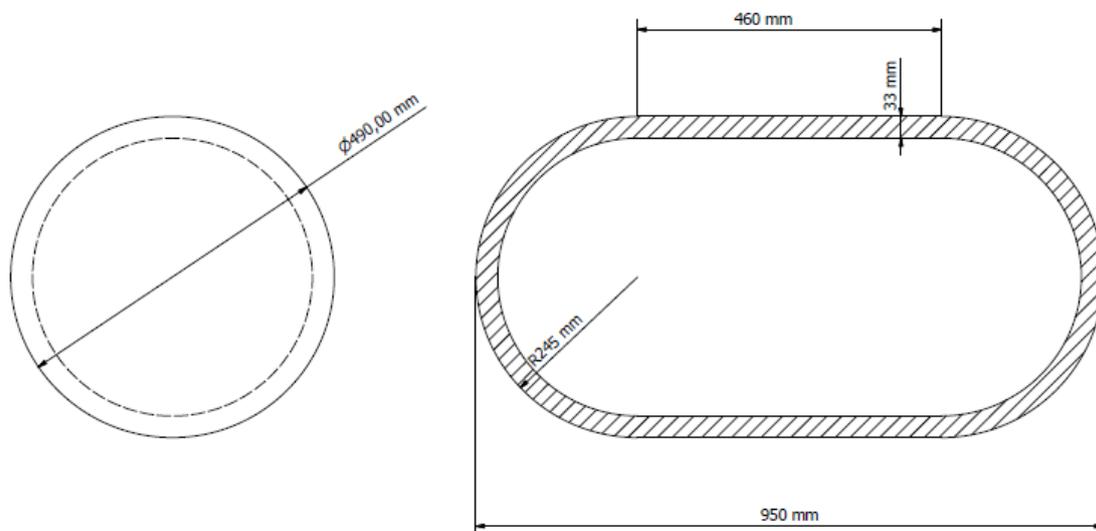


Figura 30: Plano depósito de hidrógeno



Figura 31: Vista 3D depósito de hidrógeno

5.2.2. Cálculo y dimensionamiento de la batería eléctrica (Energía)

Llegados a este punto se está en disposición de calcular y dimensionar la batería eléctrica. Al tratarse de un elemento que proporciona tanto potencia como energía se debe dimensionar atendiendo a ambas variables.

La potencia de la batería eléctrica fue calculada anteriormente:

$$P_{n \text{ batería eléctrica}} \approx 32 \text{ kW}$$

En cuanto a la energía necesaria debemos acudir a las gráficas de funcionamiento donde se ha estimado la energía que proporciona la batería durante el ciclo NEDC:

$$E_{\text{batería eléctrica}} \approx 1 \text{ kWh}$$

Estos valores muestran la necesidad de una batería de alta potencia y baja capacidad de energía, esto obliga a elegir una tecnología capaz de ofrecer estas características.

A continuación en la Figura 32 se muestra la relación de las distintas tecnologías con las capacidades tanto de potencia específica como de energía específica de las baterías eléctricas:

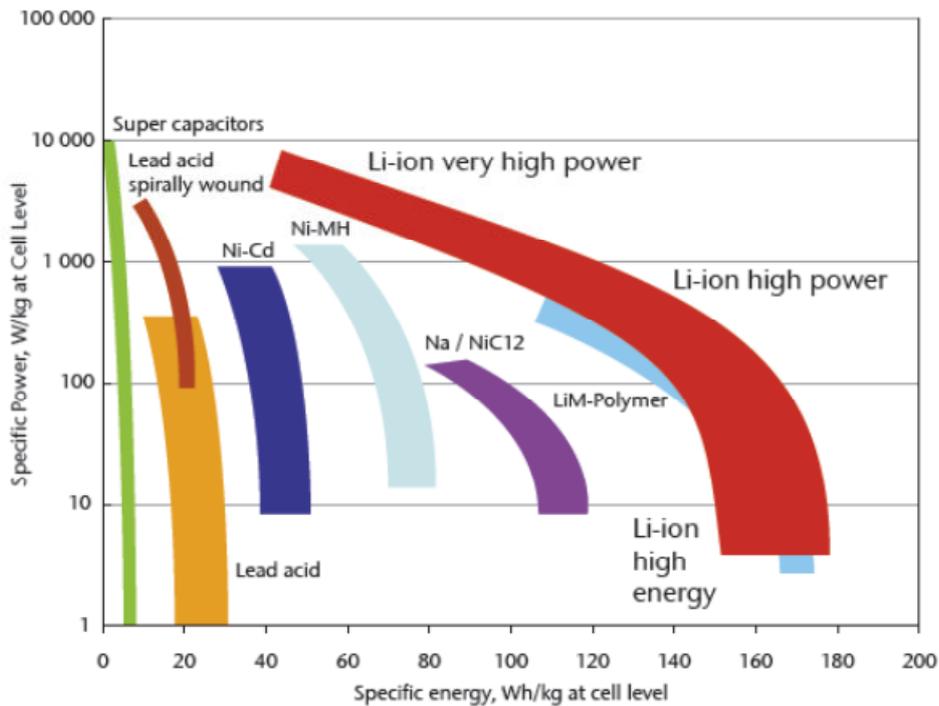


Figura 32: Comparativa de distintas tecnologías de baterías eléctricas

Con los valores que se disponen, es necesaria una tecnología con una potencia efectiva alta y una energía efectiva baja. Se ha optado por la tecnología basada en Ni-MH (Níquel-Metal Hidruro) ya que se adecúa a las restricciones marcadas.

En concreto se ha decidido la implantación de un modelo comercial de la marca SAFT cuya ficha técnica se recoge en la Figura 33. En el Anexo V se adjunta la ficha técnica completa.

High power modules	NHP 10-340	NHP 5-680
Electrical characteristics		
Nominal voltage [V]	12	6
Rated capacity at C/3, after charge at constant current [Ah]	34	68
Power density [W/l]	970	970
Specific power [W/kg]	520	520
Energy density [Wh/l]	91	91
Specific energy [Wh/kg]	50	50
Dimensions		
Height (mm)	165	165
Length (mm)	165	165
Width (mm)	168	168
Weight (kg)	8.7	8.7
Discharge characteristics at +20°C to +25°C (+68°F to +77°F)		
Typical power at 80% DOD during 30 sec [W]	4500	4500
Maximum discharge current for 5 min [A]	200	400
Maximum discharge peak current for 30 sec* [A]	350	700
Maximum discharge peak current for 10 sec* [A]	500	1 000
Maximum discharge peak current for 2 sec* [A]	750	1 500
* final discharge voltage 0.8 V/cell		

Figura 33: Ficha técnica de batería eléctrica

Las características de la batería eléctrica elegida en cuanto a potencia específica y energía específica son:

$$P_e = 520 \text{ W/kg} \qquad E_e = 50 \text{ Wh/kg}$$

Con estos datos se obtendrá la masa de la batería:

$$m = \frac{P_n}{P_e} = \frac{32000 \text{ W}}{520 \text{ W/kg}} = 61,54 \text{ kg}$$

$$m = \frac{E_n}{E_e} = \frac{1000 \text{ Wh}}{50 \text{ Wh/kg}} = 20 \text{ kg}$$

Como se puede ver es más restrictiva la condición de la potencia por lo que se debe optar por disminuir la potencia o sobredimensionar la energía.

La disminución de la potencia de la batería afectaría a la potencia nominal del sistema ya que el motor eléctrico no podría recibir los 65 kW, por lo tanto se tendrá que sobredimensionar la energía de la batería.

$$E_n = E_e \cdot m = 50 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}} \cdot 61,54 \text{ kg} = 3077 \text{ Wh} \approx 3 \text{ kWh}$$

5.3. Comparación entre las masas del vehículo base y el propuesto

En el diseño que se va a llevar a cabo se procederá a la retirada de los elementos que conforman el motor de combustión de diésel y a la incorporación de los elementos descritos que formarán la motorización a base de hidrógeno.

Como ya se ha indicado, puesto que se trata de un rediseño del sistema de propulsión del vehículo no se contempla ningún cambio en el chasis ni en la carrocería, esto obliga a que la masa de los elementos retirados sea similar a los nuevos elementos instalados, como se ha contemplado anteriormente.

En este momento se está en disposición de realizar una evaluación de las masas de los elementos retirados e introducidos, que compruebe el cumplimiento de esta hipótesis. Atendiendo a los datos de los que se disponen se analizan los elementos más significativos en cuanto a masa se refiere de ambos diseños:

Masa de elementos del motor diésel retirados

$$m_{total \text{ diésel}} = m_{motor} + m_{caja \text{ de cambios}} + m_{depósito}$$

$$m_{total \text{ diésel}} = 145 \text{ kg} + 36 \text{ kg} + 40 \text{ kg}$$

$$m_{total \text{ diésel}} = 221 \text{ kg}$$

Masa de elementos del sistema de hidrógeno introducidos

$$m_{total H_2} = m_{motor} + m_{pila\ de\ combustible} + m_{depósito} + m_{batería\ eléctrica}$$

$$m_{total H_2} = 140\ kg + 61\ kg + 121,4\ kg + 61,54\ kg$$

$$\mathbf{m_{total H_2} = 384\ kg}$$

Comparación de masas

Una vez realizado los cálculos se pueden comparar los pesos de ambos sistemas de motorización:

$$m_{diésel} = 221\ kg$$

$$m_{H_2} = 384\ kg$$

$$\mathbf{Sobrepeso = 163\ kg}$$

La alternativa propuesta en este trabajo supone un peso extra de 163 kg. En el apartado 6 "Conclusiones y Análisis de resultados" se valorará este resultado junto con el resto de prestaciones que ofrece el nuevo sistema de propulsión.



Universidad de Valladolid

Escuela de Ingenierías Industriales

Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

6. Conclusiones y Análisis de resultados

6. CONCLUSIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. Conclusiones generales

Durante la realización de este trabajo fin de máster (TFM) se ha abordado un tema de actualidad como es la alternativa del hidrógeno dentro del panorama energético, en concreto en el sector de la automoción.

Actualmente se están desarrollando grandes avances por parte de importantes empresas dedicadas a este sector con resultados muy prometedores, que han dado lugar a la fabricación de prototipos de vehículos alimentados con hidrógeno. En este TFM se ha pretendido dar un paso en el conocimiento de esta alternativa y se ha conseguido aplicar un ciclo de conducción para realizar el cálculo y dimensionamiento de los distintos elementos que forman el sistema que se pretende implantar.

La realización de este trabajo y los resultados obtenidos me hacen partícipe de las opiniones que vislumbran un futuro muy alentador para el hidrógeno dentro del mundo de la automoción, que junto a la disminución en las reservas del petróleo y sus efectos perjudiciales para el medio ambiente, hacen pensar en un mundo donde predominen los vehículos alimentados por fuentes alternativas a los combustibles fósiles.

Por otra parte las ventajas que ofrece el hidrógeno en cuanto a autonomía y precio lo convierten en un serio competidor de otras alternativas como son los vehículos eléctricos, aunque bien es cierto que ambas opciones pueden ser viables y pueden convivir dentro del este sector.

6.2. Líneas de desarrollo futuro para el hidrógeno

La utilización del hidrógeno como vector energético es un proceso que hoy en día se encuentra en desarrollo por lo que se pueden contemplar una gran cantidad de líneas de investigación acerca de este tema.

En cuanto a la utilización de sistemas basados en pila de combustible existe un gran campo de aplicación fuera del sector de la automoción. Es de gran interés el diseño de sistemas basados en pila de combustible para la **generación de energía en empresas, hospitales y zonas residenciales.**

Por otro lado uno de los factores de los que depende el desarrollo de esta fuente de energía es la capacidad de **obtener de una forma eficiente y económica hidrógeno.** El estudio y desarrollo de nuevas fuentes de **obtención de hidrógeno a través de fuentes renovables** es uno de los retos más importantes que se deben llevar a cabo.

Y por último, en relación al presente TFM, añadir la necesidad de cara a los futuros vehículos de hidrógeno del diseño y construcción de una **red de estaciones de servicio** capaces de suministrar este combustible a la presión y condiciones adecuadas.

6.3. Análisis de resultados de la transformación del vehículo

En este apartado se realiza un resumen de los resultados obtenidos para compararlos con las prestaciones que ofrece el vehículo base.

6.3.1. Comparación de potencias

La potencia nominal se ha considerado en todo momento como una de las características a mantener, lo que ha repercutido en el dimensionamiento de todos los elementos del nuevo motor con el fin de que la potencia nominal de todo el sistema alcance los 65 kW que se puede considerar de igual magnitud que la potencia nominal del vehículo base (66 kW).

6.3.2. Comparación de autonomía

El diseño del depósito ha sido la parte más crítica del sistema. Su necesidad de contener hidrógeno a alta presión ocasiona que el espesor de material para resistir esta presión interior sea considerable y desemboque en un alto peso del mismo, si bien en los parámetros habituales de este tipo de depósitos (masa de hidrógeno respecto al total es 3,3%).

El compromiso entre peso y autonomía es uno de los problemas que genera la alternativa de un vehículo alimentado por hidrógeno, que provoca que en estas dos características sea más difícil competir con un vehículo con motor de combustión interna alternativo.

En el caso que se ha desarrollado se obtienen los siguientes datos de autonomía:

Autonomía vehículo diésel = 1216 km

Autonomía vehículo hidrógeno = 545 km

Los datos muestran como la alternativa de hidrógeno, con el criterio de no incrementar en demasía el peso del sistema de almacenamiento, limita la autonomía a aproximadamente la mitad de la que ofrece el vehículo base con su motor diésel.

A pesar de ello, la autonomía que ofrece el hidrógeno tiene un valor aceptable, ya que no resulta muy incómodo el hecho de repostar cada 545 km aproximadamente.

Este dato es aún más aceptable cuando lo comparamos con alternativas como el vehículo eléctrico con autonomías muy inferiores, por debajo de los 200 km, y **tiempos de repostaje** de varias horas frente a escasos minutos del hidrógeno.

6.3.3. Comparación de masas

Como se ha comentado anteriormente la autonomía y el peso están relacionados y la colocación del depósito de hidrógeno junto con el resto de componentes ha provocado un sobrepeso del vehículo de hidrógeno frente al vehículo base diésel.

Los datos calculados muestran un sobrepeso de 163 kg.

$$\text{Sobrepeso} = 163 \text{ kg}$$

Para conocer la implicación que este sobrepeso ocasiona sobre el vehículo base es necesario conocer su carga máxima.

$$\text{Carga Máxima} = \text{Masa Máxima Autorizada} - \text{Peso Neto}$$

$$\text{Carga Máxima} = 1727 \text{ kg} - 1178 \text{ kg}$$

$$\text{Carga Máxima} = 549 \text{ kg}$$

El sobrepeso implica una **reducción de esta carga máxima**

$$\text{Nueva Carga Máxima} = 549 \text{ kg} - 163 \text{ kg}$$

$$\text{Nueva Carga Máxima} = 386 \text{ kg}$$

La reducción en la carga máxima del vehículo es significativa, aunque se puede considerar asumible ya que permite el transporte de cuatro adultos adecuadamente, junto con una carga de equipaje adecuada para tratarse de un crossover.

6.3.4. Comparación económica

Una de los puntos interesantes en este tipo de alternativas es el factor económico, en ningún momento se ha comentado nada acerca del precio que supone un vehículo de estas características, por lo que se considera oportuno dar unos datos orientativos.

En primer lugar es conveniente conocer la comparación de precio que supone la adquisición de un vehículo de ambas alternativas:

Si hablamos de un vehículo diésel existe una infinidad de modelos y precios pero haciendo una media se puede hablar de un precio de venta de **20.000 € a 30.000 €**.

Como es predecible los datos de precio actualmente que podría tener un vehículo de hidrógeno no lo hacen asequible para todos los públicos, por dar una cifra se pueda hablar de precios en torno a los **100.000 €**.

Por otro lado, el consumo y precio del combustible es otro de los factores que componen la comparación económica entre distintas alternativas.

Los combustibles fósiles tanto gasolina como diésel poseen un precio sometido a grandes fluctuaciones del mercado del petróleo que hacen que los datos sean muy cambiantes, en estos momentos se puede contemplar el valor de **1,2 €/l de gasóleo** por lo que el vehículo base tratado durante este trabajo tendría un consumo de unos **5 € cada 100 km**.

Más difícil es en el caso del hidrógeno, su diversidad en métodos de obtención y sus diferentes formas de suministro hacen difícil dar un precio adecuado, a través de distintas fuentes de información se puede aproximar entre **4€ y 5€ el kg de hidrógeno**, este precio aumenta si contemplamos solo la obtención por métodos electrolíticos utilizando electricidad como fuente de energía llegando a superar los **10 € por kg de hidrógeno**. Aplicando estos datos en la alternativa propuesta durante este trabajo se puede hablar de entre **3€ y 7€ cada 100 km**.

Lógicamente estos datos no son muy favorables para el hidrógeno, pero no sería conveniente quedarse con los datos actuales. Recordemos que se trata de una alternativa en desarrollo sometida a una **economía de escala** que con un futuro optimista podría llegar a disminuir el precio tanto de adquisición como del combustible hasta situarlos al nivel de los actuales automóviles.

6.3.5. Comparación medioambiental

El desarrollo de una alternativa que desbanque a los combustibles fósiles no tendría sentido sin una mejora sustancial en el ámbito medioambiental que disminuya la contaminación que supone el uso de medios de transporte.

Si hablamos de automóviles basados en combustibles derivados del petróleo, existe una emisión de sustancias contaminantes como son: **CO₂, NO_x, CO**, hidrocarburos, etc. aunque bien es cierto **se está avanzando en la reducción de las emisiones**, consiguiendo valores en torno a los 100 g de CO₂ por kilómetro, pero el incremento del parque automovilístico supone un **problema en especial en núcleos urbanos**, donde la calidad del aire se ve muy afectada.

La utilización de vehículos de hidrógeno **no conlleva la emisión directa de ninguna sustancia contaminante** para el medioambiente, no obstante sí que se producen emisiones de CO₂ durante la obtención del hidrógeno, siempre que éste no provenga de fuentes renovables.

La gran ventaja que ofrece el uso del hidrógeno es: por una parte la **reducción en las emisiones de NO_x, CO e hidrocarburos y en su medida de CO₂** usando fuentes renovables; por otro lado los vehículos alimentados por hidrógeno contribuyen al **alejamiento de sustancias contaminantes de los núcleos de población**, de este modo se mejoraría sustancialmente la calidad del aire de las ciudades y de los entornos urbanos que desembocaría en una mejora de la calidad de vida y disminución de las enfermedades asociadas a la contaminación.

6.4. Propuesta de desarrollos futuros

En cuanto a propuestas de desarrollos futuros de este TFM se plantean:

- Realización de los cálculos y dimensionamiento a través de las curvas de funcionamiento de los distintos elementos empleados
- Diseño y cálculo del sistema de gestión y conversión de energía para un vehículo basado en pila de combustible y almacenamiento de hidrógeno
- Planteamiento de diversas opciones para el almacenamiento a bordo de hidrógeno
- Incorporación de elementos como supercondensadores para mejorar el funcionamiento del vehículo.



Universidad de Valladolid

Escuela de Ingenierías Industriales

Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

7. Referencias

7. REFERENCIAS

- 1) Ministerio de Industria, Energía y Turismo, <http://www.minetur.gob.es/>, página web consultada entre marzo y junio 2016
- 2) International Energy Agency, <http://www.iea.org/>, página web consultada entre marzo y junio 2016
- 3) Red Eléctrica Española (REE), <http://www.ree.es/>, página web consultada entre marzo y junio 2016
- 4) David Nieva Moreno, “Proceso Steam-Iron para la producción de hidrógeno”, Proyecto Fin de Grado, Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, Universidad Rey Juan Carlos, 2013
- 5) M. Aguer Hortal y Á. L. Miranda Barreras, “El hidrógeno, fundamento de un futuro equilibrado”, Editorial: DIAZ DE SANTOS, 2014.
- 6) Asociación Española del Hidrógeno, <http://aeh2.org/>, página web consultada entre marzo y junio 2016
- 7) Jorge L. Peidro Barrachina, “Las pilas de combustible”, <http://personales.upv.es/~ilpeidro/pilas/pilas.htm/>, página web consultada entre marzo y junio 2016
- 8) J. A. Villajos, Blog Madrid+d Energía y sostenibilidad: “El coche de hidrógeno, por fin a gran escala de la mano de Hyundai”, Enero 2013.
<http://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2013/01/25/131870/>
- 9) F.V. Tinaut. “Vehículos con pila de combustible” Máster en Ingeniería de Automoción, Universidad de Valladolid, 2015
- 10) Renault España, <http://www.renault.es/>, página web consultada entre marzo y junio 2016
- 11) Renault Powertrain, <http://www.powertrain.renault.com/>, página web consultada entre marzo y junio 2016
- 12) Luxfer Gas Cylinders, <http://www.luxfercylinders.com/>, página web consultada entre marzo y junio 2016
- 13) Hydrogenics, <http://www.hydrogenics.com/>, página web consultada entre marzo y junio 2016
- 14) Saft, <http://www.saftbatteries.com/>, página web consultada entre marzo y junio 2016



Universidad de Valladolid

Escuela de Ingenierías Industriales

Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

ANEXOS

ANEXOS

Anexo I: Ficha técnica motor diésel Energy dCi 90 ECO2



**K9K – dCi 75, dCi 90, dCi 110
1.5 Turbo - Diesel Euro5 & Euro6**

RENAULT
POWERTRAIN

DRIVE THE CHANGE



K9K - CUSTOMER BENEFITS

The fourth generation of Renault 1.5 dCi engine, driving one out of three Renault vehicles sold worldwide from Twingo to Laguna. This new Energy generation is Euro 6 ready. It brings more than 10% CO2 emissions reduction combined with enhanced engine torque.

ENERGY PACKAGE [¶]

- Variable capacity oil pump
- Low and high pressure EGR
- Active Thermal management
- Stop and Start
- Smart electrical management
- New more precise injectors tips to optimize combustion

DRIVING COMFORT - FUN TO DRIVE

- dCi 110 Engine torque: 20 Nm more than the current version, 260Nm available over a wide speed range; from 1,750 to 2,500 rpm
- dCi 90 : 220 Nm from 1750 rpm
- High responsiveness and low-end torque favored by a new turbocharger with low inertia

ENVIRONMENT FRIENDLY

- Euro 5 compliant and Euro 6 ready
- Close-Coupled Diesel Particulate Filter (DPF)
- B30 fuel compatible

MAINTENANCE - TOTAL COST OF OWNERSHIP*

- Timing belt: 160,000 km
- Oil change intervals: 30,000 km or 2 years
- Diesel Particulate Filter: lifetime

AVAILABLE TRANSMISSIONS

- 5 or 6 speed manual transmission
- 6 speed 4WD manual transmission
- Dual clutch six speed transmission

DRIVETRAIN LAYOUTS

- East-West available
- North-South layout possible, according to the customer request and after Renault validations



RF 06 2012 - The information in this brochure is given as an indication only and may change without notice

A WIDE RANGE OF APPLICATIONS

- A to D segment Cars
- MPV and SUV Vehicles
- Equips Renault and other vehicle manufacturers' vehicles

[¶]: The Energy engine lineup relies on the technological expertise of Renault in F1 and a new generation of downsizing
*On Renault vehicles under West Europe market conditions

K9K - SPECIFICATIONS

MAIN SPECIFICATIONS

	dCi 75	dCi 90	dCi 110
Number of Cylinders	4		
Number of Valves	8		
Bore x Stroke (mm)	76 x 80.5		
Total Displacement (cc)	1461		
Max. Power (kW (PS))	55 (75)	66 (90)	81 (110)
Speed at max Power (RPM)	4000		
Max. Torque (Nm (lbf.ft))	180-200(133-147)	200-220 (147-162)	260 (192)
Speed at max Torque (RPM)	1750- 2500	1750 – 2500	1750- 2750
Compression Ratio	15.5 : 1		
Fuel Injection	Common Rail Direct Injection		
Turbocharger	Waste Gate		VNT
Fuel	Diesel, 10 ppm S B30 Compatible		
Emissions Standard	Euro5 (Euro6 ready)		
Dimensions (LxWxH)	599 x 624 x 707		
Weight (kg)	145		

RP 06 2012 – The information in this brochure is given as an indication only and may change without notice

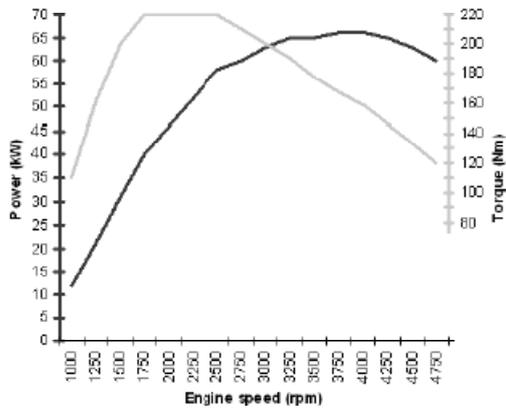
OTHER SPECIFICATIONS

Cylinder Block Material	Cast Iron
Cylinder Head Material	Aluminum
Oil Sump Material	Aluminum
Emissions Control System	HP + LP EGR DOC + DPF
Power Steering	Electric *
Standard Engine Position	East-West, intake and exhaust towards the back
Standard Engine Tilt	8 degrees towards exhaust
Electric Interface to Vehicle	CAN Bus

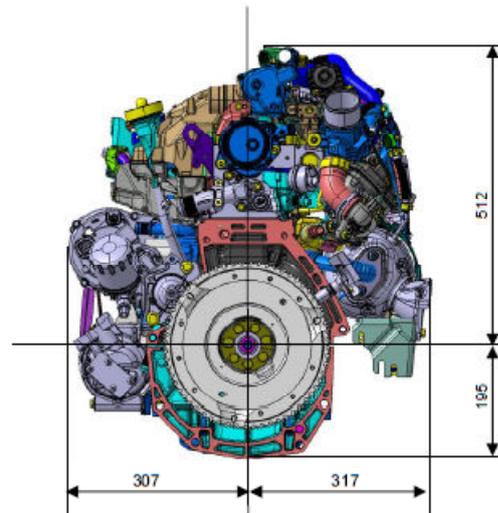
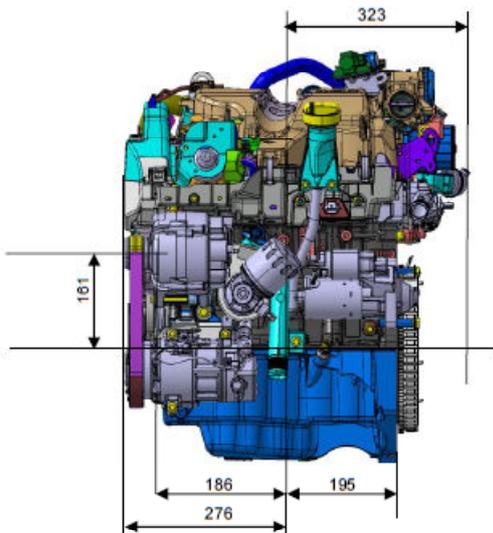
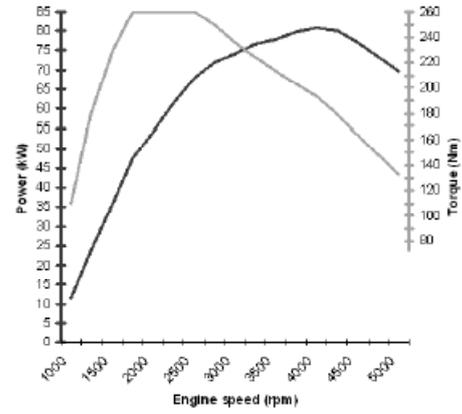
*Hydraulic power steering to be validated by Renault

K9K – PERFORMANCE AND MAIN DIMENSIONS

K9K 66 kW



K9K 81 kW



Dimensions in mm

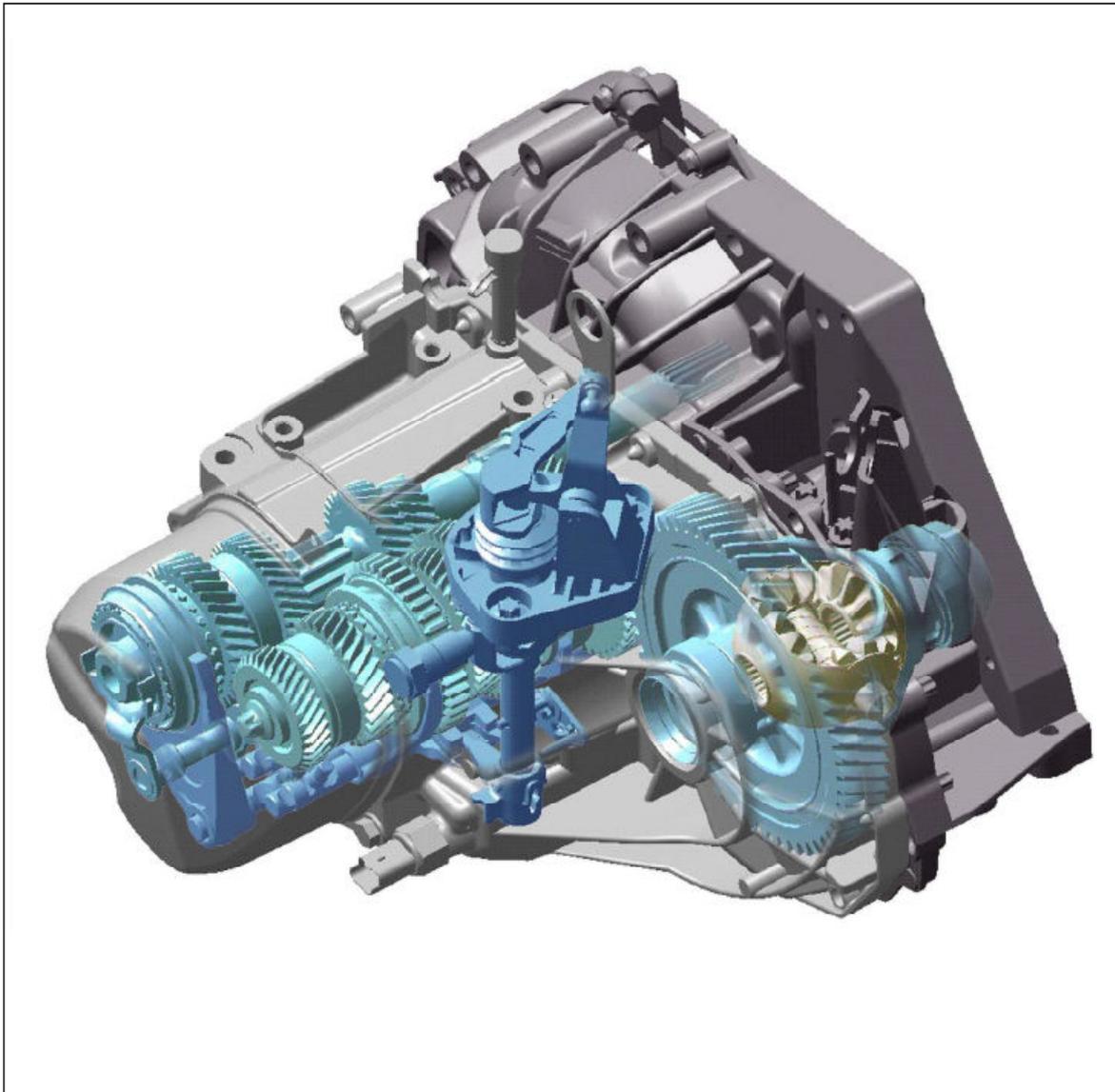
RP 05 2012 – The information in this brochure is given as an indication only and may change without notice

(renault_powertrain@renault.com)

**RENAULT
POWERTRAIN**

Renault Powertrain
FRCTR A02 P 35
1, Avenue du Golf 78288 Guyancourt- France
Tel : +33 (0)1 76 87 52 50 – Fax: +33 (0)1 76 86 96 94
E-mail : renault_powertrain@renault.com

Anexo II: Ficha técnica: Transmisión manual de 5 vel. JRQ MT5 200Nm



**JB3 - JH3 - JHQ - MT5 160Nm
5-Speed Manual Transmissions**

**RENAULT
POWERTRAIN**

DRIVE THE CHANGE



JB3 - JH3 - JHQ - CUSTOMER BENEFITS

These MT 5 with optimized cost performance equip most of Renault gasoline mid range vehicles. they are produced in more than one million units per year.

DRIVING COMFORT

- Hydraulic clutch control or mechanical
- 1st -2nd double-cone synchronisation
- Reverse gear brake
- Noise reduction thanks to reinforcement on gearbox housing

PERFORMANCE AND CONSUMPTION

- Improve internal drag
- Spherical differential

REMARKABLY COMPACT

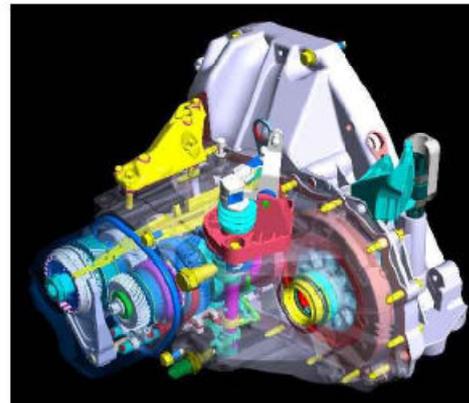
- In the 2-shaft transmission category

EASY ADAPTABILITY TO VEHICLE

- Cable control: on top of the JH3 and JHQ gearbox
- Rod: at bottom of the JB3 gearbox

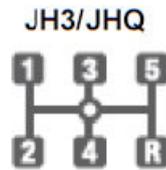
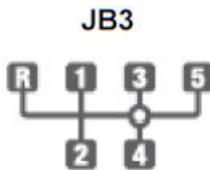
MAINTENANCE - TOTAL COST OF OWNERSHIP*

- no maintenance, filled for life



RP 06 2012 - The information in this brochure is given as an indication only and may change without notice

SHIFTING PATTERN:



A WIDE RANGE OF APPLICATIONS

- A to B segment Cars
- Commercial Vehicles
- Equips Renault, Nissan and other vehicle manufacturers

*On Renault vehicles under West Europe market conditions
**Availability depends on required emission standards and vehicle characteristics

JB3 - JH3 - JHQ - SPECIFICATIONS

MAIN SPECIFICATIONS

	JB3/JH3	JHQ
Maximum torque capacity (Nm):	160	160
Maximum speed (rpm):	6,500	6,500
Number of forward speeds:	5	5
Synchronisation:	Simple cône Double cône 1/2 en option	5 synchronised forward speeds
Dry weight (kg):	32	34
Type of clutch operation	Mechanical	annular hydraulic (CSC)
Differential material:	Cast iron	Cast iron
Oil capacity (liters):	3,4	2.5
Options:	reverse gear brake for JH	reverse gear brake 1st and 2nd double cone mechanical tachymeter

OTHER SPECIFICATIONS

Housing material	Aluminum
Clutch diameter (mm):	180 – 215
Oil Type:	mineral or semi synthetic
Offset between differential and final drive (mm):	183
Offset between primary and secondary shaft (mm):	66
Synchromesh material:	brass

GEAR RATIO EXAMPLES

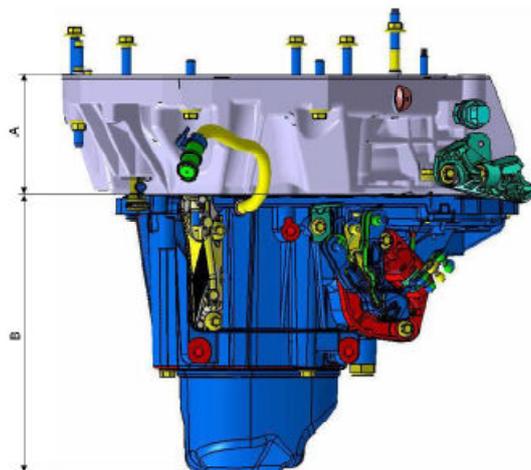
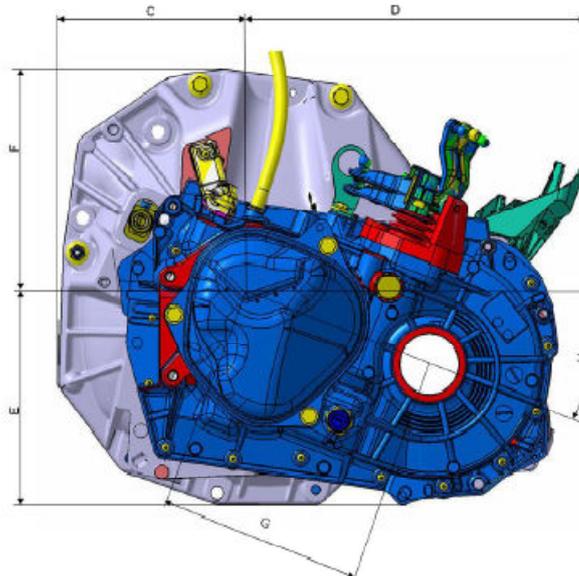
	JB3	JB3	JH3	JH3	JHQ	JHQ
1st	11x37	11x41	11x41	11x41	11x41	11x37
2nd	22x41	21x43	21x43	21x43	21x43	21x41
3rd	28x37	28x39	28x39	28x37	28x39	28x37
4th	34x35	34x35	31x34	30x29	34x35	30x29
5th	39x32	39x31	37x33	42x31	39x32	42x31
Final drive	15x61	16x57	15x58	16x55	14x63	15x58
Energy	gasoline	Diesel	gasoline	Diesel	Gasoline	Diesel

FP 06 2012 - The information in this brochure is given as an indication only and may change without notice

JB3 - JH3 - JHQ - MAIN DIMENSIONS

JB3-JH3-JHQ Dimensions in mm

	21°	25°
A	118	
B	274	
C	174	180
D	318	325
E	193	203
F	202	202
G	183	
H	21°	25°
I	-	-



RP 06 2012 - The information in this brochure is given as an indication only and may change without notice.

(renault_powertrain@renault.com)

RENAULT
POWERTRAIN

Renault Powertrain
FRCTR A02 P35
1, Avenue du Golf 78288 Guyancourt- France
Tel : +33 (0)1 76 87 52 50 - Fax : +33 (0)1 76 86 96 94
E-mail : renault_powertrain@renault.com

Anexo III: Ficha técnica de Motor Eléctrico 5A de 65 kW



5 A

Electric Powertrain

**RENAULT
POWERTRAIN**

DRIVE THE CHANGE



5AM - CUSTOMER BENEFITS

Our new ambition: Zero Emission for All
The 5A is the first electric powertrain to equip Renault Z.E. range :
Fluence Z.E., Kangoo Z.E. and ZOE

HIGH TECHNOLOGY

- Innovative Technical Patents, up to 60 for ZOE
- Synchronous motor type with wound rotor, 10% more efficient than permanent magnetic rotor.
- System tuned for the Li-Ion battery technology assets.

DRIVING COMFORT - FUN TO DRIVE

- The maximum torque of 226Nm is available immediately, getting a vivid take off
- The 5A Electric Powertrain delivers a maximum power of 70 kW constantly from 3000 to 9 000 rpm allowing strong accelerations.
- No Noises No vibrations in vehicle.

ADVANCED CHARGING SOLUTION

Infrastructure side

- The universal Quick Charger, a solution to plug the car to any electric supply in any circumstance
- Quick charge without external costly AC/DC converter
- Allows communities, fleets and customers to enjoy an affordable quick charge solution

Vehicle side

- fully integrated in the electric powertrain, thanks to its light and compact dimensions

MAINTENANCE - TOTAL COST OF OWNERSHIP**

- "Maintenance free" for the Motor.
- Reducer oil : lifetime
- Same Powertrain cooling circuit as for ICE.

AVAILABLE TRANSMISSIONS

- A single fixed ratio of reduction for reducer: 9,32.

DRIVETRAIN LAYOUTS

- East-West available
- Three main modules , Junction Box, Power Electric Box and Electric Motoreducer can be packaged separately .



1. Junction box
2. Charger
3. Power electric box
4. Reducer
5. Synchronous electric motor
6. Supervisor

RP 06 2012 - The information in this brochure is given as an indication only and may change without notice



A RANGE OF APPLICATIONS

- B to D segment Cars
- LCV Cars

*Availability depends on required emission standards and vehicle characteristics
**On Renault vehicles under West Europe market conditions

5AM - SPECIFICATIONS

MAIN SPECIFICATIONS

	5A 44	5A 70	5A 65
Max. Power kW (HP)	44 (60)	70 (90)	65(84)
Speed at max Power (RPM)	3000 to 9000		
Max. torque, Nm (lbf.ft)	226 (222)		
Speed at max torque (RPM)	0 to 9000		
Reducer ratio	9, 32		
Dry Weight (kg)	140		

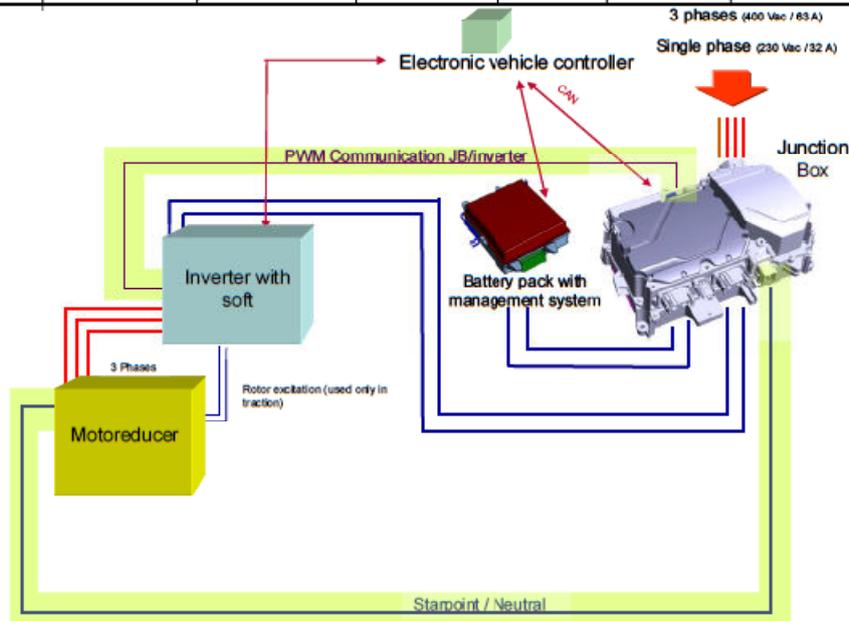
FP 06 2012 - The information in this brochure is given as an indication only and may change without notice

OTHER SPECIFICATIONS

Engine Cooling System	YES
Battery Cooling System	YES
Clutch system	No
Vacuum pump	Electrical pump
Air Cond Compressor	electrical pump
Electric Interface to Vehicle	CAN Bus

5AM – MAIN SPECIFICATIONS OF CAMELEON

WHERE	TYPE OF CHARGE	INFRASTRUCTURE	CABLE	TIME	STANDARD CHARGER	RENAULT CAMELEON
DOMESTIC	WALL BOX			< 8 hours	Limited to 22 kW	No Limit Cost-effective Weight-effective
PUBLIC PLACES (OFFICES, CAR PARKS, SHOPPING CENTERS,...)	STANDARD OR ACCELERATED 3,7 kW to 22 kW		Mode 3 single to tri-phase	From 1 to 8 hours	Cost + Weight Increasing with Power	
	QUICK CHARGE 43 kW AC (400 V/63 A)		Attached to spot Mode 3 (AC)	30 mn	No	



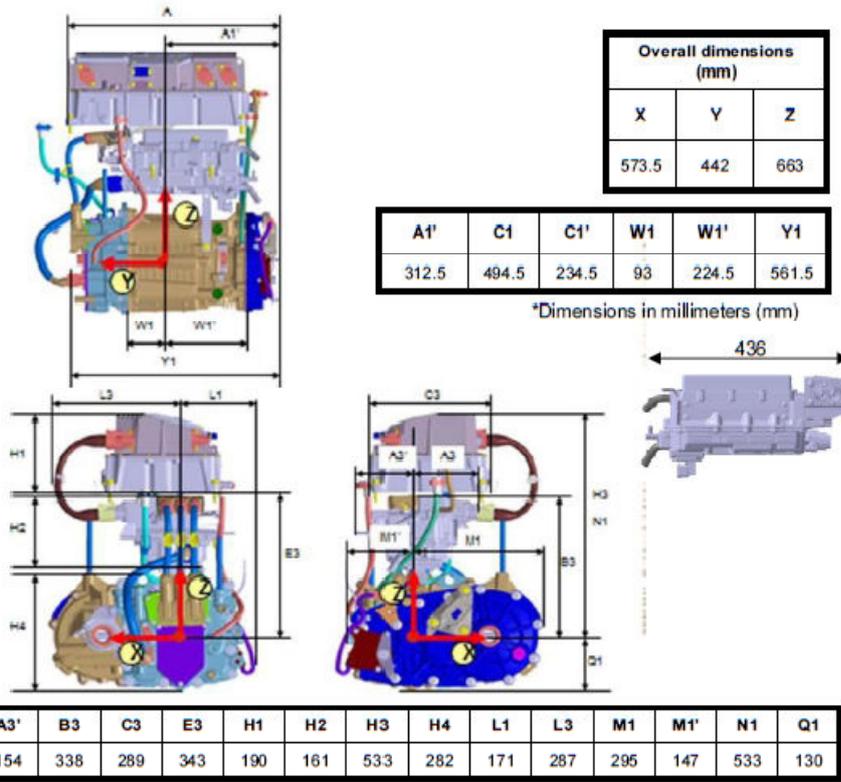
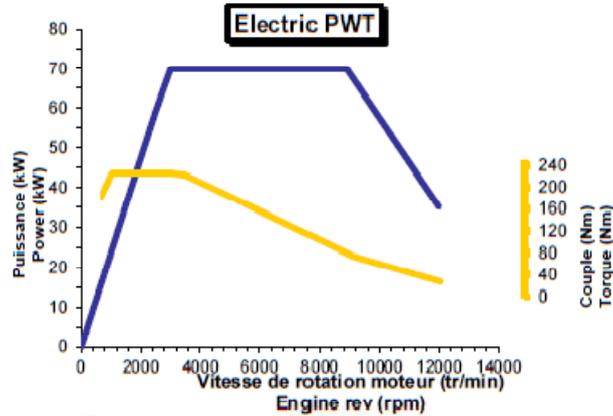
RP 06 2012 – The information in this brochure is given as an indication only and may change without notice.

(renault.powertrain@renault.com)

**RENAULT
POWERTRAIN**

Renault Powertrain
FRCTR A02 P 35
1, Avenue du Golf 78288 Guyancourt- France
Tel : +33 (0)1 76 87 52 50 – Fax: +33 (0)1 76 86 96 94
E-mail : renault.powertrain@renault.com

5AM – PERFORMANCE AND MAIN DIMENSIONS



RP 06 2012 - The information in this brochure is given as an indication only and may change without notice



Renault Powertrain
FRCTR A02 P35
1, Avenue du Golf 78288 Guyancourt- France
Tel : +33 (0)1 76 87 52 50 – Fax : +33 (0)1 76 96 96 94
E-mail : renault.powertrain@renault.com

Anexo IV: Ficha técnica pila de combustible



HyPM™ HD 30

Heavy Duty Fuel Cell Power Module

- Liquid-cooled advanced MEA PEM stack
- Integral Balance of Plant
- Advanced onboard controls and diagnostics
- Comes with low pressure cathode air delivery
- -46°C sub-zero shutdown capability



Technical Data

Rated Electrical Power	33 kW continuous
Operating Current	0 to 500 A _{DC}
Operating Voltage	60 to 120 V _{DC}
Peak Efficiency	55% ¹⁾
Response	< 5 s from off to idle < 3 s from idle to rated power
Fuel	Dry Hydrogen >99.98%
Oxidant	Ambient Air
Coolant	De-ionized water (DI H ₂ O) or 60% ethylene glycol / DI H ₂ O
Ambient Temperature	-10 to +55°C operating -40 to +65°C storage (<2°C with automated freeze shutdown feature)
Communication	CAN v2.0A (standard 11 bit)

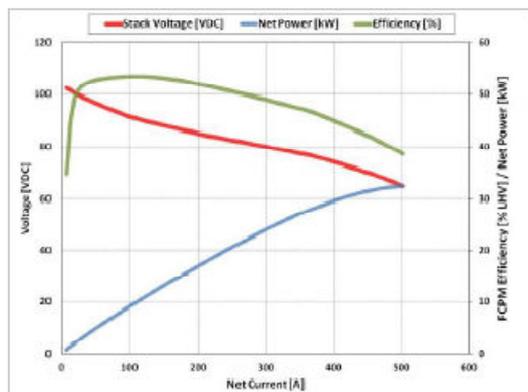
¹⁾ Efficiency based on LHV of H₂, 25°C, 101.3 kPa, including onboard parasitic loads, excluding radiator fan and water pump

- Rapid start-up and dynamic response
- Unlimited start-stop cycling
- Robust, rugged and reliable
- No water for humidification required
- No nitrogen required for shutdown

Physical

Dimensions L x W x H ²⁾	605 x 410 x 265 mm
Mass ³⁾	61 kg
Volume ³⁾	66 L

²⁾ Excluding air delivery and optional water pump
³⁾ Including air delivery and optional water pump



HyPM™ HD30 Typical Performance¹⁾

Includes

- Air delivery unit (low pressure blower)
- Integration and operation manual
- Product Warranty

Optional

- Coolant pump
- Thermal management kit
- Diagnostics software
- Power electronics components

Applications

- Urban transit buses
- Heavy duty commercial fleet vehicles
- Marine
- Aerospace

Actual delivered product may differ in appearance.
Specifications subject to change without prior notification.
Printed in Canada © Hydrogenics Corporation 2012-04-16

HYDROGENICS Corporation
220 Admiral Blvd, Mississauga, Ont, L5T 2N6 Canada
Tel. +1 (905) 361 3660 Fax +1 (905) 361 3626

HYDROGENICS GmbH
Am Wiesenbusch 2, 45966 Gladbeck, Germany
Tel. +49 (2043) 944 133 Fax +49 (2043) 944 146

www.hydrogenics.com
Fuelcellsales@hydrogenics.com

Anexo V: Ficha técnica batería eléctrica

NHP Module High power Nickel-metal hydride module

Saft's NHP Ni-MH batteries are specifically designed for high power applications, providing excellent energy density and maintenance-free operation.

NHP modules are available in two configurations:

- NHP 10-340: 12 V, 34 Ah
- NHP 5-680: 6 V, 68 Ah

Applications

Energy & power applications

Hybrid applications: vehicles, buses, trucks, boats

Railway applications: hybrid tramways

Main advantages

- High specific power and energy
- High cycle life
- Maintenance free
- Excellent safety and resistance to abuse
- Integrated high efficiency liquid cooling
- Fully recyclable

Technology

- Sealed - 100% recombination
- Foam positive electrode
- Nickel metal hydride negative electrode (AB₅ alloy)
- Liquid cooled block technology
- Alkaline electrolyte
- Chemically treated polypropylene separator



Module characteristics

High power modules	NHP 10-340	NHP 5-680
Electrical characteristics		
Nominal voltage (V)	12	6
Rated capacity at C/3, after charge at constant current (Ah)	34	68
Power density (W/l)	970	970
Specific power (W/kg)	520	520
Energy density (Wh/l)	91	91
Specific energy (Wh/kg)	50	50
Dimensions		
Height (mm)	165	165
Length (mm)	165	165
Width (mm)	168	168
Weight (kg)	8.7	8.7
Discharge characteristics at +20°C to +25°C (+68°F to +77°F)		
Typical power at 80% DOD during 30 sec (W)	4500	4500
Maximum discharge current for 5 min (A)	200	400
Maximum discharge peak current for 30 sec* (A)	350	700
Maximum discharge peak current for 10 sec* (A)	500	1 000
Maximum discharge peak current for 2 sec* (A)	750	1 500

* final discharge voltage 0.8 V/cell



Operating temperature

-20°C to +40°C (-4°F to +104°F)

Storage temperature

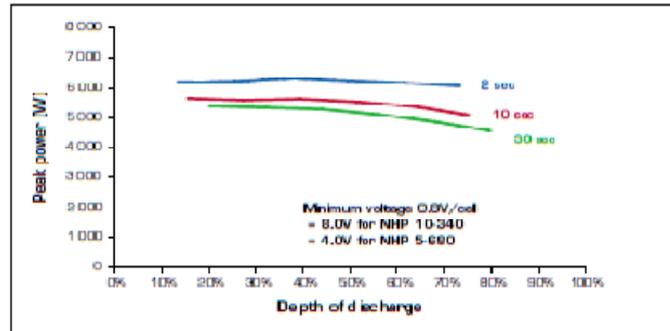
0°C to +30°C (+32°F to +86°F)

Charge conditions

Single level charge: 1.47 V/cell is recommended at +20°C (+68°F) with a voltage compensation of -3 mV/°C/cell (-1.7 mV/°F/cell).

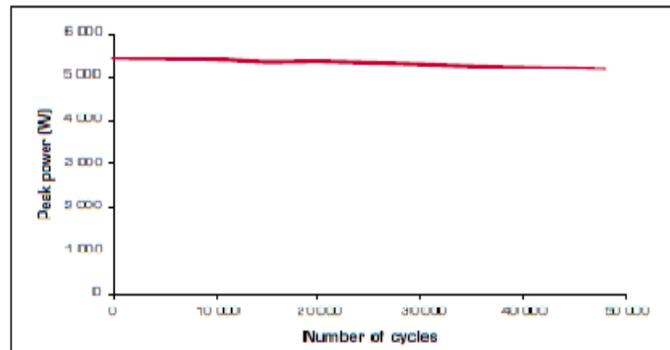
NHP module - Typical peak power

Discharge at +25°C (+77°F)



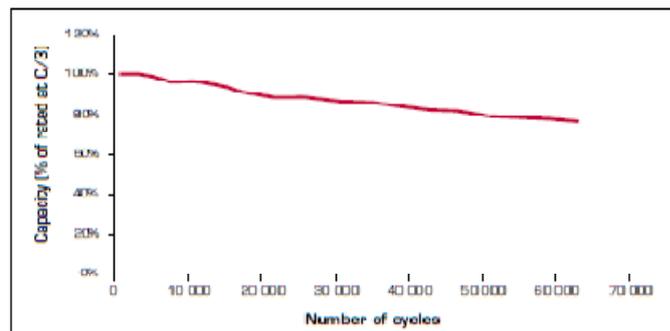
NHP module - Cycling at 20% DOD

10 sec peak power at 60% state of charge



NHP module - Cycling at 20% DOD

Capacity at C/3 rate after full charge



Saft
Industrial Battery Group
 12, rue Sadi Carnot
 93170 Bagnolet - France
 Tel: +33 1 49 93 19 18
 Fax: +33 1 49 93 19 64
www.saftbatteries.com

Doc N° 21248-20804
 Data in this document is subject to change without notice and becomes contractual only after written confirmation.
 Société anonyme au capital de 31 944 000 €
 RCS Bobigny B 353 703 673
 Pragme - Printed in France - 1k

