

# DIFERENTES OPCIONES DE PROPULSIÓN PARA UNA FUTURA AVIACIÓN GENERAL CON SENSIBILIDAD AMBIENTAL

E. Navarro Arévalo<sup>a</sup>, O. Mosquera<sup>b</sup>, A. Di Bernardi<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Departamento de Motopropulsión y Termofluidodinámica, Escuela Técnica Superior Ingenieros Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid, Plaza Cardenal Cisneros 3, 28040 Madrid, España, emilio.navarro@upm.es*

<sup>b</sup>*Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 1 y 47, 1900 (La Plata), Argentina, omar.mosquera@ing.unlp.edu.ar, cadibern@ing.unlp.edu.ar*

**Palabras Clave:** Motores alternativos, Combustibles alternativos, Medio ambiente.

**Resumen.** Desde sus comienzos, la aviación ha buscado medios de propulsión eficientes y con la menor relación peso/potencia, básicamente para lograr mayores capacidades de carga y/o autonomías.

Debido básicamente a la falta de regulaciones medio-ambientales en el ámbito de los motores alternativos aeronáuticos, unido al reducido y restringido mercado, la conciencia ambiental ha quedado relegada no aplicándose tecnologías de reducción y eliminación de contaminantes en estos motores.

La aparición de las primeras regulaciones que impondrá la EPA, en este caso la eliminación del plomo en el combustible AVGAS de uso aeronáutico, supondrá seguramente un punto de partida a una sucesión de mayores exigencias respecto a las emisiones de los motores. Así, en los últimos años algunas compañías han comenzado a investigar y desarrollar la utilización de combustibles alternativos, biocombustibles y sistemas propulsivos alternativos como pueden ser los eléctricos.

Ante este panorama, el objetivo de este trabajo es hacer un estudio de los posibles sistemas de propulsión alternativos o desarrollo de los actuales que conduzcan a un mayor cuidado del medio ambiente, haciendo una comparación entre ellos y las posibilidades que le caben en la adaptación al transporte aeronáutico en aviación general.

# 1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad los sistemas propulsivos para aviación general se basan casi en exclusividad en los motores alternativos de encendido provocado y que utilizan gasolina como combustible.

Desde su inicio los motores alternativos aeronáuticos utilizaron tecnologías punta, que posteriormente se adaptaron y utilizaron en otros ámbitos diferentes al aeronáutico.

Después de la Segunda Guerra Mundial y ante la llegada de los turborreactores, los motores alternativos pasan a utilizarse únicamente en aplicaciones de baja cota de operación, velocidades menores de 0.6 Mach y para potencias por debajo de 400 kW. Desde entonces no ha habido grandes desarrollos en los motores alternativos ya que quedaron relegados al mercado de la aviación general, que es muy reducido y donde un oligopolio formado por unas pocas compañías se apoderaron del mismo. No ha ocurrido lo mismo en otros ámbitos de la industria, donde los motores alternativos han sufrido una gran evolución, fundamentalmente debido a la incorporación de la electrónica a los sistemas de control del motor y obligados por las legislaciones en vigor. Tal es el caso de los motores de aplicación en automoción.

En la actualidad diversos factores, entre los que se encuentran los económicos, medioambientales, técnicos, e incluso socio-culturales, están propiciando el cambio en los sistemas propulsivos para aviación general.

Considerando el factor económico, hay que tener en cuenta que el precio del petróleo ha sufrido un gran incremento en los últimos años (Figura 1) (BP, 2010; U.S. Department of Energy, 2010), unido a que los principales yacimientos de crudo se encuentran en zonas políticamente inestables, lo que puede provocar oscilaciones aún más importantes en el precio, así como en la disponibilidad de suministro. Por otra parte, cuando las reservas actuales empiecen a ser escasas, se recurrirá a obtener el crudo de yacimientos a mayor profundidad, o con otros problemas de extracción adicionales. Esto llevará asociado un coste de extracción superior que evidentemente repercutirá sobre el precio final.

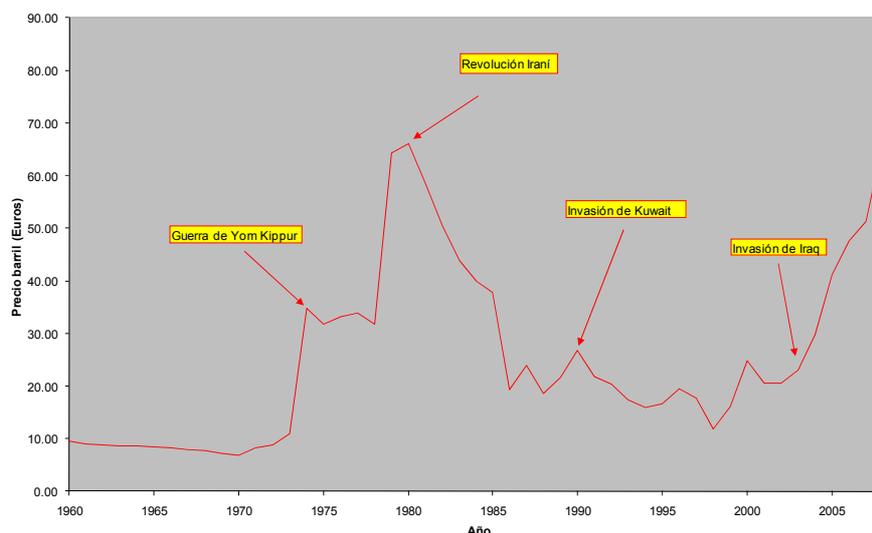


Figura 1: Evolución del precio del crudo

Los aspectos medioambientales vendrán marcados fundamentalmente por decisiones políticas que limiten la emisión de contaminantes y obliguen utilizar sistemas propulsivos más respetuosos con el medio ambiente [<http://www.epa.gov>]. La falta de regulaciones medio-ambientales en el ámbito de los motores alternativos aeronáuticos, unido al reducido y

restringido mercado, es la razón por la que no se ha aplicado ninguna tecnología de reducción y eliminación de contaminantes en estos motores. Este factor está íntimamente ligado a aspectos técnicos que permitan el desarrollo y maduración de nuevos tipos de propulsión (sistemas eléctricos, pilas de combustible, motores de hidrógeno, entre otros).

Por consiguiente los posibles nuevos sistemas de propulsión deben considerar los siguientes puntos:

- Obtener la menor relación peso/potencia, básicamente para lograr mayores capacidades de carga.
- Obtener el menor consumo de combustible posible, para poder aumentar la autonomía.
- Emitir la menor cantidad posible de productos que afectan a la calidad del aire.
- Emitir la menor cantidad posible de gases de efecto invernadero, entre los que destaca el CO<sub>2</sub>.
- Contribuir al ahorro y diversificación de la energía consumida.

Todo lo anterior es necesario estudiarlo desde un punto de vista amplio, considerando todos los aspectos implicados tanto en la producción de los combustibles, como en la utilización de estos en el motor y como el propio sistema propulsivo. Es decir, recurriendo a estudios “Well to Wheels” (WtW).

## **2 POSIBLES ALTERNATIVAS DE PROPULSIÓN**

Existen varias alternativas como sistemas propulsivos en aviación general. Estas alternativas pueden clasificarse inicialmente en:

- Sistemas térmicos: en los que pueden utilizarse diferentes ciclos termodinámicos, diferentes combustibles o diferentes tipos de motor. Dentro de este grupo se encontrarían los actuales motores alternativos de encendido provocado que utilizan como combustible gasolina.
- Sistemas eléctricos: en los que la potencia necesaria se obtiene mediante un motor eléctrico y la energía eléctrica se produce o almacena en diferentes sistemas.
- Sistemas híbridos: que combinan alguno de los sistemas indicados anteriormente.

### **2.1 Sistemas térmicos**

Entre los posibles sistema térmicos, los motores de combustión externa quedan eliminados por razones obvias, centrandose el estudio en los motores de combustión interna.

Considerando las posibles alternativas o modificaciones del motor alternativo de encendido provocado (MEP) y que utiliza gasolina, y sin perder de vista la emisión de contaminantes y la posible diversificación de combustibles, así como su sostenibilidad, se analizan las posibles soluciones técnicas viables.

Dentro de estos tipos de motores cabe distinguir entre motores rotativos y motores alternativos.

#### **2.1.1 Motores rotativos**

El motor rotativo fue desarrollado por Félix Wankel, disponiendo de un primer prototipo en 1957. Este motor actúa con idéntico ciclo que el motor alternativo de cuatro tiempos, del que únicamente se diferencia en el mecanismo empleado para conseguir las variaciones de volumen. Culata y cilindro son sustituidos por una frontera fija denominada estator, y el émbolo por una frontera móvil denominada rotor. Presenta una serie de ventajitas, frente a los motores alternativos, como son:

- El peso y el volumen del motor es del orden de un tercio del de un motor alternativo de 4T de la misma potencia.
- Posee un menor número de piezas.
- Presenta una gran suavidad de funcionamiento como consecuencia de la ausencia de fuerzas de inercia alternativas, una vez equilibrado.
- Es menos sensible a variaciones del octanaje del combustible.
- El eje de salida gira a más revoluciones.

Inconvenientes:

- Deficitaria estanqueidad de los segmentos de los vértices a regímenes de giro bajos. Esto puede hacer disminuir el par motor cuando el régimen de giro disminuya al 50% del régimen de giro máximo, aumentando el consumo específico y el nivel de emisiones contaminantes.
- Dificultades en la refrigeración del estator, ya que hay zonas con grandes diferencias de temperatura. Esto crea problemas de refrigeración, lubricación, estanqueidad, esfuerzos, etc. En el rotor no se presenta este problema al tomar una temperatura media.
- Microturbulencia muy baja.

### **2.1.2 Motores alternativos**

Entre los motores alternativos existe una gran variedad atendiendo al proceso de combustión (motores de encendido provocado y motores de encendido por compresión), al ciclo de trabajo (motores de dos tiempos y motores de cuatro tiempos), a la presión de admisión (motores de aspiración normal y motores sobrealimentados), etc.

Entre las posibles mejoras tecnológicas de los motores utilizados actualmente y sin que represente un cambio radical en el sistema se puede citar la utilización de sistemas electrónicos para el control del motor (ECU). Con estos sistemas se pueden lograr reducciones de emisiones y de consumo, unido a la posible capacidad de autodiagnos del motor.

Modificaciones más radicales pueden ser la tecnología “downsizing” y la “Homogeneous Charge Compression Ignition” (HCCI).

#### **Downsizing**

La primera de ellas (“downsizing”) va dirigida fundamentalmente a una reducción del tamaño de los motores (disminución de la cilindrada) aumentando su potencia específica y disminuyendo los consumos. La razón fundamental es el intentar que a cargas parciales, donde las pérdidas de bombeo son altas, sea necesario aumentar la carga y por consiguiente disminuir esas pérdidas y aumentar el rendimiento. En general, es necesario utilizar dos turbocompresores secuenciales con la finalidad de mantener las actuaciones a plena carga y una curva de par casi constante en un amplio intervalo de regímenes de giro, cuatro válvulas por cilindro, inyección directa central con inyectores refrigerados debido a las altas temperaturas de la cámara de combustión, intercooler aire-agua-aire y sistema de recirculación de gases de escape para evitar detonaciones y disminuir la temperatura de la carga (AutoTechnology, 2007). A carga parcial se utiliza sobrealimentación de baja presión, con lo que aumenta el rendimiento sin producirse detonación, y a plena carga se aumenta la sobrealimentación con el segundo turbocompresor. Con esta tecnología se han logrado potencias específicas de unos 110 kW/l y consumos específicos de unos 230 g/kW.h, presiones medias efectivas de 30 bar entre 2.000 y 4.000 rpm, partiendo de una presión media

efectiva de 16 bar a 1.000 rpm y plena carga y reducción en las emisiones (Christoffel, 2.007).

## **HCCI**

La tecnología HCCI se basa en producir la autoignición de una mezcla pobre (relación aire/combustible  $> 25$ ) y homogénea en múltiples puntos de la cámara de combustión. Esto es posible mediante una autoinflamación controlada por la cinética de las reacciones de precombustión a baja temperatura. Cada fracción de mezcla homogénea en el cilindro recibe la energía de activación por temperatura y mezcla de gases residuales del ciclo anterior, con esto se logra por una parte que el proceso de combustión sea más rápido, que se aproveche una mayor energía del combustible, que las temperaturas máximas alcanzadas en la cámara de combustión sean menores de  $1.550^{\circ}\text{C}$  y por consiguiente se reduzcan las emisiones de  $\text{NO}_x$ , pudiendo llegar esta reducción hasta un 99% y que disminuya el consumo de combustible (Albrecht et al., 2.007; Blaxill et al., 2.007; Kulzer et al., 2.007).

Presenta algunas limitaciones en cuanto que:

- Este modo de operación no puede utilizarse a alta carga debido a la dilución necesaria.
- La ignición está controlada por la cinética de las reacciones y por consiguiente por las condiciones termodinámicas del gas al final del proceso de admisión.
- No puede controlarse de forma directa el instante de inicio de la combustión, por lo que los transitorios sólo pueden ser controlados mediante un sistema de control en tiempo real del gasto de aire y de combustible.

En la actualidad el objetivo principal es poder controlar el inicio de la auto-ignición, mediante el control en tiempo real de los gases frescos que entran al cilindro, los gases quemados que permanecen en el mismo y/o la inyección de combustible.

## **Motores alternativos de encendido por compresión**

En cuanto a los motores de encendido por compresión (MEC) estos presentan, frente a los motores de encendido provocado y mezcla homogénea, un mayor rendimiento termodinámico, aunque tienen el problema de la mayor relación peso/potencia. Este último factor se puede compensar considerando su menor consumo y por consiguiente su efecto sobre el peso en orden de marcha de la aeronave. La sobrealimentación es clave en este tipo de motores para poder obtener unas actuaciones parecidas a la de los motores de encendido provocado, con un menor régimen de giro y mezclas más pobres, utilizando turbinas de geometría variable con control electrónico e incluso sistemas de doble turbo que permiten aumentar la potencia a vueltas más bajas y postenfriamiento de los gases. Para conseguir disminuir la emisión de  $\text{NO}_x$  se utiliza recirculación de los gases de escape (EGR) controlada electrónicamente, aunque esto disminuye el rendimiento del motor.

### **2.1.3 Combustibles alternativos para los sistemas térmicos**

Además de los combustibles convencionales derivados del petróleo (gasolina y gasóleo), existen otros combustibles alternativos:

- Biocombustibles: obtenidos a partir de biomasa, se consideran que son combustibles renovables. Se puede citar entre otros: el bioetanol, el biometanol, el biodiesel y el “Biomass to Liquids” (BTL).
- Combustibles alternativos de origen fósil. Se pueden citar el gas natural (GN), el gas licuado del petróleo (GLP), el dimetil éter (DME), el GTL (“Gas to Liquids”) y

- el “Carbon to Liquids” (CTL).
- Hidrógeno (H<sub>2</sub>): obtenido por reformado de hidrocarburos, a partir de biomasa o por de electrolisis de agua.
  - Mezclas de gas natural e hidrógeno.

## Biocombustibles

Los biocombustibles son combustibles que se obtienen a partir de biomasa y que presentan características físico-químicas análogas a las de los combustibles convencionales derivados del petróleo. Entre ellos se pueden citar: bioetanol, biometanol, biodiesel y el “Biomass-to-Liquids” (BTL). Muchos de ellos se pueden utilizar bien en su forma pura o mezclados con otros combustibles (bioetanol-gasolina, bioetanol-gasóleo, biodiesel-diesel, etc.) lo que puede representar una solución a la diversificación energética a corto y medio plazo.

El bioetanol se obtiene por fermentación de biomasa, dependiendo el rendimiento de su obtención de la materia prima utilizada (Figura 2) [<http://www.appa.es>]. Otra posible fuente de obtención, y actualmente en desarrollo, es la celulosa mediante la separación y rotura de sus moléculas en azúcares fermentables. Esto permitirá ampliar el tipo de materias utilizables para obtenerlo (semillas, residuos leñosos, etc.).

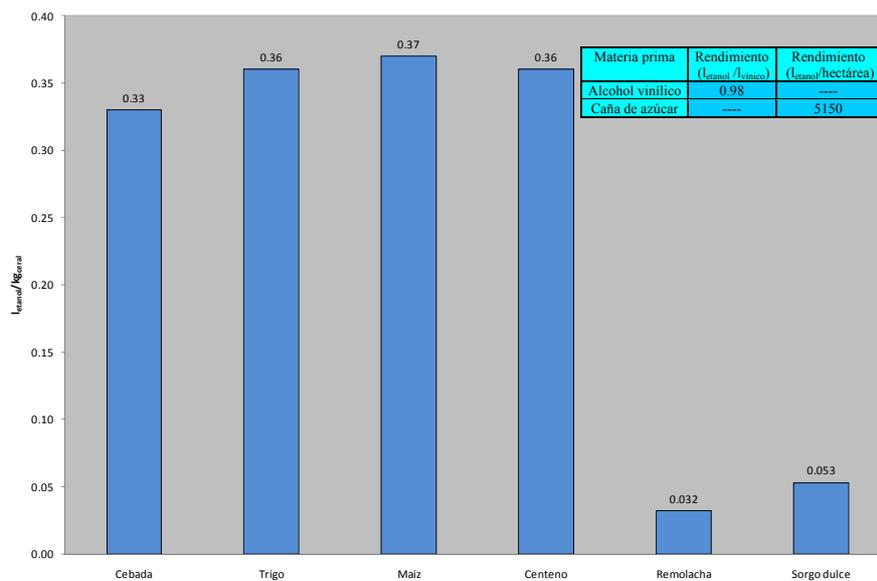


Figura 2: Rendimiento de diferentes materias primas en la obtención de etanol

El biometanol se obtiene al igual que el bioetanol a partir de biomasa. Pero tiene frente a otros bioalcoholes el inconveniente de su gran toxicidad.

Los bioalcoholes tienen una presión de vapor menor que la gasolina y un mayor calor latente de vaporización, por lo que en su utilización en el motor puede presentar problemas durante el arranque en frío si la temperatura ambiente es baja. Además, en el caso del biometanol este factor se acentúa por el hecho de ser conductor y poder impedir el salto de chispa en la bujía.

El biodiesel es un éster monoalquílico de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales, obtenidos de semillas de diversas plantas, aceites de fritura usados, grasas animales, etc. Otra posible fuente, actualmente en desarrollo, son las microalgas [[http://www.biocombustibles.es/actuali/biodiesel\\_microalgas.htm](http://www.biocombustibles.es/actuali/biodiesel_microalgas.htm)], con las que se obtienen rendimientos muchos mayores (Tabla 1).

| Especie    | Litros de aceite/Ha |
|------------|---------------------|
| Soja       | 446                 |
| Maíz       | 172                 |
| Palma      | 5.950               |
| Microalgas | 136.900             |

Tabla 1: Volumen de aceite obtenido en una hectárea de cultivo para diferentes especies

El BTL se considera un biocombustible de 2ª generación [Weissler, 2007], obtenido mediante un proceso de Fischer-Tropsch (FT), que sinteriza hidrocarburos a partir de una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno obtenida de biomasa. Los productos obtenidos son básicamente cadenas largas parafínicas libres de azufre e impurezas y que es necesario someter posteriormente a técnicas de refinado. Su uso fundamental es en motores de encendido por compresión.

### Gas natural

El GN puede utilizarse como gas natural comprimido (GNC) y como gas natural licuado (GNL).

Uno de los mayores inconvenientes de la utilización del GN es el almacenamiento. En el caso del GNC, este se almacena a unos 200 a 250 bar lo que implica tener que utilizar depósitos que soporten esta presión. Teniendo en cuenta que 0,92 m<sup>3</sup> de gas natural, con un peso de 0.66 kg, contiene la misma energía que 1 l de gasolina, y que el peso de un depósito de acero inoxidable para contener esa cantidad de GNC pesa aproximadamente 4,5 kg, se obtiene que el peso total sería de 5,18 kg/l<sub>gasolina</sub> equivalente, mientras que en el caso de la gasolina esa relación es del orden de 0,93 kg/l<sub>gasolina</sub> y para el caso del diesel es de 1,0 kg/l<sub>gasolina</sub> equivalente. Actualmente comienzan a utilizarse depósitos de materiales compuestos que disminuyen apreciablemente el peso (Figura 3) y se están investigando sistemas de almacenamiento “Adsorbed Natural Gas” (ANG) que utiliza materiales nanoporosos, fundamentalmente de carbón, para almacenar el gas natural a presiones del orden de 35 bar, mucho menores que las utilizadas hasta ahora, y almacenándolo a alta densidad de forma parecida al GNL (Owen, 1995).

El GNL se almacena en depósitos criogénicos formados por un depósito de acero inoxidable y otra cubierta exterior de acero, manteniendo entre ambas una presión del orden de  $13 \cdot 10^{-3}$  Pa, de forma que el gas natural se mantiene a temperaturas del orden de -168°C o menores.

### Hidrógeno

El hidrógeno puede obtenerse a partir de fuentes de energía fósiles o a partir de fuentes renovables, en cuyo caso se denomina “hidrogeno verde”.

El hidrógeno puede utilizarse, al igual que ocurre con el GN, como gas comprimido (H2C) a unos 250-350 bar (se está estudiando la posibilidad de llegar a una presión del orden de 700 bar) o como líquido (H2L), en cuyo caso se necesitan depósitos criogénicos (-253°C). Otras posibilidades son la utilización de hidruros, tal como el ferro-titanio, que absorben hidrógeno y lo pueden liberar posteriormente al ser calentados, o la utilización de compuestos de

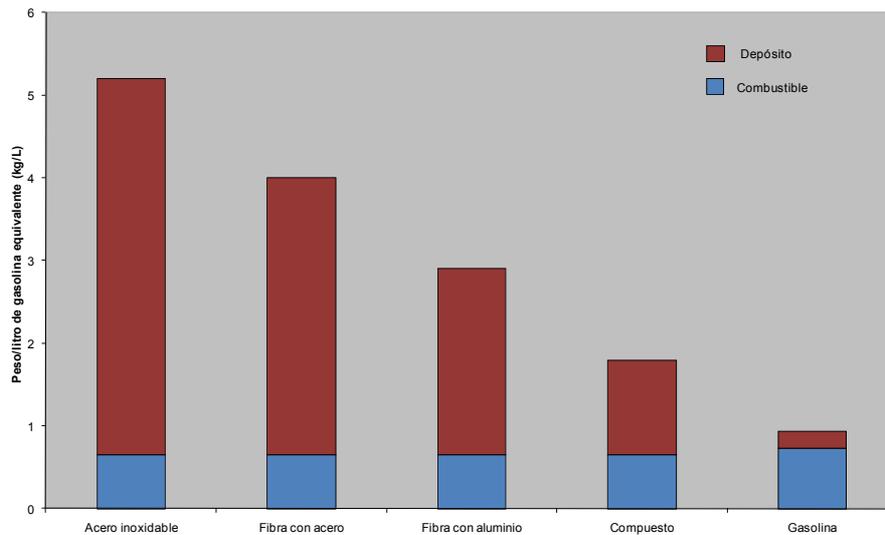


Figura 3: Peso de depósitos de diferentes materiales para gas natural

carbono, fulerenos, alnanatos, nanotubos, etc. En la Figura 4 se comparan las capacidades de almacenamiento de hidrógeno para algunos de los procedimientos citados (Wolf, 2005; Owen, 1995; Pérez, 2004; BOE; DOCE). En todos ellos se presenta el problema de la baja energía por unidad de volumen de la que se dispone, salvo para el caso de la utilización de nanotubos, por lo que la autonomía es menor que con otros combustibles.

El hidrógeno presenta velocidades de llama muy altas, un amplio rango de ignición, por lo que se pueden utilizar mezclas muy pobres, y en su combustión no se emiten ni hidrocarburos ni CO, siendo además la emisión de NO<sub>x</sub> baja si se utilizan mezclas pobres.

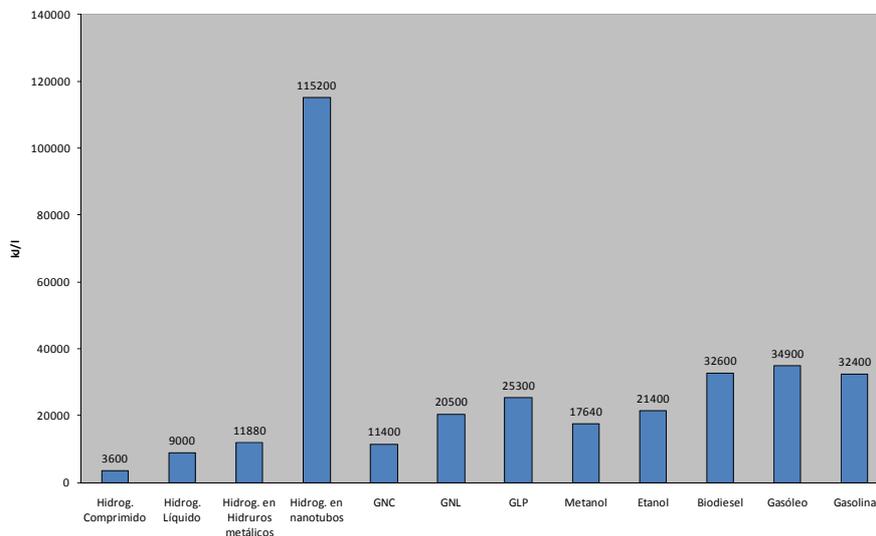


Figura 4: Energía contenida por litro de capacidad del depósito para diferentes combustibles

## Mezclas de GN-H2

Actualmente se está investigando la utilización de mezclas hidrógeno con gas natural hasta un 30%, denominada HCNG o “Hythane”, como una etapa de transición hacia una economía basada en el hidrógeno. Con la utilización del H2 en la mezcla se puede regular el grado de carga mediante el porcentaje de H2 en la mezcla, sin estrangulamiento de la admisión con la

válvula de mariposa, aprovechar el amplio rango de límites de inflamabilidad del hidrógeno para hacer funcionar el motor con una mezcla muy pobre y reducir las emisiones de  $\text{NO}_x$ .

### Comparación de los combustibles

Para comparar los diversos combustibles es recomendable estudiar el valor de la potencia que se obtendría con cada uno de ellos cuando se utilizan en motores semejantes con la misma cilindrada, es decir, estudiar el valor de la energía que se puede obtener por unidad de volumen de mezcla aire-combustible (Figura 5) (Wolf, 2005; Owen, 1995; Pérez, 2004; BOE; DOCE). Se puede observar que para el caso de los motores que utilizan como combustible diesel la energía disponible es menor, pero en este caso este efecto se puede compensar mediante sobrealimentación, que puede ser mayor que la utilizada en motores de encendido provocado.

Otros parámetros a estudiar son el consumo específico (Figura 6), el consumo volumétrico específico (Figura 7) y la autonomía (Figura 8) para cada uno de los combustibles. Para la estimación de estos parámetros se ha supuesto unos valores típicos para los rendimientos efectivos de los motores, un depósito de combustible de capacidad determinada (100 l) y una potencia prefijada (50 kW).

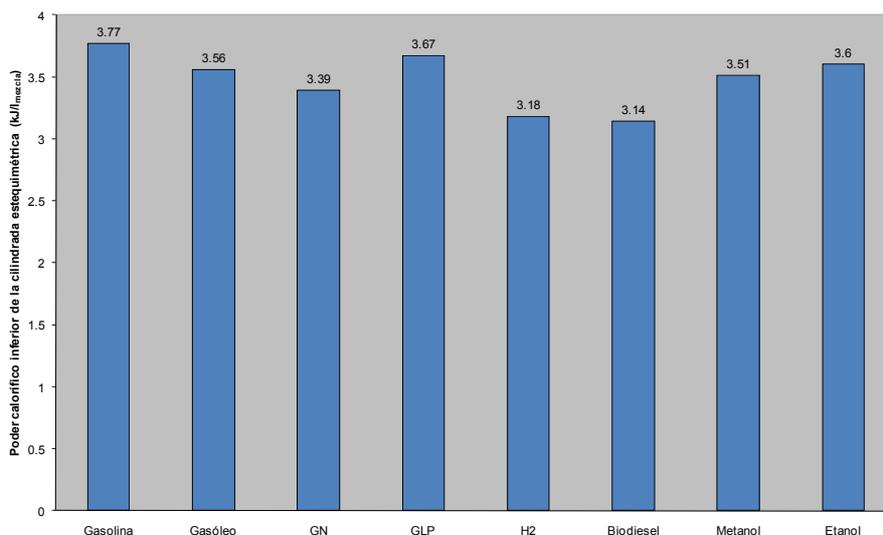


Figura 5: Poder calorífico inferior de la cilindrada para mezcla estequiométrica de diversos combustibles

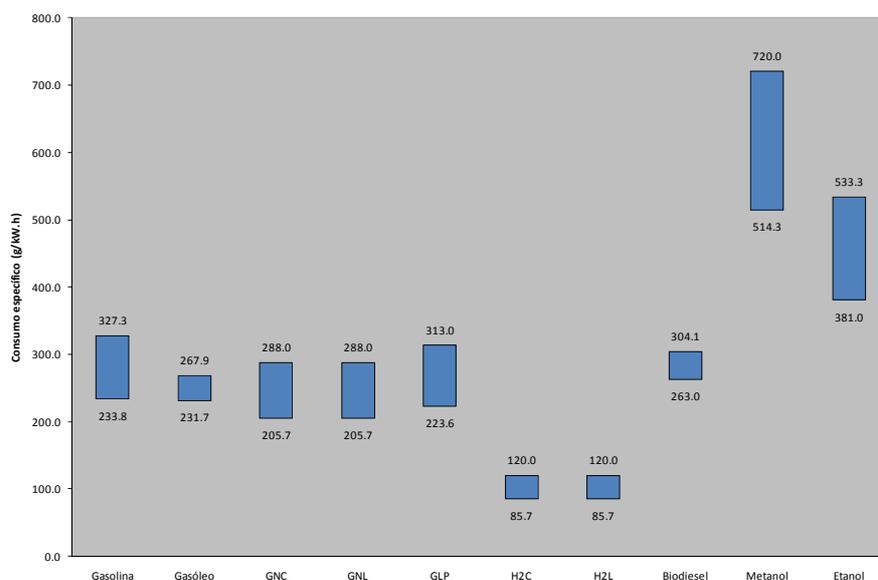


Figura 6: Consumo específico máximo y mínimo de diversos combustibles

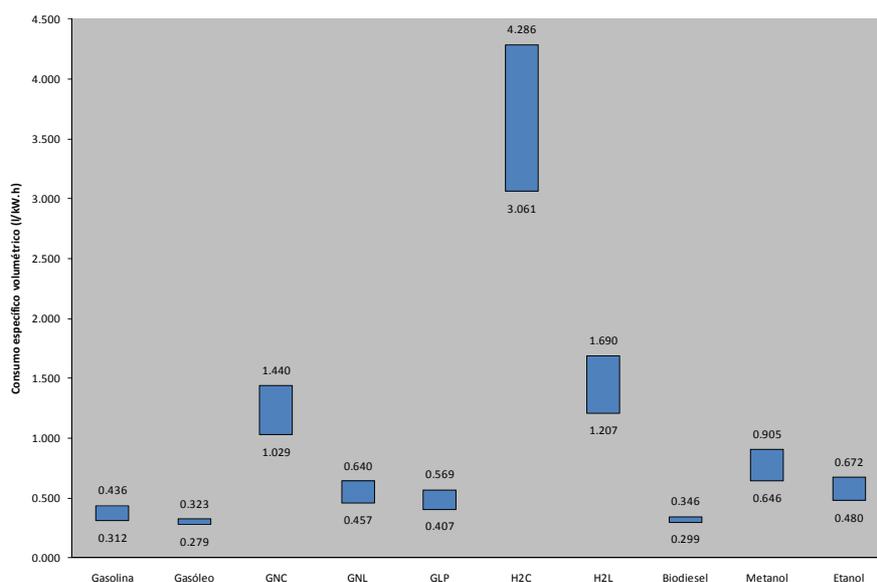


Figura 7: Consumo específico volumétrico máximo y mínimo de diversos combustibles

De la Figura 7 se puede obtener como conclusión que tanto el gas natural comprimido (GNC) como el hidrógeno comprimido (H2C) tienen un consumo específico volumétrico muy elevado, lo que implica utilizar depósitos de gran capacidad para obtener la misma potencia, y por consiguiente de mayor peso. La misma conclusión se obtiene de la Figura 8, en la que se observa que también el hidrógeno líquido presenta una baja autonomía.

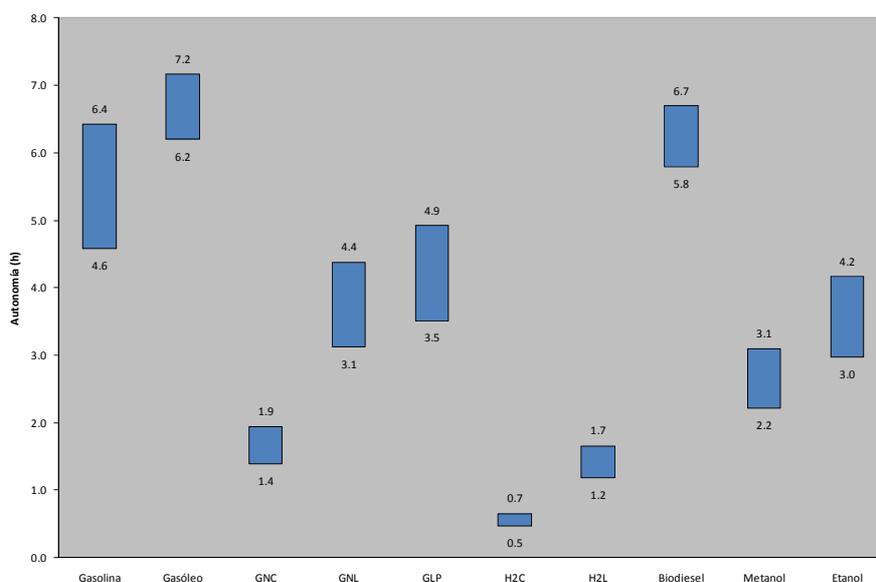


Figura 8: Autonomía máxima y mínima para diversos combustibles

## 2.2 Sistemas eléctricos

Todos los sistemas de propulsión eléctricos utilizan un motor eléctrico para obtener potencia, pero se diferencian unos de otros en el modo en el que obtienen la energía eléctrica necesaria. Esta energía puede estar almacenada o puede producirse in situ. En el primer caso se utilizan baterías o supercondensadores, mientras que en el segundo se utilizarían pilas de combustible.

### 2.2.1 Baterías

En el caso de las baterías estas se recargan desde la red o un sistema auxiliar cuando la aeronave esté parada, debiendo disponer de un sistema de recarga, controladores y un convertidor. El peso de las baterías será fundamental en la autonomía de la aeronave.

Las baterías de mayor utilización hoy en día son las de Pb-ácido, Ni-Cd, Ni-MeH y las de Li, mostrándose en las Tablas 2 y 3 (Rand, 1998) algunas de sus características principales. En general presentan una baja densidad de energía, necesitando mejoras para su aplicación de forma más eficiente.

|                                     | Pb-ácido | Ni-Cd | Ni-MeH   | Li             |
|-------------------------------------|----------|-------|----------|----------------|
| Desarrollo tecnológico              | Alto     | Alto  | Alto     | En desarrollo  |
| Coste                               | Bajo     | Alto  | Más alto | Mucho más alto |
| Densidad de energía                 | Baja     | Alta  | Más alta | Mucho más alta |
| Comportamiento a bajas temperaturas | Malo     | Bueno | Bueno    | Malo           |
| Efecto memoria                      | Bajo     | Alto  | Alto     | Muy bajo       |
| Fiabilidad                          | Alta     | Alta  | Baja     | A mejorar      |
| Vida útil                           | Baja     | Alta  | Alta     | Muy alta       |
| Reciclabilidad                      | Alta     | Baja  | Alta     | Imprescindible |

Tabla 2: Características principales de las baterías más utilizadas

|          | Energía específica almacenada (W.h/kg) | Potencia específica (W/kg) | Coste específico (€/kW.h) | Ciclos de vida |
|----------|--|----------------------------|---------------------------|----------------|
| Pl-ácido | 55                                     | 450                        | 57                        | 2000           |
| Ni-Cd    | 57                                     | 220                        | 84                        | 1650           |
| Ni-MeH   | 120                                    | 220                        | 88                        | 2200           |
| Li       | 200                                    | 350                        | 152                       | 3500           |

Tabla 3: Características de diferentes tipos de batería

### 2.2.2 Supercondensadores

Los supercondensadores son una tecnología aún en desarrollo que presentan altas capacidades de carga, tiempos de carga muy bajos, potencias muy elevadas y peso reducido, sin embargo su coste es elevado y su densidad de energía está entre 0.5 y 10 W.h/kg, aunque se ha llegado a valores del orden de 60 W.h/kg en laboratorio.

### 2.2.3 Pilas de combustible

Las pilas de combustible presentan la ventaja de producir electricidad mientras que se les suministre combustible y oxidante, unido a su mayor rendimiento frente a los motores de combustión interna y a sus menores emisiones. El combustible utilizado fundamentalmente es hidrógeno, aunque pueden utilizarse otros combustibles como el etanol, metanol, etc. En la Figura 9 se muestra un esquema de su instalación.

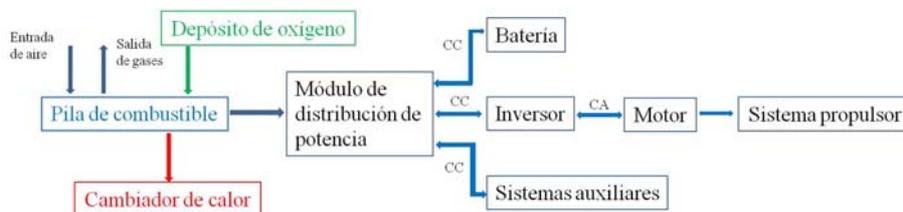


Figura 9: Esquema de la instalación de una pila de combustible

### 2.2.4 Motores eléctricos

Los motores eléctricos pueden ser de corriente continua o de corriente alterna, necesitando en este último caso un inversor (Figura 9). En la Tabla 4 se muestran algunas de las características de los motores eléctricos más utilizados.

|                      | Tipo de motor  |                  |   |   |
|----------------------|--|------------------|---|---|
|                      | DC   | Inducción        | Síncrono de imanes permanentes                      | Reluctancia conmutada   |
| Estructura del motor | Escobillas que generan chispas y necesitan mantenimiento, además necesitan de un polo conmutador | Simple y robusto | Compacto y ligero, pero necesita imanes permanentes | Rotor y estator tienen un número de polos distinto y el bobinado del estator está concentrado |
| Eficiencia           | Media  | Media            | Muy buena   | Buena   |
| Coste                | Más caro que los de inducción  | Barato           | Necesita imanes caros de metales raros para         | Barato (sin metales raros)  |

|                                    |   |   |   |   |
|------------------------------------|---|---|---|---|
|                                    |   |   | que sea ligero  |   |
| Fuente de potencia                 | DC  | AC (inversor)                                     | AC (inversor)   | AC (inversor)                                     |
| Funcionamiento a altas velocidades | El conmutador dificulta las velocidades grandes | Fácil   | Más difícil que los motores de inducción (a causa del imán) | Fácil   |
| Tamaño compacto                    | No  | No  | Si  | Si  |
| Potencias elevadas                 | No  | Si  | Si (pero difícil)   | Si (pero difícil)                                 |
| Controlador                        | Circuito de control simple, barato y compacto   | Circuito de control complicado, caro y voluminoso | Circuito de control complicado, caro y voluminoso           | Circuito de control complicado, caro y voluminoso |

Tabla 4: Principales características de motores eléctricos

### 2.3 Sistemas híbridos

Otra de las posibilidades son los sistemas híbridos. En este caso la hibridación puede ser motor térmico-motor eléctrico con baterías o bien pila de combustible-motor eléctrico con baterías. En cualquiera de los dos casos la necesidad de instalar los motores, baterías, inversores, unidades de control, etc. hacen que este sistema sea más pesado, voluminoso y caro que otros. Aún así puede presentar algunas ventajas, sobre todo desde el punto de vista de la implantación definitiva de sistemas alternativos.

Caben dos posibilidades: sistemas híbridos serie y sistemas híbridos paralelo. En el primero, el motor térmico acciona un generador eléctrico que es el encargado de suministrar energía al sistema de almacenamiento (baterías) y al motor eléctrico (Figura 10) o si se utiliza una pila de combustible esta se encarga de suministrar energía al sistema de almacenamiento y al motor eléctrico (Figura 11). En este caso el motor térmico puede ser de menor tamaño y peso que el necesario para propulsar directamente la aeronave y debería actuar la mayor parte del tiempo con un rendimiento óptimo, mínimo consumo y baja emisión de contaminantes. En el caso de ser el sistema de tipo paralelo, tanto el motor térmico como el eléctrico actúan sobre el sistema propulsor (hélice) bien al mismo tiempo o actuando sólo uno de ellos, dependiendo de las necesidades de potencia requeridas (Figura 12).

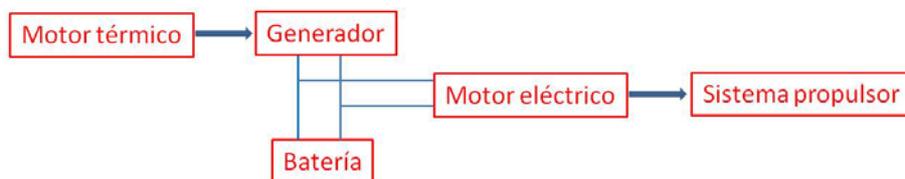


Figura 10: Sistema híbrido serie con motor térmico



Figura 11: Sistema híbrido serie con pila de combustible

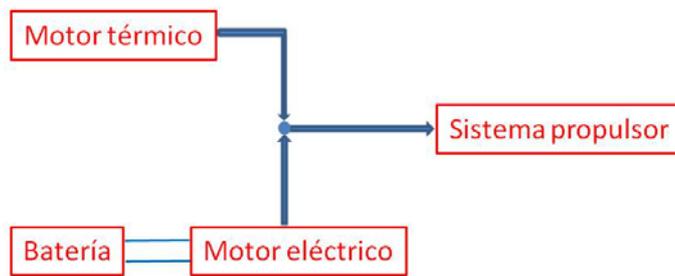


Figura 12: Sistema híbrido paralelo

### 3 COSTE DE PRODUCCIÓN DEL COMBUSTIBLE

El coste de producción de los combustibles depende de la materia prima de la que se obtienen, pudiendo por consiguiente variar su coste apreciablemente. En la Figura 13 se muestra el coste relativo de producción de diversos combustibles con respecto al de la gasolina (Concawe, 2008; General Motors Corporation, 2005; Marbán), pudiéndose observar la gran variación debida a la fuente de obtención.

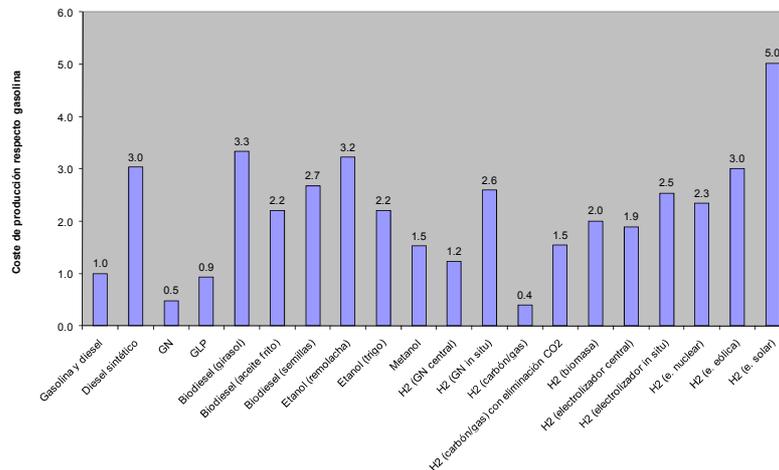


Figura 13: Coste de producción de diversos combustibles respecto al de la gasolina

### 4 EMISIONES

Respecto a las emisiones de los sistemas de propulsión analizados cabe distinguir entre contaminantes como son el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), los hidrocarburos inquemados (HC) y las partículas (PM) y los gases de efecto invernadero (GHG) cuyo principal exponente es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Los primeros pueden disminuirse mediante diseños óptimos del motor, que afectan al proceso de formación de mezcla, llenado del cilindro y combustión o mediante el postratamiento de los gases de escape (catalizadores, reactores térmicos, reactores químicos (SCR), filtros químicos y filtros de partículas). Este último proceso supone incrementar el peso del sistema y su coste.

Los GHG provienen del propio proceso de combustión y del combustible utilizado, viniendo dada la cantidad de CO<sub>2</sub> obtenida por kilo de combustible consumido por la expresión

$$\frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg combustible}} = \frac{44}{12 + 16 \cdot O/C + H/C} \quad (1)$$

donde O/C es la relación entre el número de átomos de oxígeno y de carbono del combustible y H/C es la relación entre el número de átomos de hidrógeno y de carbono. Por consiguiente, en la actualidad para disminuir emisión de CO<sub>2</sub> sin modificar el combustible utilizado el único procedimiento posible es disminuir el consumo de este.

En las Figuras 14 y 15 (ver nomenclatura al final del documento) se recogen los consumos energéticos y la emisión de gases de efecto invernadero (GHG) para diversas combinaciones de tipos de motor y combustible, tomando como referencia un motor de encendido provocado de gasolina (Concawe, 2008; General Motors Corporation, 2005). En dichas figuras se muestran los resultados para el estudio “Well to Tank” (WtT) y “Tank to Wheels” (TtW), así como el global (WtW).

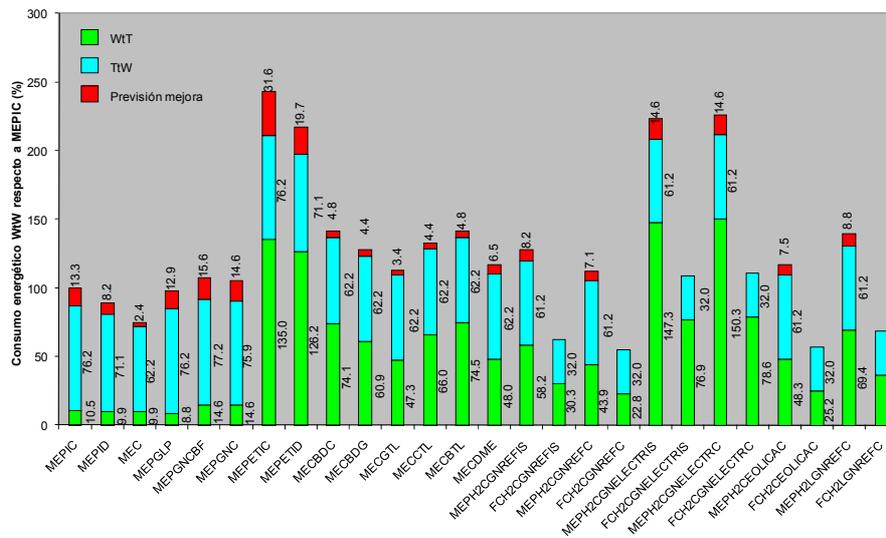


Figura 14: Consumo energético WtW para diversos combustibles con respecto a un motor de encendido provocado de gasolina (MEPIC)

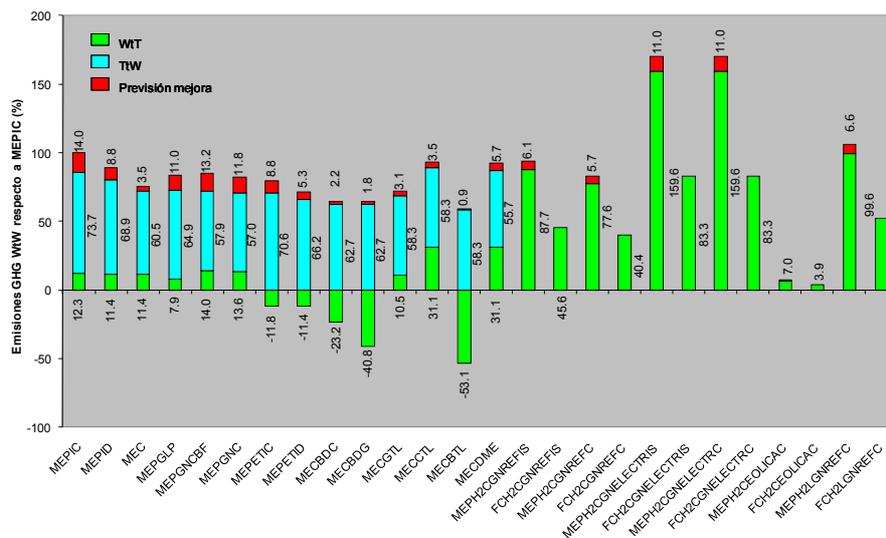


Figura 15: Emisión WtW de gases de efecto invernadero (GHG) con respecto a un motor de encendido provocado de gasolina (MEPIC)

En la Figura 16 muestra resultados publicados sobre las variaciones de las emisiones

contaminantes, respecto de las emitidas por un motor de encendido provocado de gasolina, de un motor de encendido por compresión utilizando diesel (ICE diesel), una pila de combustible que utilizara como combustible gasolina con un reformador (FC gasolina), motor de encendido provocado de gas natural (ICE GNC), motor de encendido provocado de GLP (GLP), motor de encendido provocado de metanol (ICE metanol), pila de combustible de metanol (FC metanol), motor de encendido provocado de etanol (ICE etanol), motor de encendido provocado de hidrógeno (ICE H2) y una pila de combustible de hidrógeno (FC H2) (Owen, 1995; Hoogers, 2003; Knight, 2000; IFP, 2005; Menrad, 1982; API, 1988; González, 2006; Cabra, 2005).

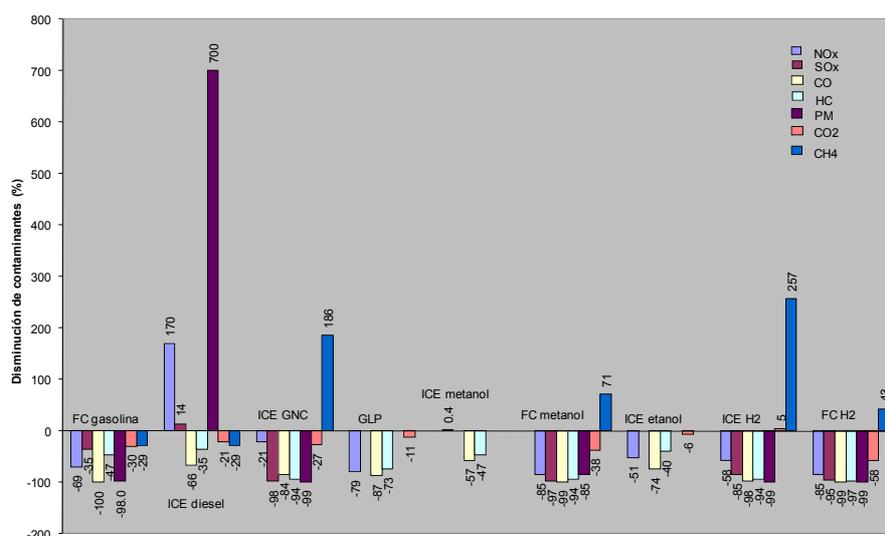


Figura 16: Disminución de emisiones contaminantes de diversos tipos de motor y combustibles respecto a un motor de gasolina

## 5 PESO DEL CONJUNTO MOTOR-DEPÓSITO

Considerando una autonomía fija (5 horas) y una potencia necesaria también fija (50kW), se ha determinado el peso en orden de marcha del sistema propulsor, es decir, el peso del motor con el depósito de combustible y su combustible. En la Figura 17 se observa que los motores que utilizan como combustible GN, H2 y GLP no son viables debido al peso que supone el depósito necesario. Los motores que utilizan etanol y metanol presentan pesos superiores al resto, pero esto se podría mejorar para que llegasen a ser competitivos, teniendo en cuenta que es posible mejorar el rendimiento térmico de estos motores aumentando su relación de compresión y la posible mejora de llenado del cilindro por el efecto de disminución de la mezcla al formarse. Los motores que utilizan gasóleo como combustible pueden competir e incluso superar a los MEP de gasolina y los motores con nuevas tecnologías (“Downsizing” y HCCI) y los rotativos representan una alternativa importante a los actuales MEP de gasolina.

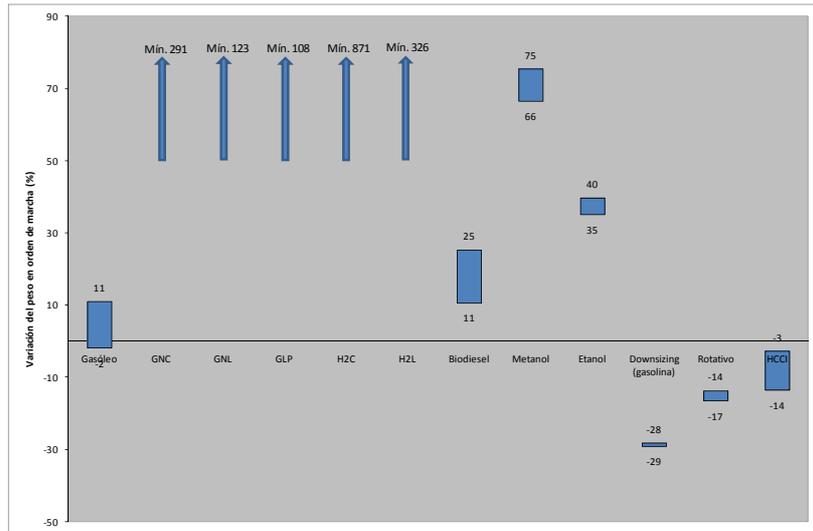


Figura 17: Variación del peso en orden de marcha para diferentes tipos de motor y combustibles respecto a un motor de gasolina

## 6 PRECIO DEL CONJUNTO MOTOR-DEPÓSITO

La utilización en la aeronave de un sistema de propulsión u otro influirá de forma apreciable en el coste final de la misma. En la Figura 18 (ver nomenclatura al final del document) se muestra una estimación del incremento porcentual del coste de adquisición de la aeronave considerando como referencia una dotada de un motor de encendido provocado de gasolina con inyección en el colector de admisión (Concawe, 2008; General Motors Corporation, 2005). Se ha considerado que los costes de certificación, etc. permanecen fijos, independientemente del sistema de propulsión utilizado.

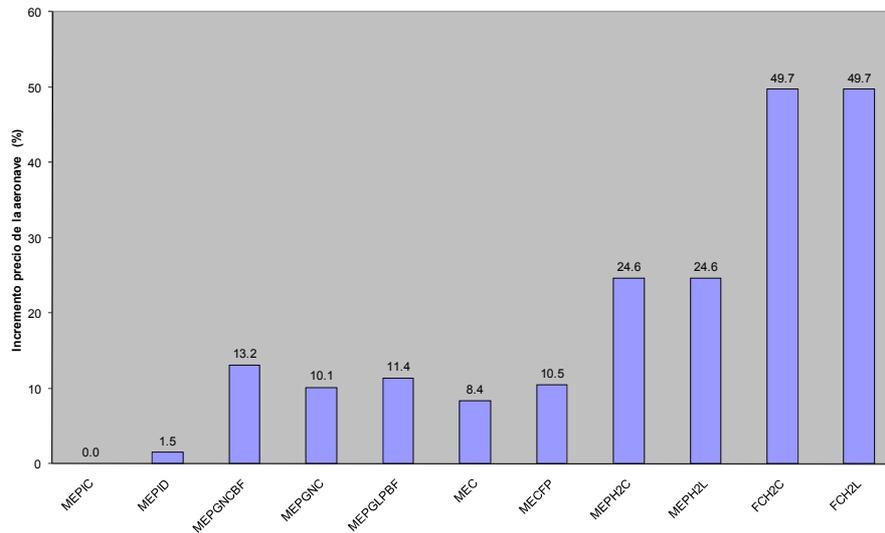


Figura 18: Incremento en el coste de adquisición de la aeronave respecto a una dotada de un motor MEPIC

## 7 VIABILIDAD DE LOS SISTEMAS

Respecto del peso total con motores alternativos, como se ve en la Figura 17, los más convenientes son Downsizing y HCCI, haciendo la salvedad que se han desarrollado para la industria automotriz y que aún resta ver si estas técnicas tendrían los mismos beneficios en la aeronáutica; le siguen los motores de encendido por compresión MEC donde se han logrado muy buenas relaciones de peso potencia para configuraciones radiales con alto grado de sobrealimentación y buen consumo específico, factor directamente ligado a las bajas emisiones, alcance de vuelo y carga máxima transportada. En configuraciones tipo Junkers (émbolos opuestos en el mismo cilindro) con recuperación de energía de los gases de escape (turbina) se han obtenido formidables valores de consumo específico, si bien se pierde algo en la relación de peso/potencia frente a la configuración radial.

En cuanto a la autonomía, como se ve en la Figura 8 los motores de encendido por compresión MEC vuelven a destacarse ya sea con combustibles derivados de petróleo o con biodiesel, debido a su alto rendimiento térmico. Los valores obtenidos por este tipo de motores son tan buenos que hacen posible el estudio de su utilización para más de 400 KW en algunos tipos de aeronaves.

Viendo las emisiones de efecto invernadero tiene buenos resultados el motor Diesel con combustible biodiesel pero aparecen problemas con las partículas y óxidos de nitrógeno, destacándose en este aspecto la pila de combustible.

En los sistemas eléctricos el gran problema es la pequeña autonomía que se obtiene actualmente, pero con una aeronave muy pequeña con apoyo de energía solar se logró recientemente un vuelo de más de 26 hs. continuas (Solar Impulse).

En el caso de los híbridos, el sistema serie con motor térmico ( Figura 10) no es viable dado que el peso es excesivo y el sistema paralelo (Figura 12) tampoco parece viable dado que es necesario incorporar el sistema el control de transmisión de potencia a la hélice y la propia transmisión, con el consiguiente aumento de peso. El único sistema viable es el sistema serie con pila de combustible (Figura 11), siempre que se resuelvan los problemas que presentan actualmente. Aun así, si se considera el peso del depósito de combustible (hidrógeno) el sistema no es viable en comparación con otros sistemas.

## 8 CONCLUSIONES

Evidentemente hay variadas posibilidades a seguir, pero las necesidades de la industria aeronáutica respecto de seguridad y certificación de los productos, hacen que los caminos para llevarlos al mercado no sean sencillos. En las últimas dos décadas resurgió el interés por los motores Diesel, que están bien desarrollados y son fiables, con la opción de utilizar combustible Jet A que por ahora es muy común en los aeropuertos. Es un camino para ir poniendo límites a las emisiones un poco más allá de suprimir el plomo en el AVGAS. Es probable que en el futuro veamos distintas tecnologías volando donde cada una de ellas se adapte a un tipo de vuelo en particular; pero aeronáuticos, “a estar a la altura de las necesidades de protección del medio ambiente de nuestro planeta”, esa es la consigna.

## NOMENCLATURA

|                  |  |
|------------------|--|
| FCH2C            | Pila de combustible de hidrógeno almacenado comprimido.  |
| FCH2CEOLICAC     | Pila de combustible de hidrógeno almacenado comprimido y producido con energía eólica en central.                                |
| FCH2CGNELECTRC   | Pila de combustible de hidrógeno almacenado comprimido y producido por electrolisis con gas natural en central.                  |
| FCH2CGNELECTRIS  | Pila de combustible de hidrógeno almacenado comprimido y producido por electrolisis con gas natural in situ.                     |
| FCH2CGNREFC      | Pila de combustible de hidrógeno almacenado comprimido y producido por reformado de gas natural en central.                      |
| FCH2CGNREFIS     | Pila de combustible de hidrógeno almacenado comprimido y producido por reformado de gas natural in situ.                         |
| FCH2L            | Pila de combustible de hidrógeno almacenado en fase líquida.   |
| FCH2LGNREFC      | Pila de combustible de hidrógeno almacenado en fase líquida y producido por reformado de gas natural en central.                 |
| MEC              | Motor de encendido por compresión.   |
| MECBDC           | Motor de encendido por compresión biodiesel obtenido de colza.   |
| MECBDG           | Motor de encendido por compresión biodiesel obtenido de girasol.   |
| MECBTL           | Motor de encendido por compresión de BTL.  |
| MECCTL           | Motor de encendido por compresión de CTL.  |
| MECDME           | Motor de encendido por compresión de DME.  |
| MECFP            | Motor de encendido por compresión con filtro de partículas.  |
| MECGTL           | Motor de encendido por compresión de GTL.  |
| MEPETIC          | Motor de encendido provocado de etanol con inyección en colector   |
| MEPETID          | Motor de encendido provocado de etanol de inyección directa.   |
| MEPGLP           | Motor de encendido provocado de gas licuado del petróleo.  |
| MEPGLPBF         | Motor de encendido provocado de gas licuado del petróleo bifuel.   |
| MEPGNC           | Motor de encendido provocado de gas natural comprimido.  |
| MEPGNCBF         | Motor de encendido provocado de gas natural comprimido bifuel.   |
| MEPH2C           | Motor de encendido provocado de hidrógeno comprimido.  |
| MEPH2CEOLICAC    | Motor de encendido provocado de hidrógeno almacenado comprimido y producido por electrolisis mediante energía eólica en central. |
| MEPH2CGNREFC     | Motor de encendido provocado de hidrógeno almacenado comprimido y producido por reformado de gas natural en central.             |
| MEPH2CGNREFIS    | Motor de encendido provocado de hidrógeno almacenado comprimido y producido por reformado de gas natural in situ.                |
| MEPH2CGNELECTRC  | Motor de encendido provocado de hidrógeno almacenado comprimido y producido por electrolisis a partir de gas natural en central. |
| MEPH2CGNELECTRIS | Motor de encendido provocado de hidrógeno almacenado comprimido y producido por electrolisis a partir de gas natural in          |

|              |   |
|--------------|---|
|              | situ.   |
| MEPH2L       | Motor de encendido provocado de hidrógeno almacenado en fase líquida.   |
| MEPH2LGNREFC | Motor de encendido provocado de hidrógeno almacenado en fase líquida y producido por reformado de gas natural en central. |
| MEPIC        | Motor de encendido provocado con inyección en el colector.  |
| MEPID        | Motor de encendido provocado de inyección directa.  |

## REFERENCIAS

- Albrecht, A., Grondin, O., Corde, G., HCCI Diesel Engine Control Design, *AutoTechnology, International Magazine for Engineering, Production and Management*, 7:60-63, 2007.
- API publication 4261, 2<sup>nd</sup> edition, 1988.
- AutoTechnology, Advanced Downsizing Technology, *International Magazine for Engineering, production and Management*, 7:38-39, 2007.
- Blaxill, H., Cairns, A., Production – Feasible Controlled Auto-Ignition, *AutoTechnology, International Magazine for Engineering, Production and Management*, 7:28-31, 2007.
- BOE (Boletín Oficial del Estado), <http://www.boe.es>.
- BP Statistical Review of World Energy, <http://www.bp.com/statisticalreview>, 2010.
- Cabra, L., El futuro sostenible de los combustibles para automoción, Jornadas sobre el futuro de las fuentes de energía para el automóvil, Fundación Eduardo Barreiros, Madrid, 2005.
- Christoffel, J., Mahle technologies boots engine efficiency, *Automotive Engineering International*, Vol. 115, n. 11, 24-25, 2007.
- Concawe/Eucar/JRC, Well-To-Whells analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, <http://ies.jrc.cec.eu.int/WTW>, 2008.
- DOCE (Diario Oficial de las Comunidades Europeas), <http://europa.eu.int/eur-lex/es/oj/index.html>.
- General Motors Corporation, Well-To-Whells Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems – A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions”, 2005.
- González, J., Gas Natural: presente y futuro del gas natural en el transporte, Taller sobre vehículos y combustibles alternativos IDAE-Sevilla, 2006.
- Hoogers, G., Fuel cell technology handbook, CRC Press, 2003.
- IFP, Alternative motor fuels today and tomorrow, 2005.
- Knight, B., Near Zero Emission dedicated natural gas vehicle, World Bank Workshop on natural gas fuelled transportation, 2000.
- Kulzer, A., Kufferath, A., Christ, A., Hathout, J., Benninger, K., Controlled Auto-Ignition, *AutoTechnology, International Magazine for Engineering, Production and Management*, 7:56-59, 2007.
- Marbán, G., Valdés-Solís, T., Producción de Hidrógeno a partir de Bio-alcoholes, Instituto Nacional del Carbón, CSIC, <http://www.incar.csic.es/qmateriales/porosos/teach-esp.html>.
- Menrad, H., Alcohol fuel vehicles of Volkswagen, SAE Paper 820968, 1982.
- Owen, K., Coley T., Automotive Fuels Reference Book, *Society of Automotive Engineers*, 1995.
- Pérez, R. Combustible: Composición, propiedades e influencia en el funcionamiento de los motores alternativos, E.T.S.I. Aeronáuticos, 2004.
- Rand, R., Batteries for Electric Vehicles, Reseach Studies Press, Baldock, U.K., 1998.
- U.S. Department of Energy, *Transportation Energy Data Book*, <http://cta.ornl.gov/data/index.shtml>, 2010.
- Weissler, P., Synthetic fuels show promise in VW diesels, *Automotive engineering international*, Vol. 115, n. 9, 32-35, 2007.
- Wolf, G., Hidrógeno como futuro combustible en el sector de automoción, Uni. Politécnica de Madrid, 2005.