Resumen

Debido al previsible agotamiento de las reservas de petróleo existentes, acelerado, si cabe, por el incremento del consumo global (principalmente debido al crecimiento demográfico y de nivel de vida de los países en vías de desarrollo) y al efecto que las emisiones propias de la combustión tienen sobre el calentamiento global, se hace necesaria la búsqueda de alternativas.

La introducción de una alternativa sustitutiva clara (el hidrógeno) es un proceso lento que, de acuerdo con los expertos, no llegará antes del 2020 – 2030. Pero, mientras tanto, ¿qué podemos hacer?

Tres son las alternativas: mejora de la eficiencia de los motores convencionales, uso de biocombustibles y la tecnología híbrida. Probablemente, la unión de las tres alternativas sea la opción más adecuada.

En este proyecto se ha estudiado en detalle una de estas alternativas: la tecnología híbrida. Concretamente se ha analizado la viabilidad de aplicar esta tecnología en el segmento de los vehículos comerciales de 3.5 toneladas. Este segmento es especialmente sensible a mejoras que permitan disminuir el consumo, ya que el ahorro de combustible (y, por lo tanto, de coste) tiene una repercusión directa sobre el beneficio operativo de la empresa.

Se ha realizado un estudio de las diversas alternativas dentro de la tecnología híbrida (serie, paralelo y serie-paralelo) analizando los pros y los contras de cada una. A continuación, se ha simulado el consumo de cada opción, se han comparado entre ellos y se ha seleccionado la opción más adecuada (incluyendo el punto de vista económico). Previamente, se han dimensionado los principales componentes mecánicos y eléctricos de cada alternativa, para establecer una especificación técnica de cada opción. Por último, se ha diseñado el principal componente mecánico que incorpora la alternativa seleccionada.

Tras el estudio realizado se puede concluir que existe una alternativa híbrida, la serie-paralelo, que permite reducir los consumos en un 20% respecto al modelo convencional y que, a su vez, permite el retorno de la inversión debida a esta tecnología en menos de dos años para un usuario medio.

Esta alternativa incorpora un elemento mecánico esencial: el mecanismo divisor de potencia. En este proyecto, se ha diseñado este mecanismo para una aplicación de motor delantero – tracción trasera, lo que supone una innovación (ya que actualmente sólo se comercializan híbridos serie-paralelo en disposición motor delantero – tracción delantera).

Sumario

RESUMEN 1

SUMARIO 3

1. GLOSARIO 7

2. PREFACIO 9

2.1. Origen del proyecto y motivación 9

3. INTRODUCCIÓN 11

3.1. Objetivos del proyecto 11

3.2. Alcance del proyecto 11

4. SITUACIÓN ACTUAL Y ESTRATEGIAS DE MEJORA. 12

4.1. Situación actual. 12

4.1.1. Emisiones 13

4.2. Estrategias de mejora. 14

4.2.1. Mejora de la eficiencia energética de los vehículos. 15

4.2.2. Combustibles alternativos. 16

5. VEHÍCULOS COMERCIALES LIGEROS (LCV). 21

5.1. Mercado actual. 21

5.2. Tendencias del mercado. 22

6. TECNOLOGÍA DE LOS VEHÍCULOS HÍBRIDOS. 23

6.1. ¿En qué consiste el vehículo híbrido? 23

6.1.1. Pasado y presente de los vehículos híbridos. 24

6.1.2. Futuro del vehículo híbrido. 26

6.2. Principales características del vehículo híbrido. 26

6.3. Clasificación de los vehículos híbridos 28

6.3.1. Vehículo híbrido 'suave' o micro-híbrido. 28

6.3.2. Vehículo híbrido serie. 29

6.3.3. Vehículo híbrido paralelo. 30

6.3.4. Vehículo híbrido serie-paralelo 31

6.3.5. Vehículo híbrido complejo 33

6.4. Comparativa de los diferentes sistemas. 33

6.5. Tendencias del mercado actual 35

6.5.1. Vehículos existentes. 35

6.5.2. Potencia específica – grado de hibridación. 35
6.5.3. Comparativa por componentes. 36

7. SIMULACIÓN. 40
7.1. Introducción. 40
7.1.1. Modelo dinámico longitudinal – Fuerzas resistentes 40
7.1.2. ADVISOR ®. 43
7.1.3. Selección del ciclo de conducción 46
7.1.4. Otros condicionantes de la simulación 47
7.2. Modelo Convencional (referencia). 47
7.2.1. Dimensionado de componentes 48
7.2.2. Resultado de la simulación 51
7.3. Modelo Serie. 53
7.3.1. Modos de funcionamiento 53
7.3.2. Dimensionado de componentes 54
7.3.3. Resultado de la simulación 56
7.4. Modelo Paralelo. 57
7.4.1. Modos de funcionamiento 57
7.4.2. Dimensionado de componentes 59
7.4.3. Resultado de la simulación 62
7.5. Modelo Serie/Paralelo. 64
7.5.1. Modos de funcionamiento. 64
7.5.2. Dimensionado de componentes 68
7.5.3. Resultado de la simulación 69

8. COMPARATIVA. 72
8.1. Consumos 72
8.2. Estudio Económico 73
8.3. Resultado de la comparativa. 73

9. MECANISMO DIVISOR DE POTENCIA (MDP). 75
9.1. Introducción 75
9.1.1. Pasado y presente del mecanismo divisor de potencia. 75
9.1.2. Cinemática y Dinámica de los trenes epicicloidales. 77
9.2. Funcionamiento del mecanismo divisor de potencia 78
9.3. Diseño básico 80
9.3.1. Análisis de las solicitaciones. 81
9.3.2. Diseño de cada uno de los componentes. 83
9.3.3. Sección general. 83
9.3.4. Estudio de elementos finitos del porta-satélites. 84

10. IMPACTO AMBIENTAL. 87

11. ESTUDIO ECONÓMICO. 88

CONCLUSIONES 91

BIBLIOGRAFÍA 93

Referencias bibliográficas 93

Bibliografía complementaria 93

1. Glosario

ADVISOR® – ADvanced VehIcle Simulator. Software de simulación de prestaciones, consumos y emisiones.

EV – Electric Vehicle. Vehículo Eléctrico.

Grado de hibridación. Porcentaje de potencia eléctrica respecto al total de potencia del vehículo.

HEV – Hybrid Electric Vehicle. Vehículo que combina diversas formas de energía en la línea motriz siempre que una de las cuales sea eléctrica.

FCV – Fuel Cell Vehicle. Vehículo propulsado por pila de combustible.

LCV – Light Commercial Vehicle. Vehículo Comercial Ligero.

NREL – Nacional Renewable Energy Laboratory. Departamento de Energía de los Estados Unidos de América.

ACEA – Asociación de Constructores Europeos de Automóviles.

PEM – Polymer Exchange Membrana. Tipología de Pila de Combustible aplicada a los vehículos automóviles.

SCR – Selective Catalytic Reduction. Proceso selectivo de reducción de las emisiones procedentes del nitrógeno. Consiste en utilizar un reactivo (normalmente urea) que reacciona con los gases de escape.

TTW – Tank To Wheel. Eficiencia desde el depósito de combustible hasta los neumáticos. Se opone a *WTT – Well to Tank*, que es la eficiencia desde la extracción del combustible hasta el depósito. Los engloba el *WTW – Well To Wheel*, rendimiento desde la extracción hasta los neumáticos. Esto es la eficiencia global de una determinada alternativa tecnológica.

DPF – Diesel Particulate Filter. Filtro de partículas materiales producto de la combustión de los vehículos diesel.

MDP – Mecanismo Divisor de Potencia. Mecanismo basado en un tren epicicloidal de engranajes capaz de separar la potencia de entrada entre sus dos salidas.

V2G – Vehicle to Grid. Versión de vehículo híbrido conectable a la red eléctrica.

2. Prefacio

2.1. Origen del proyecto y motivación

Se ha seleccionado este tema por los siguientes motivos:

- Afición del autor por los temas relacionados con el automóvil.

- Interés del autor, como ingeniero y como ciudadano, por profundizar en el tema de mayor trascendencia que se plantea la industria del automóvil en la actualidad: la búsqueda de nuevos combustibles y sus nuevos motores, alternativos a los combustibles derivados del petróleo y los motores térmicos convencionales. La necesidad de alternativas tiene su origen en: 1) los efectos negativos de los motores térmicos actuales en el medio ambiente, 2) el previsible aumento de la demanda mundial de petróleo causada principalmente por la elevación del nivel de vida de los grandes países asiáticos, 3) el previsible agotamiento de los yacimientos de petróleo, sin olvidar 4) la inseguridad en el suministro del mismo generada por tensiones políticas alrededor de varios importantes países productores.

- El tipo de actividad profesional de carácter especialista que desarrolla el autor dentro de la industria del automóvil no le permite acceder a temas generalistas como los que se plantean en este proyecto de final de carrera. Este proyecto escogido brinda al autor la oportunidad de profundizar en el conocimiento de temas que estarán en el debate técnico, económico, social y político de las próximas décadas y que afectan decisivamente al propio desarrollo profesional del autor.

- Por último, es especialmente motivador poder realizar un proyecto amplio en el que se recorran todas sus etapas desde su concepción básica y estudio de mercado hasta su definición detallada en algunos planos constructivos. No es habitual en la industria que una sola persona participe en todas estas fases y ello genera un reto interesante.

3. Introducción

3.1. Objetivos del proyecto

Los principales objetivos de este proyecto son tres:

- El análisis de las diversas alternativas dentro de la tecnología híbrida como opción para reducir consumos de combustible y emisiones gaseosas en el segmento de los vehículos comerciales ligeros.
- La comparativa de las alternativas existentes y la selección de la opción más adecuada (incorporando el punto de vista económico).
- Y por último, el diseño de la alternativa híbrida que más se adecua a este segmento (que tiene unos condicionantes muy particulares)

Para el primer objetivo se han realizado estudios de mercado por un lado y simulaciones de prestaciones de cada una de las alternativas de hibridación por el otro.

Para el último, se ha realizado el dimensionado básico de todos los componentes que forman el sistema híbrido seleccionado y se ha diseñado en detalle el elemento mecánico principal de esta nueva tecnología.

3.2. Alcance del proyecto

Este proyecto se centra en la simulación de los diferentes sistemas híbridos existentes. Para ello se parte de la definición y dimensionado de los componentes que formarán cada uno de los vehículos híbridos simulados. El detalle del control electrónico de cada uno de los componentes así como su gestión ha quedado fuera del alcance de este proyecto.

En segundo lugar, por lo que al diseño de la alternativa híbrida seleccionada se refiere, este proyecto se centrará en el diseño mecánico del elemento de la transmisión que permite hibridizar el vehículo convencional.

4. Situación actual y estrategias de mejora.

4.1. Situación actual.

La necesidad de buscar alternativas a la dependencia de las economías de los países desarrollados respecto al petróleo es uno de los problemas más graves a los que se enfrentará el mundo en los próximos años.

Actualmente, la dependencia del transporte respecto de los combustibles fósiles es cercana al 100%. La necesidad de alternativas viene forzada por los siguientes dos factores:

a) Previsible agotamiento de las reservas de petróleo existentes.

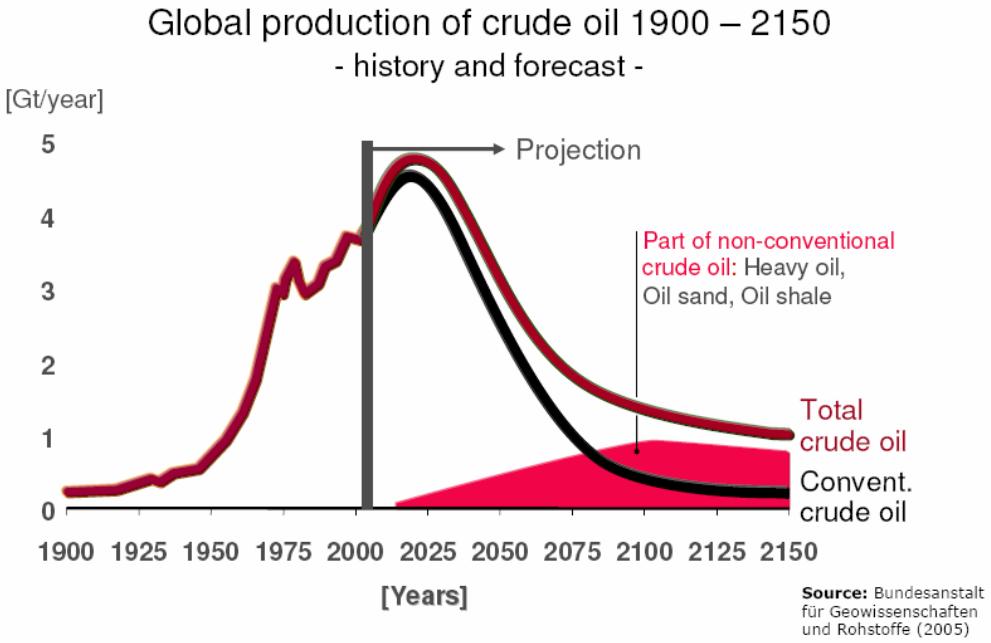

Figura 4.1. Producción global de petróleo (1900 – 2150)

Aunque puedan existir discrepancias entre las diferentes fuentes, todas remarcan la existencia de un punto de inflexión por lo que a la producción de petróleo se refiere centrado entre 2025 y el 2035. En la Figura 4.1, del Federal Institute for Geosciences and Natural Resources alemán, se observa como a partir del 2025 la producción empezará a disminuir, además de iniciarse la extracción de petróleo en formas no convencionales (generalmente con un proceso de refinado más costoso).

b) Incremento del consumo global (principalmente debido al crecimiento

demográfico y de nivel de vida de los países en vías de desarrollo).

Como se observa en la Figura 4.2 (Fuente: Naciones Unidas), la proyección del crecimiento de la población para las próximas décadas permite cuantificar la magnitud del problema al que se enfrenta el mundo.

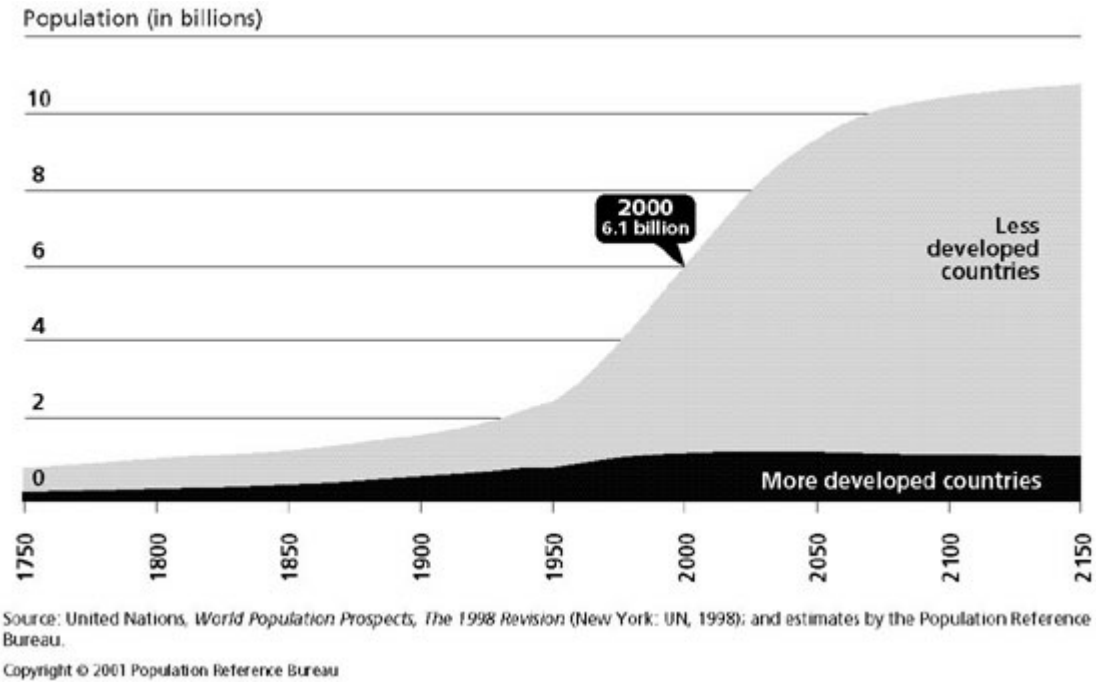

Figura 4.2. Evolución de la población mundial (1750 – 2150)

Como consecuencia de los dos puntos anteriores (disminución de la oferta y aumento de la demanda) resultará un incremento de los precios del barril de petróleo.

Por último, para agravar, si cabe, todavía más el problema, se añade la situación políticamente inestable que vive gran parte de los principales países productores de petróleo, y sus efectos en la seguridad del suministro a sus países clientes.

4.1.1. Emisiones

La necesidad de cambio viene forzada principalmente por los puntos comentados anteriormente, pero además existe un aumento de la concienciación tanto social como política de la importancia de evitar las emisiones contaminantes.

Las emisiones procedentes de un vehículo con motor de combustión interna (ya sea diesel o gasolina) son ampliamente conocidas y tienen unos límites superiores fijados según la directiva europea 70/220/ECC. Esta directiva aplica unos límites superiores cada vez más estrictos y que se dan a conocer como EURO3, EURO4, EURO 5...

En la Tabla 4.1 se muestran los niveles de emisiones permitidos y su evolución a lo largo de estos últimos años, para el tipo de vehículos N1, clase III (que es la clasificación oficial del vehículo que se desarrollará en el proyecto). Los valores de emisiones mostrados son en g/km.

Vehículos de pasajeros y LCV	**Fecha de implantación**	CO	HC	**HC+NOx**	NOx	PM
Euro I	Octubre 1994	6.90	-	1.70	-	0.25
Euro II	Enero 1998	1.50	-	1.20	-	0.17
Euro III	Enero 2001	0.95	-	0.86	0.78	0.10
Euro IV	Enero 2006	0.74	-	0.46	0.39	0.06
Euro V (propuesta)	Mediados 2010	0.74	-	0.35	0.28	0.005

Tabla 4.1. Evolución normativa de emisiones vehículos diesel clase M1/N1

La directiva de emisiones para vehículos diesel regula los niveles aceptados para los elementos de la tabla anterior. Existen otros contaminantes, tales como el SO_x y el CO_2 que no están directamente regulados por esta directiva. (En el azufre del SO_x viene regulado por la legislación de carburantes).

El Anexo B ofrece una descripción detallada sobre los efectos de los distintos tipos de contaminantes sobre la salud y el medioambiente.

Recientemente, dada la influencia de los gases de efecto invernadero sobre el calentamiento global, el CO_2 emitido por los vehículos ha pasado a primer plano de actualidad. Hasta el momento, al no ser un gas nocivo para el ser humano (en su entorno local) no ha sido objeto de regulación.

El dióxido de carbono es un gas inerte producto de la combustión perfecta. Así pues, su formación está directamente relacionada con el tipo y la magnitud del consumo de combustible y poco se puede hacer para evitarlo que no sea reducir el consumo.

En la actualidad no existe ninguna normativa que regule la cantidad de emisiones de CO_2 por vehículo. Sólo existe el acuerdo voluntario firmado por los miembros de la ACEA para limitar a 140 g/km de CO_2 en vehículos comercializados en Europa para 2008.

Como se verá a continuación, esta limitación voluntaria de los miembros de la ACEA no parece sencilla de alcanzar con la tecnología actual. De ahí, una vez más, la necesidad de buscar alternativas.

4.2. Estrategias de mejora.

¿Qué posibilidades de ir eliminando progresivamente la dependencia de los combustibles

fósiles existen? Básicamente dos. Por un lado, el desarrollo e investigación en mejora de eficiencia de los sistemas que se conocen actualmente, por otro, la búsqueda de combustibles alternativos.

4.2.1. Mejora de la eficiencia energética de los vehículos.

Como se puede observar en la Figura 4.3 de la asociación de constructores de automóviles europea (ACEA), la evolución de emisiones de CO_2 (directamente vinculada al consumo de combustible) en los últimos años es decreciente. Es importante constatar como la evolución de los diesel ha tenido una enorme influencia sobre el cómputo total de emisiones.

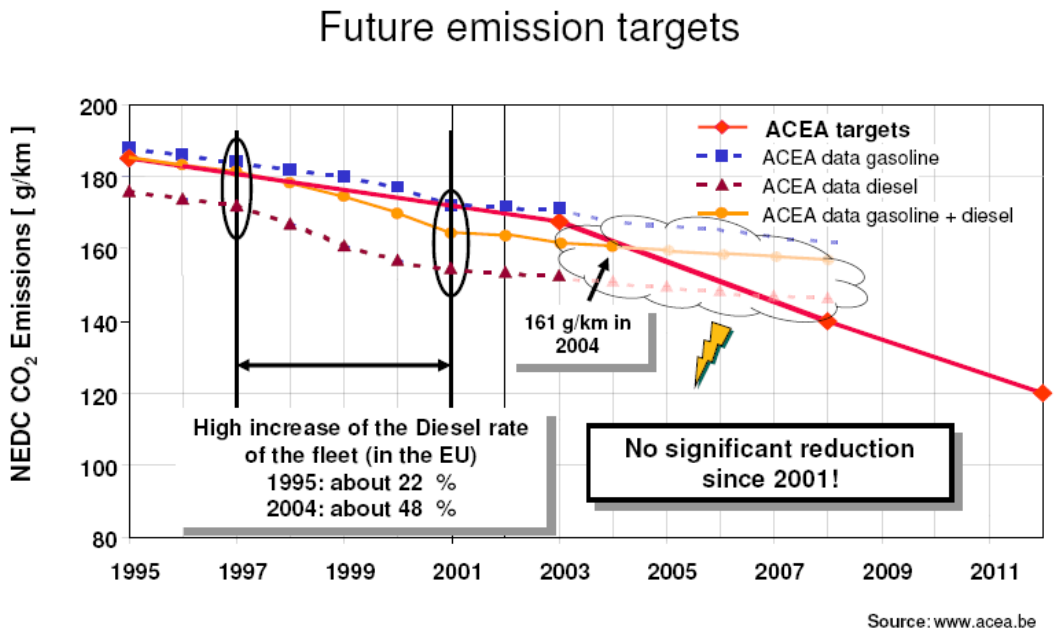

Figura 4.3. Evolución emisiones de CO_2 vehículos ACEA (1995 – 2011)

Si se analiza en detalle el periodo posterior a 2001 es sencillo ver que no se ha producido una evolución significativa por lo que a reducción de CO_2 se refiere. Actualmente, el grado de optimización y eficiencia de los vehículos convencionales (tanto diesel como gasolina) es muy elevado y no se prevén cambios o evoluciones importantes.

Es más, la mayoría de sistemas conocidos para disminuir las emisiones de partículas contaminantes (NO_x, HC y PM en los diesel) actúan sobre los gases de escape (catalizadores, DPF, SCR…) y, por lo tanto, van asociados con un aumento del consumo de combustible.

4.2.2. Combustibles alternativos.

Los principales esfuerzos de los fabricantes de automóviles en la búsqueda de combustibles alternativos se centran en 3 grupos:

- Biocombustibles.

Según la etimología de la palabra sería un combustible de origen biológico. De este modo, incluso el petróleo lo sería, pues procede de restos fósiles de organismos que vivieron hace millones de años. Pero se tiende a definir como biocombustible a un combustible de origen biológico obtenido de manera renovable a partir de restos orgánicos.

Básicamente existen 2 tipos:

- **Bioetanol (o bioalcohol)**. Alcohol producido por fermentación de productos azucarados (remolacha y la caña de azúcar). También puede obtenerse de los granos de cereales (trigo, la cebada y el maíz), previa hidrólisis o transformación en azúcares fermentables del almidón contenido en ellos. El bioetanol se utiliza en vehículos como sustitutivo de la gasolina, bien como único combustible o en mezclas que, por razones de miscibilidad entre ambos productos, no deben sobrepasar el 5-10% en volumen de etanol en climas fríos y templados, pudiendo llegar a un 20% en zonas más cálidas. El empleo del etanol como único combustible debe realizarse en motores específicamente diseñados para el biocombustible.

- **Biodiesel.** También denominado biogasóleo o diéster, constituye un grupo de biocarburantes que se obtienen a partir de aceites vegetales como soja, colza y girasol (los dos últimos son cultivos extendidos en la Unión Europea). Los biodiesel son metilesteres de los aceites vegetales obtenidos por reacción de los mismos con metanol, mediante reacción de transesterificación, que produce glicerina como producto secundario. Los metilesteres de los aceites vegetales poseen muchas características físicas y físico-químicas muy parecidas al gasóleo con el que pueden mezclarse en cualquier proporción y utilizarse en los vehículos diesel convencionales sin necesidad de introducir modificaciones en el diseño básico del motor. Sin embargo, cuando se emplean mezclas de biodiesel en proporciones superiores al 5% es preciso reemplazar los conductos de goma del circuito del combustible por otros de materiales como el vitón, debido a que el biodiesel ataca a los primeros. A diferencia del etanol, las

mezclas con biodiesel no modifican muy significativamente gran parte de las propiedades físicas y fisicoquímicas del gasóleo, tales como su poder calorífico o el índice de cetano.

- Gas Natural (GN)

Es una mezcla de gases que se encuentra frecuentemente en yacimientos fósiles, solo o acompañando al petróleo o a los depósitos de carbón. Aunque su composición varía en función del yacimiento del que se extrae, está compuesto principalmente por metano en cantidades que comúnmente pueden superar el 90 o 95%, y suele contener otros gases como nitrógeno, etano, CO_2, H_2S, butano, propano y trazas de hidrocarburos más pesados.

Las principales ventajas del GN respecto al petróleo son:

- Reservas estimadas mayores que las de petróleo.
- No contiene plomo ni restos de otros metales pesados, así como tampoco contiene azufre.
- No emite partículas sólidas en suspensión.
- Presenta, en su aplicación a vehículos automóviles, niveles de ruido sensiblemente inferiores al diesel (del orden de 10dB menores).

- Hidrógeno.

El hidrógeno parece ser, a día de hoy, el combustible con mayores opciones de convertirse en la alternativa real a los combustibles fósiles en el sector energético en general. El término de economía del hidrógeno es muy utilizado actualmente. La economía del hidrógeno es una economía posible en la cual la energía, para los usos móviles y/o oscilaciones de carga, se almacena en forma hidrógeno (H_2). El hidrógeno se ha propuesto como reemplazo para la gasolina y combustibles diesel utilizados actualmente en automóviles.

La producción del hidrógeno representa un sector industrial importante y es cada vez mayor. En 2004 se produjeron unas 50 millones de toneladas métricas de hidrógeno, conteniendo 200 GW de energía; la tasa de crecimiento es de alrededor de un 10% por año. Debido a que la producción, el almacenaje y transporte de hidrógeno son caros actualmente, la mayor parte del hidrógeno que se produce en la actualidad se hace localmente, y es utilizado inmediatamente, generalmente por la misma

compañía productora.

Actualmente, el 48% de la producción de hidrógeno es a partir del gas natural, el 30% del petróleo, y el 18% del carbón; la electrólisis del agua representa solamente 4%.

El gran mercado potencial también ha estimulado que se cree un gran interés en buscar métodos alternativos, más baratos, para la producción de hidrógeno.

Su aprovechamiento en el sector de la automoción se realiza de dos maneras distintas:

- Combustión de hidrógeno.

Consiste en motores de combustión convencionales (debidamente modificados) para ser utilizados con hidrógeno como principal combustible. Al ser un proceso transformación de energía calorífica en energía mecánica, está sujeto a las leyes de la termodinámica y por lo tanto se estima que presenta un rendimiento global máximo del 50% aproximadamente (25-30% gasolina – 35-40% diesel).

- Pilas de combustible.

Consiste en la transformación de energía química (procedente del hidrógeno) en energía eléctrica (sin pasar por una etapa intermedia – energía mecánica).

El tipo más adecuado para el transporte, es el formado por una membrana intercambiadora de protones o electrolito polimérico (PEMFC, en inglés: proton exchange membrane fuel cell), en el que una membrana polimérica conductora de protones (el electrolito), separa el lado del ánodo del lado del cátodo. En el lado del ánodo, el hidrógeno esparcido en el ánodo catalizador 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) ya que la membrana está aislada eléctricamente. En el catalizador del cátodo, las moléculas del oxígeno reaccionan con los electrones (conducidos a través del circuito externo) y protones para formar el agua. En este ejemplo, el único residuo es vapor de agua o agua líquida. Este proceso se puede observar con más claridad en la Figura 4.4.

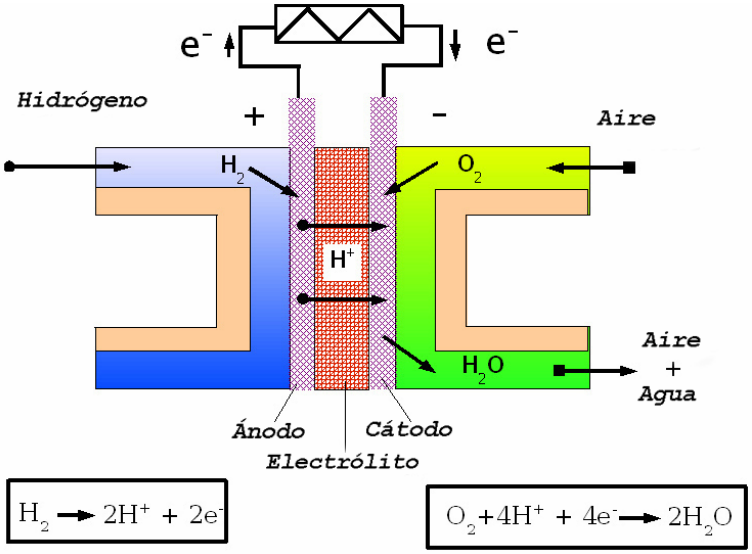

Figura 4.4. Esquema de funcionamiento pila de combustible.

Este proceso se considera en proceso de evolución tecnológica, aunque ya existen algunos prototipos de fabricantes de automóviles que adoptan esta solución.

El rendimiento global teórico de este tipo de tecnología es del 70-75% TTW (Tank to Wheel).

En este apartado se ha realizado una breve exposición de las posibles alternativas que existen actualmente para reducir e incluso eliminar la dependencia de los combustibles fósiles. A modo de conclusión, se exponen los objetivos marcados por la Comisión Europea en relación a la evolución de estas energías alternativas en los próximos años:

Porcentaje de sustitución (%)

Año	*Biocombustibles*	*GN*	*Hidrógeno*	*Total*
2005	2	-	-	2
2010	6	2	-	8
2015	7 (*)	5	2	14
2020	8 (*)	10	5	23

(*) Objetivo supeditado a la capacidad de producción de biocombustibles.

Tabla 4.2. Objetivo de la Comisión Europea sobre energías alternativas para el transporte.

Como se puede observar en la Tabla 4.2, los objetivos conceden a estas alternativas un 23% de sustitución del petróleo para el año 2020. Hasta la llegada de un nivel de sustitución realmente amplio (70-80%) se deben buscar alternativas para reducir el consumo y las emisiones. Es ahí donde los vehículos híbridos toman la iniciativa.

5. Vehículos comerciales ligeros (LCV).

En primer lugar es necesaria una definición de vehículo comercial ligero. A efectos de este proyecto, se entiende por vehículo comercial ligero aquel vehículo destinado al transporte de mercancías con un peso máximo autorizado no superior a 4.5 toneladas aproximadamente.

Dentro de esta definición, existen dos grupos o clases bien diferenciados, los vehículos con carrocería autoportante y aquellos denominados chasis-cabina.

La intención de este proyecto es centrarse en los vehículos chasis-cabina. Las principales razones para esta selección han sido dos:

- Estos vehículos habitualmente presentan una configuración de la línea motriz con el motor delante y tracción trasera. Este hecho añade al desarrollo de esta hibridación una componente innovadora, ya que en el mercado de los vehículos chasis-cabina no existen apenas muestras de este tipo de tecnología (a excepción de algunos modelos prototipo para Salones del Automóvil).

- La configuración chasis-cabina facilita la disposición de los componentes si se compara con la configuración autoportante (donde los elementos deben cumplir exigencias de forma y volumétricas más estrictas).

5.1. Mercado actual.

El mercado actual del vehículo comercial ligero representa un 15% del total de vehículos matriculados en Europa y supone un total de 2,3 millones de unidades producidas.

Actualmente, en relación con el tema que se está tratando, este segmento no presenta innovaciones importantes. En el rango de vehículos entre 2,8 y 4,5 toneladas, todos los fabricantes presentan motorizaciones casi exclusivamente diesel con pares comprendidos entre 250 y 400 Nm y cajas de cambio manuales de 5 y 6 velocidades.

Con el objetivo de cumplir la reglamentación de emisiones EURO IV (introducida para finales de 2006) todos los fabricantes se han servido de dispositivos tipo catalizador, como se ha comentado anteriormente. Estos dispositivos localizados en el escape presentan, en general, una contraprestación: el aumento del consumo.

Es importante indicar que el segmento de los LCV es especialmente sensible a incrementos de consumo o de precio de carburante, ya que tiene una relación directa con los resultados

económicos de las empresas que los utilizan.

5.2. Tendencias del mercado.

Al tratarse de un mercado especialmente sensible a las variaciones de consumo, se prevé que las innovaciones dirigidas en este sentido, tendrán una amplia acogida por parte de los clientes.

Por otro lado, dada la búsqueda del máximo rendimiento económico para las inversiones de las empresas, este segmento es menos propicio que el de los vehículos de pasajeros para el marketing medioambiental. En este caso, los empresarios mirarán con mucho detalle si realmente una nueva tecnología supone para ellos una reducción del coste operativo o no.

Desde el punto de vista de las administraciones, dada la proporción de emisiones contaminantes en los núcleos urbanos procedentes de LCV, es un segmento en el que cualquier mejora puede tener una repercusión muy positiva sobre la calidad del aire de las grandes ciudades. Es por ello que las iniciativas de penalizar a los vehículos que más consuman o que más contaminen puede ser la manera de potenciar las tecnologías limpias. Es el caso, por ejemplo, de la ciudad de Londres.

En resumidas cuentas, existe una tendencia clara en el segmento de los LCV: **menor consumo y menor contaminación**.

En paralelo, otro de los importantes retos a los que se enfrenta el sector es la reducción de ruidos, dada su influencia en los niveles de sonoridad de las grandes urbes.

6. Tecnología de los vehículos híbridos.

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente comentado, que puede resumirse en:

- Las reservas de petróleo son cada vez menores.
- El consumo de energía procedente del petróleo va a incrementarse debido al aumento de población y de calidad de vida de los países emergentes.
- La tecnología actual de motores de combustión interna parece estancada por lo que a reducción de consumos y emisiones se refiere.
- La llegada de algún combustible sustitutivo del petróleo es posible pero su introducción en el mercado será lenta.
- El mercado de los LCV solicita una reducción del consumo (más fuerte será esta solicitación cuanto más alto sea el precio del petróleo).

Se necesita una tecnología que permita paliar esta situación hasta la llegada de los combustibles alternativos. Esta solución puede ser el vehículo híbrido.

6.1. ¿En qué consiste el vehículo híbrido?

En el 2003, las Naciones Unidas definieron el vehículo híbrido de la siguiente forma: “Un vehículo híbrido es aquel que combina al menos dos transformadores de energía y dos sistemas de almacenaje de energía distintos (sobre el vehículo) con el objetivo de propulsar al vehículo”. Este concepto general se aplica usualmente a los vehículos que combinan un motor de combustión interna con un motor eléctrico.

Estas dos fuentes de energía son altamente compatibles, de esta manera el vehículo híbrido aprovecha las ventajas de cada una de las fuentes de energía a la vez que compensa las desventajas de la otra. Se obtiene así un vehículo con elevadas prestaciones a nivel de eficiencia.

El siguiente gráfico muestra la idea básica a partir de la cual surge el concepto de vehículo híbrido.

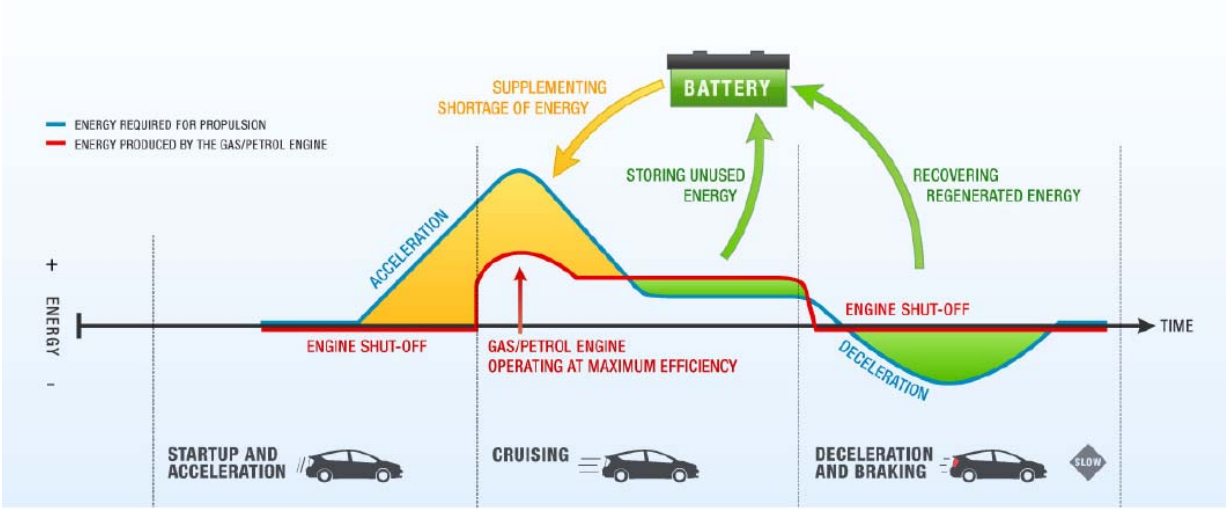

Figura 6.1. Idea básica vehículo híbrido (Fuente: Toyota Motor Company).

Esto es, aprovechar la energía cinética de las retenciones y las frenadas del vehículo para recargar unas baterías que cederán esa energía a unos motores eléctricos que asistirán al motor de combustión en las aceleraciones.

6.1.1. Pasado y presente de los vehículos híbridos.

La historia del desarrollo de los vehículos híbridos ha pasado por diferentes etapas durante el último siglo dependiendo de expectativas o necesidades de cada fase. A continuación se recoge un pequeño resumen de estas diferentes eras:

- El concepto de vehículo híbrido ha venido siendo estudiado desde hace mucho tiempo. Las primeras patentes datan de antes de 1910. Estos primeros vehículos híbridos fueron rápidamente sobrepasados por el rápido progreso en la tecnología de los motores de combustión interna, a la vez que por el desarrollo y distribución del petróleo y sus derivados.

- A finales de los sesenta, debido a los altos índices de polución encontrados en las grandes ciudades del estado de California (EUA), surgieron de nuevo conceptos de vehículos híbridos con el objetivo de disminuir las emisiones. En 1970 se implementó el Clean Air Act. En aquel momento la tecnología no fue considerada suficientemente madura y los fabricantes de automóviles escogieron el uso de catalizadores.

- A principios de los setenta, la inestabilidad política de Oriente Próximo creó un serio temor al embargo de crudo de la mayoría de países productores de petróleo. Como consecuencia, en 1976 fue implementado el Electric and Hybrid Research,

Development and Demonstration Act con el objetivo de reducir la dependencia de los Estados Unidos de las importaciones de petróleo. Los vehículos híbridos fueron vistos entonces como la manera de pasar gran parte del consumo energético del vehículo del petróleo a la electricidad. En aquellos años se reportaron disminuciones de consumo entre el 54 y el 75%.

- A finales de los ochenta, la concienciación social del efecto que el dióxido de carbono tiene sobre el calentamiento global del planeta y el hecho que el transporte por carretera fuera el responsable de entre el 20 y el 30% de las emisiones de CO_2 crearon la necesidad en los fabricantes de producir vehículos con un consumo cada vez menor. Esta carrera de los fabricantes hacia un menor consumo se tradujo esta vez en el desarrollo de motores de combustión interna (diesel y gasolina) cada vez más eficientes.

- Actualmente, se unen una multitud de factores que justifican el desarrollo de vehículos más eficientes y con una dependencia menor de los combustibles fósiles. A modo de ejemplo citaremos los siguientes:

    - Inestabilidad política en Oriente Próximo.

    - Aumento del precio del barril de petróleo.

    - Concienciación social global del respeto y la protección del medio ambiente (Tratado de Kyoto)

    - Incertidumbre sobre el final de las reservas mundiales de petróleo.

  El giro radical hacia nuevas fuentes de energía en lo referente al transporte en general es todavía una incógnita (biocombustibles, hidrógeno-pilas de combustible, hidrógeno…). Según la mayoría de expertos, este cambio se produciría en el mejor de los casos alrededor del año 2015 - 2020.

  De esta manera, se crea un período de tiempo de entre 15 y 20 años en el que los fabricantes de vehículos deben dar respuesta a las demandas de los consumidores (y de los estados) de vehículos con menor consumo y menores emisiones. Si a este hecho le sumamos que el desarrollo y mejora de los motores de combustión interna parece haber alcanzado límites físicos, parece necesario el recurrir a nuevas tecnologías. De ellas, la tecnología híbrida es la de mayores posibilidades de aplicación práctica.

6.1.2. Futuro del vehículo híbrido.

Las principales causas de la limitada difusión de los vehículos híbridos en el mercado de los vehículos convencionales han sido el elevado coste y los relativamente bajos niveles de prestaciones (tanto dinámicas –aceleración, velocidad máxima…- como de consumo y emisiones). El gran reto del vehículo híbrido, tomando como referencia el vehículo convencional, consiste en: reducir ***sustancialmente*** el nivel de consumo y emisiones ofreciendo al usuario ***el mismo*** nivel de prestaciones dinámicas y ***el mismo*** nivel de coste.

De la medida de consecución de este reto depende el éxito o fracaso de la tecnología híbrida en el mercado.

6.2. Principales características del vehículo híbrido.

Existen 6 características principales que definen el vehículo híbrido a nivel de la mejora que conllevan por lo que a reducción del consumo se refiere y que, a continuación, nos permitirán comparar los diferentes tipos anteriormente expuestos.

1) Arranque – parada del motor de combustión.

   Los sistemas híbridos se paran automáticamente cuando el vehículo permanece parado (por ejemplo, en semáforos o en atascos del tráfico). En función de tipo de ciclo de conducción analizado, se pueden llegar a conseguir reducciones de consumo del 5% (obviamente siendo más favorable el ciclo urbano).

2) Recuperación y reutilización de la energía.

   La pérdida de energía cinética del vehículo en desaceleraciones y frenadas (que sería disipada por los frenos en una configuración convencional) puede ser recuperada en forma energía eléctrica a través de un generador. Esta energía eléctrica es, a su vez, utilizada posteriormente por el motor eléctrico para propulsar al vehículo. De nuevo en función del tipo de ciclo de conducción analizado, se pueden llegar a obtener reducciones de consumo del 10% (obviamente siendo más favorable el ciclo urbano).

3) Asistencia del motor eléctrico.

   El motor eléctrico asiste al motor de combustión en los procesos de aceleración del vehículo. Este hecho permite reducir el tamaño (cilindrada) del motor de combustión interna haciendo que este trabaje a alta carga con las consecuentes ventajas a nivel de eficiencia en condiciones de conducción normales. Honda considera este como el factor individual de mejora del consumo más importante en el sistema híbrido.

4) Optimización de las condiciones de trabajo del motor de combustión.

Ligado con el punto anterior y unido al uso de transmisiones más eficientes (tipo CVT, dual-clutch, toroidales...) se consigue que la condición de trabajo del motor de combustión sea la óptima. En la línea motriz convencional, el motor de combustión está dimensionado para alcanzar el máximo nivel de prestaciones del vehículo (adelantamientos, alta velocidad en pendiente…). Como consecuencia, cuando el vehículo funciona en condiciones urbanas, el punto de trabajo del motor difiere en gran medida del punto de mayor eficiencia. El sistema híbrido permite maximizar el rendimiento global del vehículo utilizando el motor eléctrico para mover al vehículo en condiciones en las que el rendimiento del motor de combustión es bajo y generando electricidad en condiciones en las que el rendimiento del motor de combustión es elevado.

5) Modo eléctrico.

Algunas configuraciones híbridas permiten la posibilidad de funcionamiento del vehículo en modo totalmente eléctrico. Este tipo de modo puede ser activado por el conductor del vehículo o de forma automática por la unidad de control.

La principal finalidad de este modo es eliminar las emisiones contaminantes en el lugar de uso del vehículo. El caso paradigmático de uso de este tipo de modo es el interior de las ciudades, donde su uso puede llegar a ser obligado.

6) Consumo de energía eléctrica directamente de la red.

Existen 2 tipos de vehículos híbridos: los autosuficientes y aquellos que deben o pueden ser conectados a la red eléctrica de forma periódica (V2G – 'Vehicle to Grid')

La principal ventaja de los vehículos "conectables" a la red es que en un cierto porcentaje permiten el cambio de la energía primaria utilizada en el automóvil, del petróleo a otros tipos de energías (nuclear, gas natural, pero también eólica, hidráulica o solar).

Las principales desventajas de los vehículos que deben ser conectados a la red eléctrica radican en la necesidad de infraestructuras complejas de abastecimiento masivo de electricidad y la necesidad de grandes baterías (y las consecuentes incertezas relacionadas con su coste, peso, dimensiones y mantenimiento).

Para el objeto de este proyecto, se ha decidido focalizar el estudio en los vehículos considerados autosuficientes.

De ahora en adelante, a lo largo de este documento, el término *vehículo híbrido* hará

referencia a los vehículos híbridos autosuficientes.

6.3. Clasificación de los vehículos híbridos

La clasificación tradicional (o teórica) de los vehículos híbridos nace de la disposición relativa entre el motor de combustión interna y el motor eléctrico. Es decir, de cómo fluye la energía motriz que recibe el vehículo. Esta puede ser en serie, en paralelo o en serie/paralelo, una combinación de las otras dos.

La realidad, es decir, la implementación de estos sistemas en vehículos físicos es realmente más compleja. En el Apartado 6.5 se hace un pequeño estudio de las configuraciones de los vehículos híbridos existentes en el mercado.

Antes de empezar con la clasificación propiamente dicha es importante hacer una breve explicación sobre el *grado de hibridación*. El grado de hibridación es el porcentaje de energía de los motores eléctricos respecto al total de potencia que recibe el vehículo. De esta manera existen 2 tipos: Hibridación suave o media (‘Mild hybridization’) e hibridación completa (‘Full hybridization’). En estos momentos se habla de hibridación suave para valores del 2 al 15% y de hibridación completa para valores 20 al 40%.

6.3.1. Vehículo híbrido ‘suave’ o micro-híbrido.

Es el primer grado de híbridos existente. En esta configuración la función de arranque/parada del motor está implementada a través de un motor de arranque/generador típicamente conducido por correa.

El alternador tradicional se sustituye por una máquina eléctrica capaz no sólo de recuperar energía sino también de actuar como motor para arrancar el motor de explosión, alimentar las cargas auxiliares cuando el motor de combustión está apagado y acelerar el vehículo cuando el motor de combustión está siendo arrancado. El motor de arranque se mantiene para realizar las arrancadas en frío del motor y como elemento redundante. Esta configuración permite un grado limitado de recuperación de energía de la frenada a través de la máquina eléctrica.

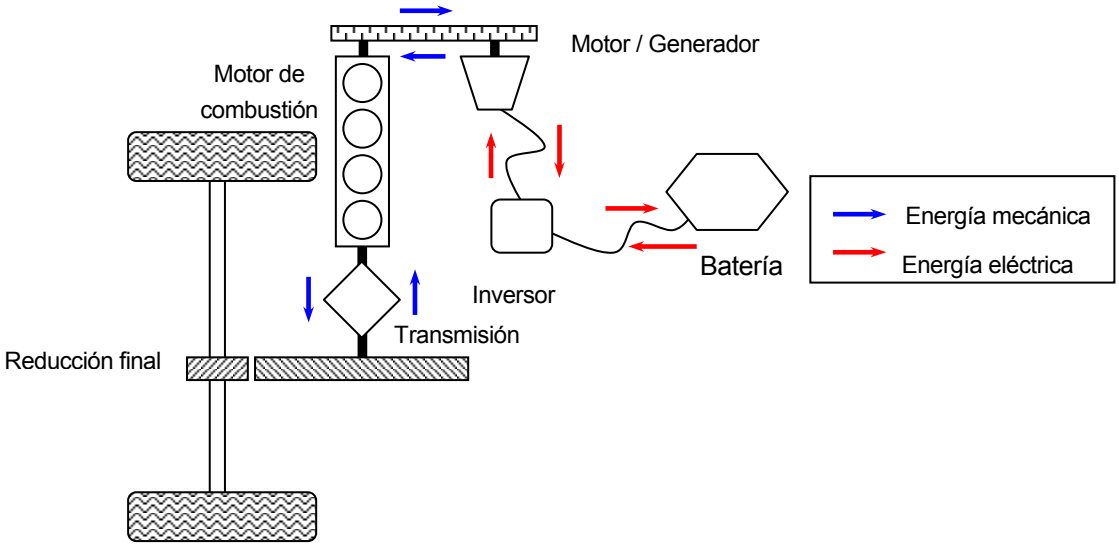

Figura 6.2. Vehículo híbrido 'suave' (Mild-hybrid).

Este tipo de configuración requiere un cantidad relativamente baja de modificaciones sobre el vehículo. La reducción de consumo es, de la misma manera, relativamente baja.

El Toyota Crown es un posible ejemplo.

6.3.2. Vehículo híbrido serie.

El motor de combustión interna mueve un generador de energía interna que reparte la energía entre los requerimientos del motor eléctrico y el almacenaje en las baterías. Se llama serie porque el flujo de energía transcurre en serie de motor de combustión a rueda.

La principal desventaja consiste en que se debe dimensionar cada uno de los componentes para el caso más desfavorable.

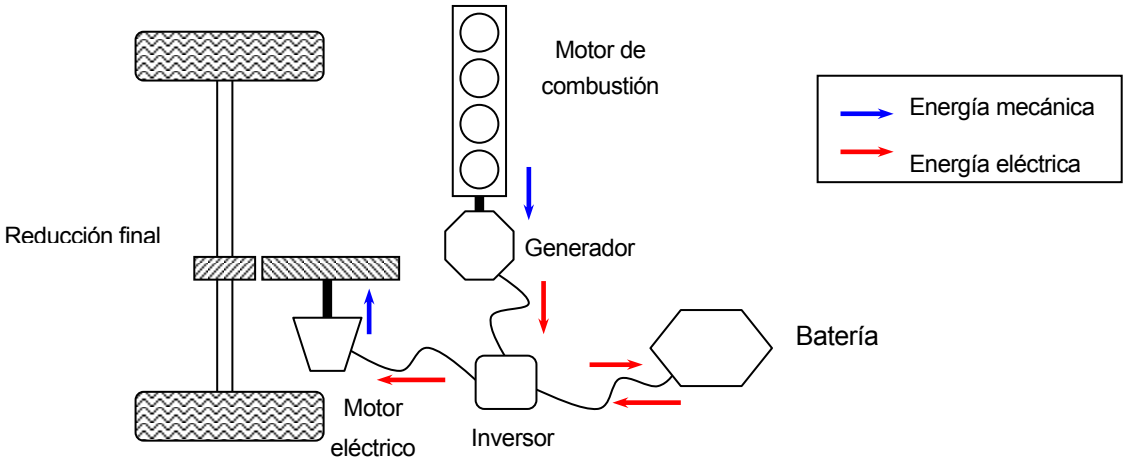

Figura 6.3. Vehículo híbrido serie.

6.3.3. Vehículo híbrido paralelo.

Ambos motores (de combustión y eléctrico) transmiten potencia a las ruedas, así se puede escoger el más adecuado para cada condición. Se llama paralelo porque el flujo de potencia que llega a las ruedas lo hace en paralelo.

En este caso, la batería se carga haciendo actuar el motor eléctrico como generador. Esta energía almacenada es la que luego se aprovecha para mover el motor eléctrico.

La principal desventaja de este sistema radica en que no se puede cargar la batería al mismo tiempo que se transmite potencia a través del motor eléctrico.

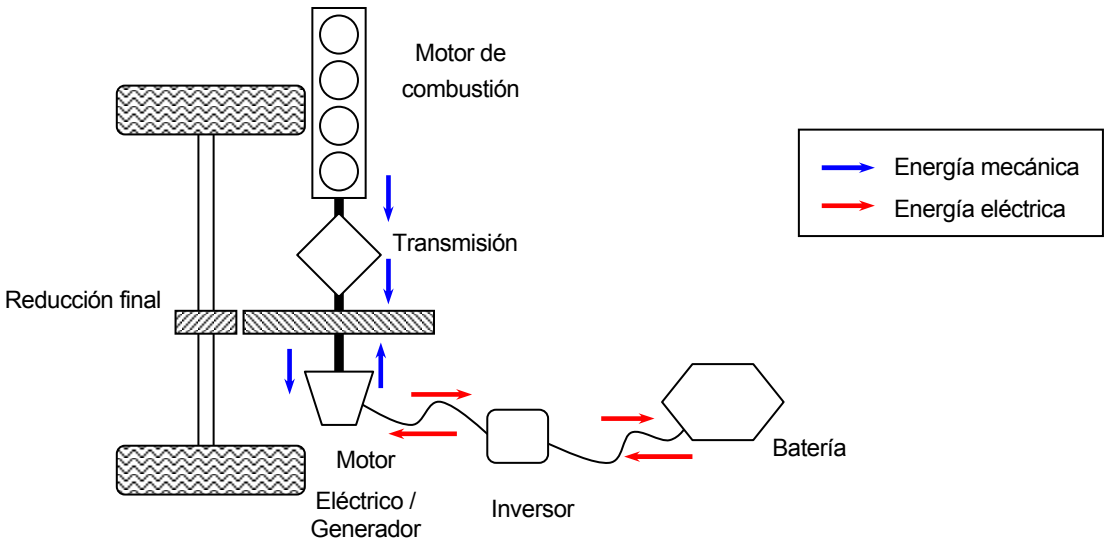

Figura 6.4. Vehículo híbrido paralelo

Generalmente emplean un motor/generador integrado en el cigüeñal entre el motor de combustión y la transmisión. Este motor eléctrico cumple las funciones de alternador, motor de arranque y de asistencia al motor de combustión durante las aceleraciones. Dado que este tipo de configuraciones incorporan elementos eléctricos de mayor potencia pueden recuperar grandes cantidades de energía durante las frenadas. Adicionalmente este motor eléctrico, dada su localización estratégica, puede actuar como amortiguador de las vibraciones de la línea motriz.

Como se puede apreciar en los esquemas, Esta configuración puede ser tanto transversal (Honda Insight o Civic HEV) como longitudinal (Ford PHT – Silverado). En ambos casos las modificaciones necesarias para implementarlos son elevadas y requieren de un desarrollo complejo.

Es el caso del Ford PHT (Silverado), el Honda Insight o el Honda Civic HEV.

6.3.4. Vehículo híbrido serie-paralelo.

Este sistema combina los dos sistemas anteriormente comentados con el objetivo de maximizar las ventajas de cada uno. En función de las condiciones de conducción, usa sólo el motor eléctrico o la potencia de ambos motores (eléctrico y de combustión). Esto permite un nivel de eficiencia muy elevado.

Además, cuando lo cree necesario, el sistema mueve las ruedas a la vez que genera energía recargando la batería a través de un generador.

Este tipo de operaciones pueden producirse de manera simultánea debido a la acción de un "mecanismo divisor de potencia" que es el objeto de este proyecto.

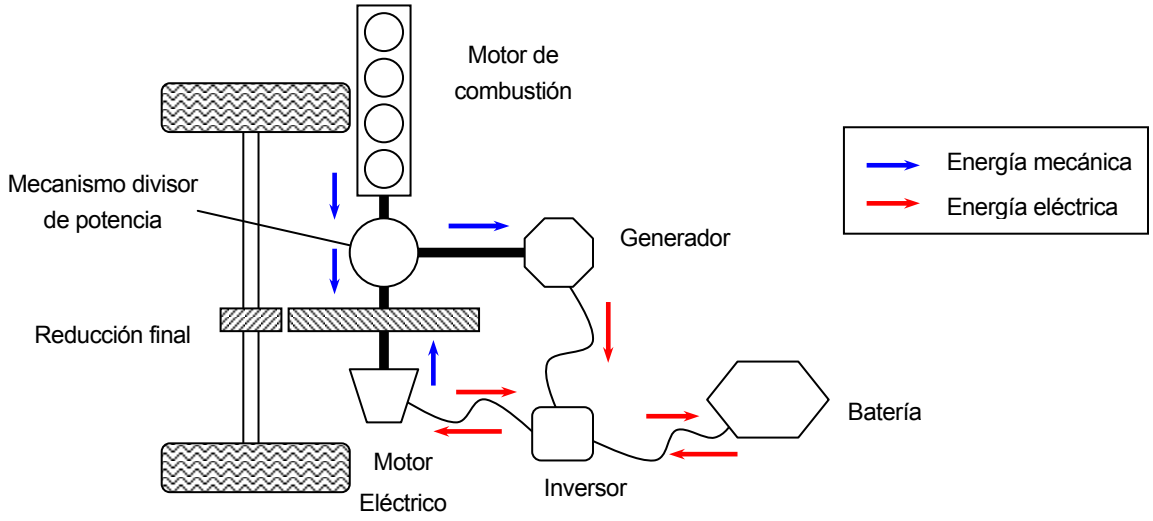

Figura 6.5. Vehículo híbrido serie-paralelo.

La siguiente clase de configuración es la que agrupa serie y paralelo. Es decir, estos vehículos tienen la posibilidad de operar en modo paralelo y en modo serie. Este es el caso del Toyota Prius, el Ford Escape o el Nissan Tino.

En este tipo de vehículos, se utilizan dos máquinas eléctricas. La primera es empleada básicamente como asistencia a la propulsión del vehículo, y la segunda básicamente como generador de energía que alimentará a la batería o a la primera máquina eléctrica. Estos vehículos presentan un grado de hibridación elevado. Las principales funciones que realiza este tipo de configuración son motor de arranque, recuperación de la energía de la frenada, asistencia al motor de combustión y propulsión exclusivamente eléctrica.

La capacidad de poder realizar las funciones de vehículo híbrido serie y paralelo se materializa a través de un control eléctrico sobre un tren epicicloidal (en el caso del Toyota Prius y del Ford Escape) o a través de un embrague (en el caso del Nissan Tino). La principal ventaja del primer sistema es la capacidad de funcionar en modo serie y paralelo al mismo tiempo (se analizará con más detalle esta función y sus ventajas en el Apartado 7.5.

La implementación de estos sistemas es más evolucionada que las anteriores. En el caso de las anteriores clases analizadas, se hablaba de modificaciones. En este caso, es necesario nuevos diseños de elementos importantes de la línea motriz (transmisiones). Las mejoras a

nivel de consumos y emisiones de este tipo de híbridos son considerablemente superiores.

6.3.5. Vehículo híbrido complejo

Esta última categoría engloba aquellos híbridos que son una combinación de las configuraciones presentadas anteriormente. El caso paradigmático es el del Toyota Estima.

Como la primera configuración analizada el Estima utiliza un motor de arranque/alternador conducido por correa para arrancar el motor de combustión así como alimentar los sistemas auxiliares cuando sea necesario. Una segunda máquina eléctrica conectada al motor de combustión a través de un tren epicicloidal puede ser utilizada en modo paralelo o como generador de energía. Por último, una tercera máquina eléctrica puede proporcionar tracción a las ruedas posteriores funcionando en serie.

Como se puede comprobar este tipo de configuración es altamente complejo y presenta un elevado número de modos de operación. La gestión de los diferentes modos de manera correcta es la clave de esta configuración. Se podría decir que este tipo de híbridos aprovechan las ventajas del todo el resto de tipos. La mejora en cuanto a consumos y emisiones de este tipo de híbridos respecto a los serie/paralelo no es sustancial. El coste de este tipo de configuración es considerablemente más elevado.

6.4. Comparativa de los diferentes sistemas.

Las características anteriormente presentadas nos permiten hacer una comparativa de los diferentes sistemas híbridos.

1) Reducción de pérdidas energéticas en situación de ralentí.

   En lo referente a este punto los tres sistemas híbridos (serie, paralelo y serie/paralelo) se comportan de manera similar.

2) Recuperación y reutilización de la energía.

   El sistema paralelo presenta cierta desventaja en este punto debido a que el motor eléctrico debe trabajar a la vez como motor y como generador. Esto hace que el rendimiento del generador sea más bajo que en los casos en los que el generador está diseñado específicamente para la tarea que debe realizar.

3) Asistencia del motor eléctrico.

En el sistema serie no se produce propiamente una asistencia por parte del motor eléctrico al motor de combustión. Es el propio motor eléctrico quien realiza toda la función de aceleración del vehículo.

4) Sistema de control de elevado rendimiento.

En este punto es donde las diferencias entre los diferentes sistemas son más grandes:

- El sistema serie, mantiene el motor de combustión trabajando en la zona de mayor rendimiento siempre que eso sea posible. Cuando la demanda de energía es superior a la generada por el motor de combustión en su zona de máximo rendimiento, el motor de combustión ha de adaptarse y trabajar fuera de sus parámetros óptimos.

- El sistema paralelo, como hemos comentado anteriormente, tiene la desventaja de no poder simultanear la acción del motor eléctrico con la carga de la batería. De esta manera, el motor de combustión trabaja constantemente adaptándose a las demandas del conductor con la ayuda del motor eléctrico, ya que no puede trabajar por encima de estas.

- El sistema serie/paralelo permite que el motor de combustión trabaje de manera suficientemente constante puesto que puede trabajar por encima de la demanda cediendo parte de la energía que produce al generador para que este la reparta entre la batería y el motor eléctrico.

Resumen de la comparativa

	Mejora a nivel de consumo de combustible				
	Reducción de pérdidas energéticas	Recuperación de energía	Asistencia del motor eléctrico	Sistema de control de elevado rendimiento	Eficiencia global
Serie	○	○	×	△	△
Paralelo	○	△	○	△	△/○
Serie / Paralelo	○	○	○	○	○

○ Bueno; △ Regular; × Desfavorable.

Tabla 6.1. Resumen de la comparativa entre los diferentes sistemas.

6.5. Tendencias del mercado actual

6.5.1. Vehículos existentes.

Existen vehículos híbridos en el mercado desde aproximadamente unos siete años, iniciándose la comercialización en Japón. También existen muchos fabricantes que presentan prototipos híbridos en salones del automóvil. Este capítulo pretende examinar en detalle los vehículos híbridos que han sido escogidos por los fabricantes como viables para la producción. Se trata de una lista escasa pero de la que se puede obtener muy valiosa información.

Los puntos a comparar han sido básicamente dos: el grado de hibridación y el dimensionado de los componentes. Al final de este capítulo, a partir de todos datos mostrados, se presenta un dimensionado aproximado basado en la extrapolación de cada uno de los componentes estudiados.

6.5.2. Potencia específica – grado de hibridación.

Como se ha comentado anteriormente, un elemento clave para evaluar los distintos vehículos híbridos existentes en el mercado es el grado de hibridación de la línea motriz. Un vehículo con un bajo porcentaje de potencia procedente del motor eléctrico es denominado “suave” o “medio”, mientras que un vehículo con un porcentaje superior es denominado “completo” o “total”.

En el siguiente gráfico se representa para cada vehículo la potencia específica del motor de combustión y de la suma de motor de combustión más motor eléctrico. Este gráfico permite determinar claramente el grado de hibridación de cada uno de los vehículos. Esto se representa por la longitud de la línea vertical que une ambos puntos.

En base a este gráfico, podemos clasificar el Toyota Crown o el Chevrolet Silverado entre los micro-híbridos o híbridos ‘suaves’. Con una hibridación media destacan el Honda Insight , las versiones híbridas de Honda Civic y Accord, o el Toyota Estima. Por último, entre los vehículos que presentan un grado de hibridación completa se encuentra el Toyota Prius, el Ford Escape o el Lexus RX400h.

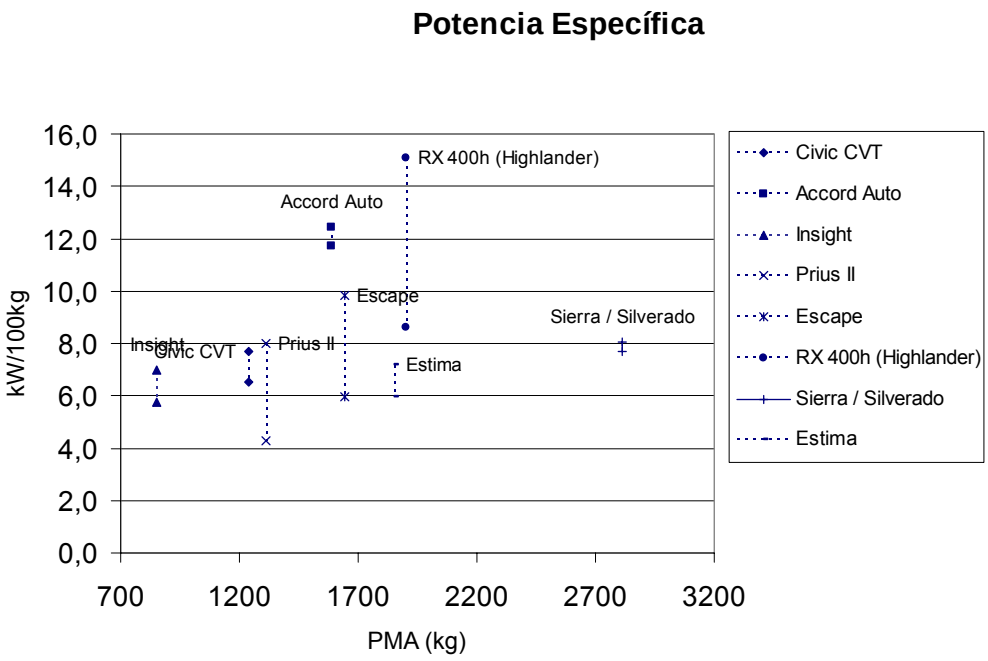

Figura 6.6. Comparativa potencia específica.

6.5.3. Comparativa por componentes.

Cuando se realiza la hibridación de un vehículo existente, se deben añadir un elevado número de nuevos componentes: un motor eléctrico, un inversor con control electrónico y una batería o cualquier otro elemento para el almacenamiento de energía. Algunos elementos existentes como el motor de combustión o la transmisión también pueden ser modificados con la intención de aprovechar al máximo las nuevas condiciones de trabajo. A continuación se realizará una comparativa de los vehículos existentes en el mercado atendiendo a los elementos más importantes.

6.5.3.1. Motor de combustión.

Hasta el momento todos los vehículos híbridos comercializados han utilizado motores de gasolina. La mitad de ellos funcionan con ciclos termodinámicos modificados. Estas modificaciones en los ciclos se sirven del retardo en el cerrado de las válvulas de admisión para reducir las pérdidas del motor. Como resultado se obtienen motores con un menor ratio de compresión pero con un mayor ratio de expansión. Estos ciclos dan al motor una gran eficiencia pero reducen el par a bajas vueltas.

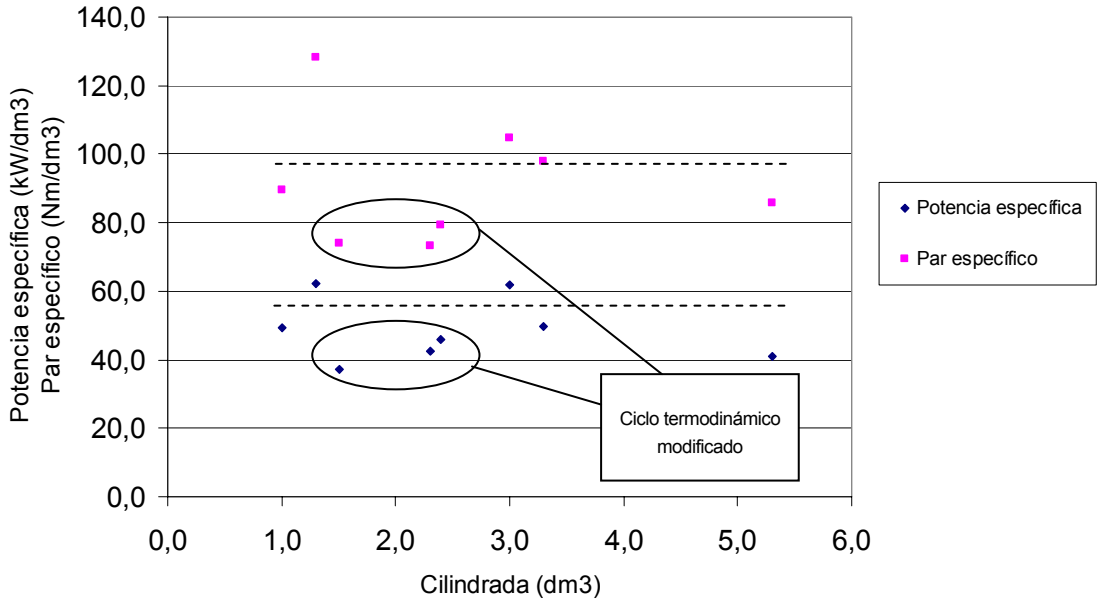

Figura 6.7. Comparativa prestaciones motor de combustión.

Como se ve en la Figura 6.7, la potencia y el par específico (referido a la cilindrada) de los vehículos híbridos con ciclo modificado es menor que el estado actual de la tecnología.

Como se ha comentado en el apartado 6.2, la función de asistencia del motor eléctrico compensa esta reducción de par – potencia específicas, especialmente en los procesos de arrancada y aceleración.

6.5.3.2. Transmisión.

El mercado actual de los híbridos muestra una tendencia clara hacia las transmisiones continuamente variables, por delante de las transmisiones automáticas o automatizadas.

Dentro de las CVT existen diferencias significativas entre unos y otros. Los Toyota Prius y Estima y el Ford Escape utilizan una CVT eléctrica basada en un tren epicicloidal, mientras que el Nissan Tino usa una CVT convencional tras un embrague accionado automáticamente.

6.5.3.3. Motor eléctrico.

Del mismo modo que en las transmisiones, existe una clara tendencia por lo que se refiere al tipo de motor eléctrico escogido. Seis de los ocho vehículos analizados, poseen motores de corriente alterna de imán permanente.

Los motores de corriente alterna de imán permanente sin escobillas ofrecen una gran potencia específica (tanto en volumen como en peso), es decir, son más compactos. Esta característica es especialmente importante a la hora de realizar adaptaciones híbridas de vehículos existentes, aunque conlleven un mayor coste.

6.5.3.4. Baterías.

Las baterías para este tipo de aplicaciones deben incluir una serie de características básicas: alta densidad de energía, alta densidad de potencia, larga vida útil y bajo coste. Las baterías de Níquel Metal-Hidruro son las que, hasta el momento, mejor cumplen con los requisitos de la aplicación a vehículos híbridos.

Así lo demuestra el hecho que cinco de los seis vehículos híbridos más sofisticados (Honda Civic e Insight, Toyota Prius y Estima y Ford Escape) usan baterías de NiMH.

6.5.3.5. Voltaje del sistema.

En el diseño de un vehículo híbrido se toman una inmensidad de decisiones de diseño. Una de las más fundamentales es la que afecta al voltaje del sistema. A continuación, en la Figura 6.8, se muestran el voltaje de los vehículos híbridos analizados:

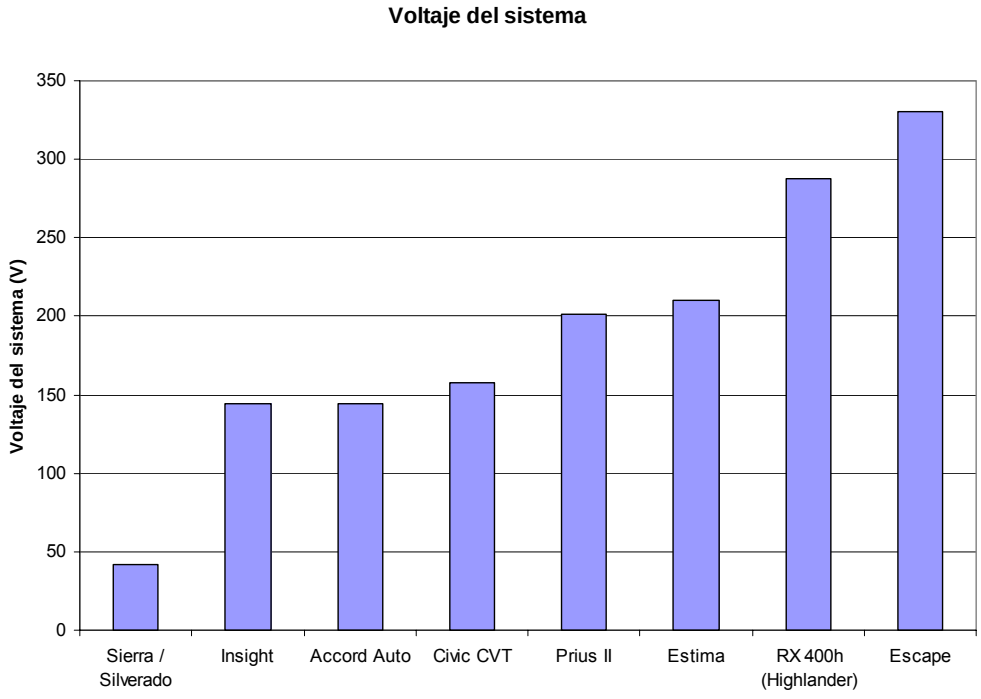

Figura 6.8. Voltaje del sistema.

El voltaje de estos vehículos va de los 42V hasta los 330V del Ford Escape. De alguna manera estos voltajes están relacionados con la potencia eléctrica requerida por el vehículo. Así, para potencias eléctricas elevadas, se utilizan voltajes elevados para minimizar la intensidad que pasa por los cables. Esto se debe a que a menor intensidad se necesitan secciones de cable más pequeñas entre los componentes y, por lo tanto, menores pérdidas por efecto Joule. Además para intensidades eléctricas grandes es necesario equipar el vehículo con sistemas de seguridad adicionales tales como un auto-desconectado de las baterías.

7. Simulación.

7.1. Introducción.

7.1.1. Modelo dinámico longitudinal – Fuerzas resistentes

En este apartado se pretende analizar las diferentes fuerzas resistentes que actúan sobre el vehículo y que se han tenido en cuenta para realizar la simulación. Es importante a la hora de realizar este tipo de simulación estar familiarizado con los factores que intervienen en el consumo del vehículo. A continuación se detallan todos estos factores analizando los valores de referencia para el caso de un vehículo comercial ligero.

Básicamente existen 4 elementos que condicionan el estado de un vehículo automóvil:

- Fuerzas aerodinámicas
- Resistencia a la rodadura
- La pendiente que debe superar el vehículo
- Aceleración del vehículo

Fuerzas aerodinámicas

Como su propio nombre indica son las fuerzas debidas al rozamiento aerodinámico del vehículo con el aire. Como se detalla a continuación, ésta es función del cuadrado de la velocidad.

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_f \cdot V^2 \qquad \textit{(Ec.7.1.)}$$

Donde:

ρ : densidad del aire (1,225 kg/m^3)

C_x: coeficiente aerodinámico

A_f: área frontal (m^2)

V: velocidad del vehículo

En el caso de los vehículos comerciales ligeros, los elementos de que dispone el diseñador para reducir los esfuerzos aerodinámicos son escasos.

El área frontal viene determinada por el carrozado utilizado. El tipo de carrozado es muy variable (función de la aplicación) dando posibilidad a muchos valores de área frontal. Se ha cogido un valor estándar de carrozado que corresponde a la media entre el máximo autorizado y las dimensiones físicas del vehículo de partida sin carrozar.

Por lo que se refiere al coeficiente aerodinámico, existen dos tipos de vehículos comerciales ligeros chasis-cabina: aquellos que derivan de furgoneta (Renault Mascot, Mercedes Sprinter...) llamados Semi-Cab Over Engine (SCOE) y los Cab Over Engine (COE) en los que la cabina se sitúa encima del motor de combustión. Cada uno de los tipos tiene sus pros y sus contras. Lo que los derivados de furgoneta ganan en coeficiente aerodinámico y sensación de seguridad, lo pierden en longitud efectiva del vehículo (es decir, menor maniobrabilidad).

La maniobrabilidad es un elemento esencial del vehículo que se quiere proyectar, dado su marcado carácter urbano. Es por ello que se escoge la segunda opción. Los valores de coeficiente aerodinámico para este tipo de vehículos varían de nuevo con el carrozado, pero se toma el valor de referencia 0.74 para realizar la simulación.

Cualquier mejora introducida sobre el coeficiente aerodinámico tiene una traducción directa sobre la reducción de consumo. Es un campo suficientemente complejo para dedicarle un estudio específico que se escapa de los objetivos de este proyecto.

Resistencia a la rodadura

Son las pérdidas de potencia producidas en el neumático debido a la histéresis interna (90 – 95%) y el rozamiento con la carretera (2 – 10%). Estas fuerzas son proporcionales a la componente normal a la carretera del peso del vehículo.

$$F_{rod} = f \cdot N \qquad \textit{(Ec.7.2.)}$$

f : coeficiente de resistencia a la rodadura. (De forma experimental se obtiene que este coeficiente tiene una componente que varía con el cuadrado de la velocidad $f = f_1 + f_2 \cdot v^2$. Ahora bien, la influencia de este coeficiente es pequeña y sólo se demuestra a alta velocidad).

N : Componente normal a la carretera del peso total del vehículo.

A título informativo, se muestran algunos valores de coeficiente de resistencia a la rodadura:

Tipo de vehículo	Superficie		
	Hormigón / Asfalto	Dureza media	Arena
Turismo	0.015	0.08	0.3
Camión	0.012	0.06	0.25
Tractor	0.020	0.04	0.2

Tabla 7.1. Valores aproximados de coeficientes de fricción.

La pendiente que debe superar el vehículo

Como se puede observar en el siguiente esquema, cuando el vehículo debe superar una pendiente, existe una componente de peso del mismo que se opone al movimiento. Esta tiene un valor de:

$$F_{pend} = m \cdot g \cdot sen\alpha \qquad \textit{(Ec.7.3.)}$$

m : masa del vehículo (kg).

g : aceleración de la gravedad (m/s^2).

α : pendiente de la carretera (rad).

De forma orientativa se muestran valores máximos en función del tipo de carretera:

Autopistas	5%
Autovías	7%
Red viaria principal	18%
Puertos de montaña red secundaria	25%

Tabla 7.2. Pendientes máximas función del tipo de carretera.

Aceleración del vehículo

La capacidad de aceleración del vehículo viene dada por la ecuación general del movimiento longitudinal:

$$F_{imp} \cdot \eta_t - F_{resis} = m \cdot a \qquad \textit{(Ec.7.4.)}$$

Donde:

F_{imp} : Fuerza impulsora (cedida por el motor de combustión o eléctrico)

η_t : rendimiento de la transmisión de la fuerza del motor hasta los neumáticos.

F_{resis} : Fuerzas resistentes (aerodinámica, rodadura, pendiente).

m : masa total del vehículo (kg).

a : aceleración del vehículo (m/s^2).

7.1.2. ADVISOR ®

Existen actualmente diferentes herramientas de simulación para llevar a cabo un análisis de consumos y emisiones. Una de las más conocidas (aunque no la única) es ADVISOR®. Este programa fue desarrollado inicialmente por el departamento de energía de los Estados Unidos - National Renewable Energy Laboratory (NREL) en 1994. Entre 1998 y el 2003 fue descargado de la red por más de 7000 personas, empresas y universidades de todo el mundo. En 2003 los derechos exclusivos de comercialización de ADVISOR® fueron cedidos a AVL quien desde entonces se encarga de su mantenimiento y actualización.

ADVISOR®, cuyo nombre proviene de ADvanced VehIcle Simulator, es un programa diseñado para funcionar sobre Matlab y Simulink. Su principal función es el análisis rápido de prestaciones, consumos y emisiones de vehículos convencionales, eléctricos e híbridos. Este programa también permite la simulación y análisis de todos los componentes de la línea motriz definidos por el usuario gracias a la flexibilidad que le otorga Simulink.

Sus principales atractivos son:

- Estimación de consumo y emisiones de vehículos que todavía no han sido fabricados.
- Aprendizaje sobre como los vehículos convencionales, eléctricos e híbridos usan (y pierden) la energía a lo largo de la línea motriz.
- Comparativa las emisiones y consumos en diferentes tipos de ciclos de conducción.
- Evaluación de las diferentes estrategias de gestión de componentes del vehículos híbrido.
- Optimización del escalonamiento de las marchas para minimizar el consumo o

maximizar las prestaciones.

Algunos de los principales usuarios de ADVISOR® incluyen:

- Daimler-Chrysler
- Ford Motor Company
- General Motors Corp.
- Delphi Automotive Systems
- Visteon
- Muchos otros...

La sistemática de trabajo de este software es sencilla. En primer lugar se introducen los datos referentes al vehículo, componente a componente.

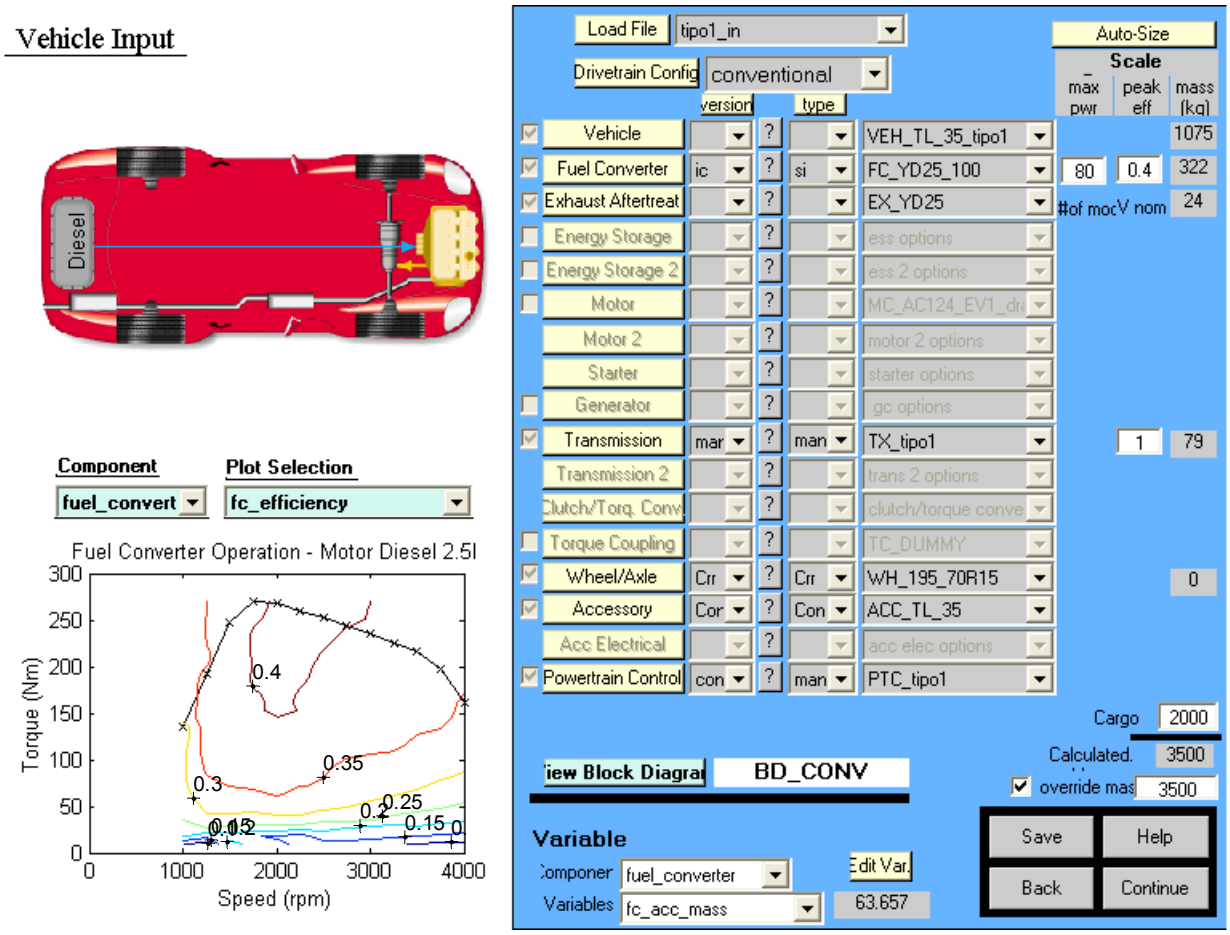

Figura 7.1. Interfaz ADVISOR de introducción de los datos del vehículo.

Esto incluye características relacionadas con el propio vehículo (peso, Cx, área frontal…), el motor de combustión, la transmisión, los neumáticos, y también el motor eléctrico y el generador (si es necesario).

Además de las características de los componentes independientemente, existe un apartado de características relacionado con el control de dichos componentes y la relación de unos con otros. Por ejemplo, velocidad del vehículo a la que se producen los diferentes cambios de marcha, parada del motor con el vehículo parado o no, etc…

Una vez validada la introducción de datos, el programa nos hace seleccionar el tipo de ciclo de conducción seleccionado, así como las características de los ensayos de prestaciones que queremos realizar: aceleración, velocidad máxima, pendiente superable, etc…

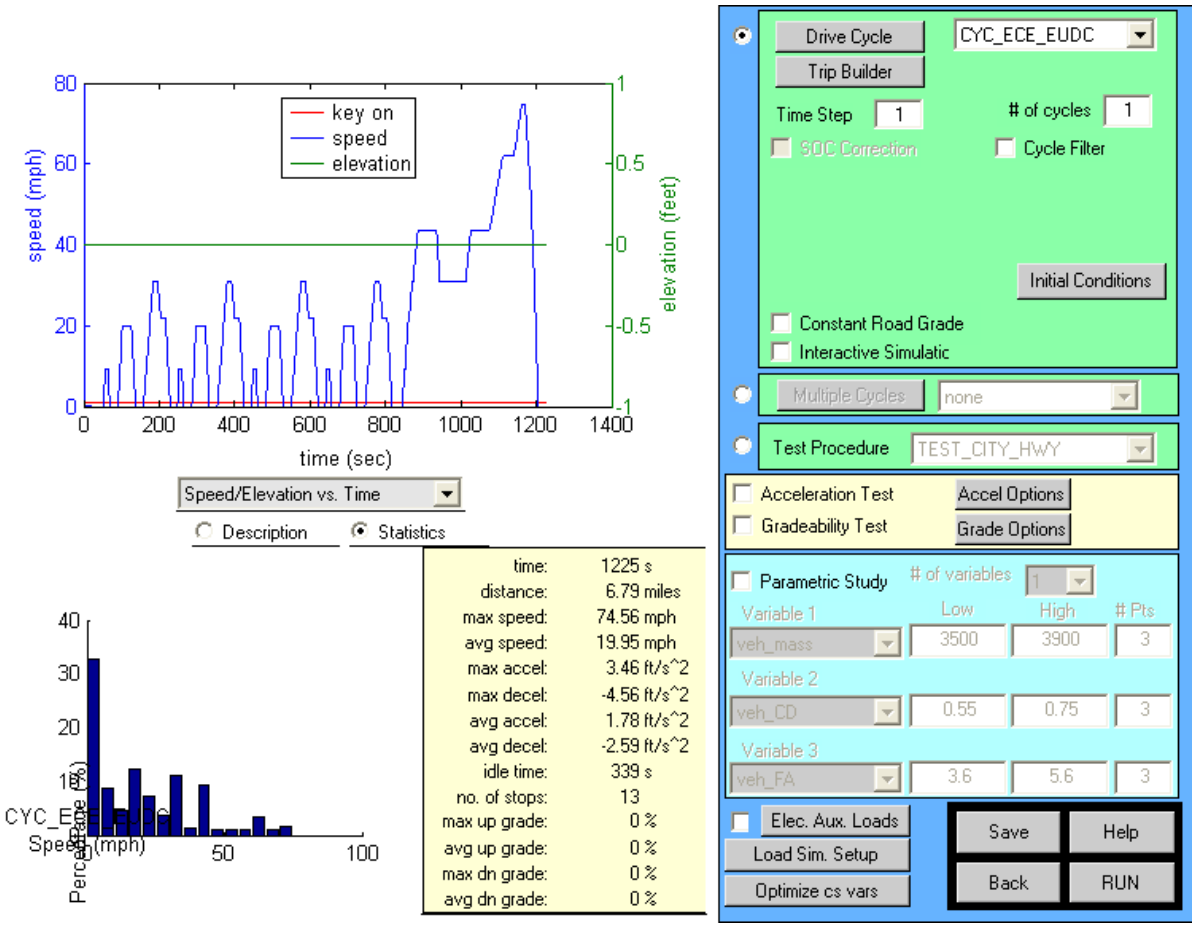

Figura 7.2. Interfaz ADVISOR de introducción de los datos del ciclo.

Una vez validados estos datos, el programa inicia la simulación propiamente dicha.

7.1.3. Selección del ciclo de conducción

Existen múltiples ciclos de conducción estándares creados por los diferentes estados, asociaciones de consumidores, etc. El objetivo de estas organizaciones es tratar de definir un ciclo que represente el tipo de conducción que se desarrollo en su área de influencia para poder comparar las prestaciones, consumos y emisiones de todos los vehículos que en ella se venden.

En primera instancia, se ha escogido para este proyecto el NEDC (New European Driving Cycle). Este es el ciclo estándar utilizado en la mayoría de países de Europa para comparar los consumos.

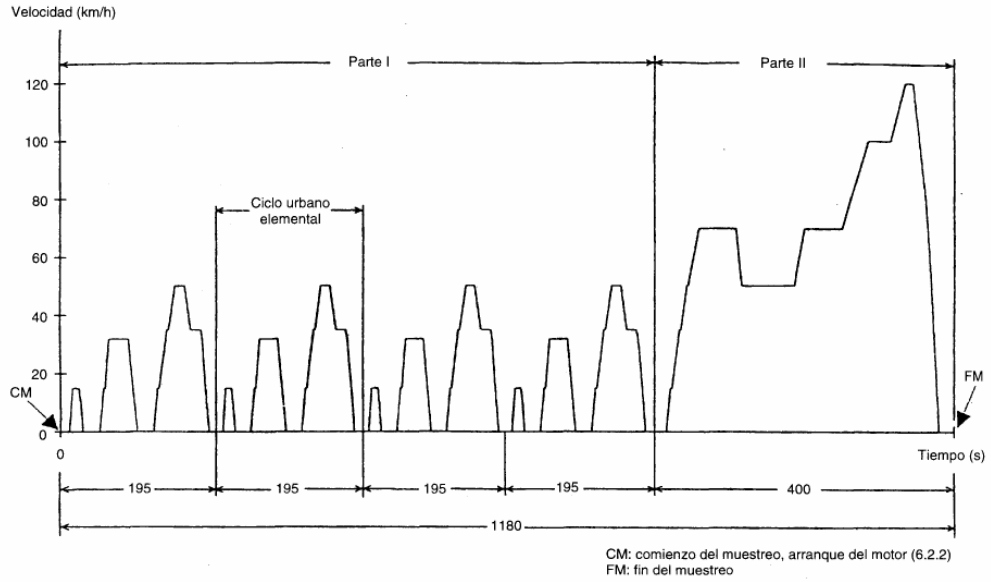

Figura 7.3. Nuevo Ciclo Europeo de Conducción (NEDC).

Este ciclo consta de 2 partes: una que quiere modelizar la conducción por ciudad (llamado ECE-15) y otra que trata de simular una zona interurbana (EUDC – Extra Urban Driving Cycle). La primera parte tiene una mayor importancia en el global ya que se repite 4 veces.

En las simulaciones realizadas se ha tenido en cuenta tanto el ciclo total como cada uno de los ciclos que lo forman (urbano y extra-urbano).

Como se verá más adelante en este proyecto, la selección del ciclo de conducción tiene una influencia muy importante en los resultados obtenidos por las diferentes configuraciones de vehículos híbridos. Hasta el punto de obtener mejoras de consumo del 30% con una configuración de vehículo para un ciclo dado y, la misma configuración, no obtener ventajas significativas para otro ciclo. Es por ello, por ejemplo, que Estados Unidos se está

planteando modificar su ciclo estándar para penalizar a los fabricantes japoneses (cuyas ventas de vehículos híbridos son realmente buenas) y favorecer los intereses de las compañías americanas.

7.1.4. Otros condicionantes de la simulación

- Pesos.

A efectos de la simulación se ha considerado constante la carga útil a transportar de 2000 kg (que es el valor aproximado de carga útil de la versión convencional).

Este hecho permite comparar las distintas tecnologías analizadas en la simulación aunque los pesos de cada una de estas tecnologías sean diferentes. Como se verá a continuación, el hecho de incluir una máquina eléctrica y una batería de tracción a un vehículo convencional conlleva un importante incremento del peso.

- Mapas de consumo motores.

Se ha tomado como hipótesis para la simulación del consumo de combustible que el consumo de un determinado motor de combustión es función de su potencia.

Para ello se ha partido de los datos disponibles; en este caso: el motor OM611 de Mercedes-Benz (2.2dm^3 – 92kW). [Datos experimentales obtenidos por el 'Southwest Research Institute']. A partir de los valores de este motor se han generado los mapas de consumo de todos los motores analizados en las diferentes simulaciones.

- SOC – State of Charge.

Como norma de la simulación, se ha exigido que el estado de carga de la batería fuera el mismo al inicio y al final del ciclo. Esto hace que los resultados obtenidos sean directamente comparables.

En el caso de no haber exigido esa condición, hubiera habido que estimar en consumo (gramos de combustible) la variación de energía cedida o almacenada en la batería durante el ciclo.

7.2. Modelo Convencional (referencia).

Para la selección del vehículo de referencia se han considerado los siguientes aspectos:

- Vehículo comercial ligero urbano. Se ha considerado un vehículo capaz de transportar una carga considerable pero a la vez que tenga fácil maniobrabilidad

en ciudad y dirigido al segmento comercial (no profesional transportista). La versión que mejor representa este concepto es aquella con una Masa Máxima Autorizada de 3.500 kg.

- Modelo chasis-cabina. Dado que supone una mayor facilidad por lo que a la adaptación o instalación de los diferentes componentes se refiere (respecto a la versión autobastidor).

Vehículos que cumplan con estos requisitos existen muchos en el mercado: Nissan Cabstar, Iveco Daily, Mercedes Sprinter, Mitsubishi Canter… (Los datos presentados en este proyecto corresponden mayoritariamente al Nissan Cabstar).

Este vehículo de referencia servirá para comparar las distintas soluciones híbridas analizadas por lo que a consumos se refiere. Como se verá más adelante, el resultado obtenido se ha contrastado con resultados oficiales publicados por los fabricantes para vehículos de características similares y se ha obtenido una buena correlación.

7.2.1. Dimensionado de componentes

Para el dimensionado de los componentes se ha partido de cero, es decir, se han establecido unos criterios de prestaciones (pendiente superable y velocidad máxima) a partir de la cual se han obtenido los valores de potencia del motor y relaciones de transmisión y grupo diferencial.

Para la selección de estos criterios de prestaciones se ha tenido en cuenta que es un vehículo cuyo principal objetivo es reducir los consumos y las emisiones. Por lo tanto, estos valores no han sido extraídos de la media de estudios de mercado de la competencia directa sino de criterios objetivos.

- Criterio de velocidad máxima (37 m/s)

- Criterio de pendiente superable mínima (25%)

Utilizando las fórmulas expuestas a continuación (que se extraen del dossier “Vehicles I. Prestacions” de Francesc Liesa y Daniel Clos), se extrae el valor de potencia requerida para conseguir las prestaciones solicitadas:

$$P_{máx} = \frac{1}{\eta_t} \cdot v_{máx} \cdot \left(F_{pend} + F_{aero} \right) \qquad \textit{(Ec.7.5.)}$$

$$\Gamma_{máx} = \frac{\left(\tan \alpha_{máx} + f \right)}{\eta_t \cdot i_1 \cdot i_{FD}} \cdot m \cdot g \cdot r_d \cdot \cos \alpha_{máx} \qquad \textit{(Ec.7.6.)}$$

Para los siguientes datos:

Masa máxima autorizada	MMA	kg	3500
Coeficiente de rodadura	f	-	0,009
Coeficiente aerodinámico	C_x	-	0,55
Área frontal	A_f	m^2	3,6
Radio dinámico	r_d	m	0,315
Ratio de 1ª	i_1	-	4,7
Ratio de diferencial	i_{FD}	-	3,9
Rendimiento de la tranmisión	η_t	-	0,9

Tabla 7.3. Datos básicos para dimensionado de prestaciones.

Se obtiene la siguiente especificación de par y potencia máximos.

Pendiente superable

Pendiente		%	25%
Aceleración		m/s^2	0
Fuerza aerodinámica		N	0
Fuerza de rodadura		N	300
Fuerza de pendiente		N	8327
Par máximo	**Γ_{MAX}**	**Nm**	**167**

Tabla 7.4. Par máximo para pendiente superable dada.

Velocidad máxima

Pendiente		-	0
Aceleración		m/s^2	0
Velocidad		m/s	37
Fuerza aerodinámica		N	1637
Fuerza de rodadura		N	309
Fuerza de pendiente		N	0
Potencia requerida	**N_{MAX}**	**kW**	**80**

Tabla 7.5. Potencia máxima para velocidad máxima dada.

Se observa a la vista de los resultados que un motor de 80 kW sería suficiente para conseguir los requerimientos solicitados. Partiendo de motores diesel de características similares, se obtiene la siguiente curva de par y potencia del motor.

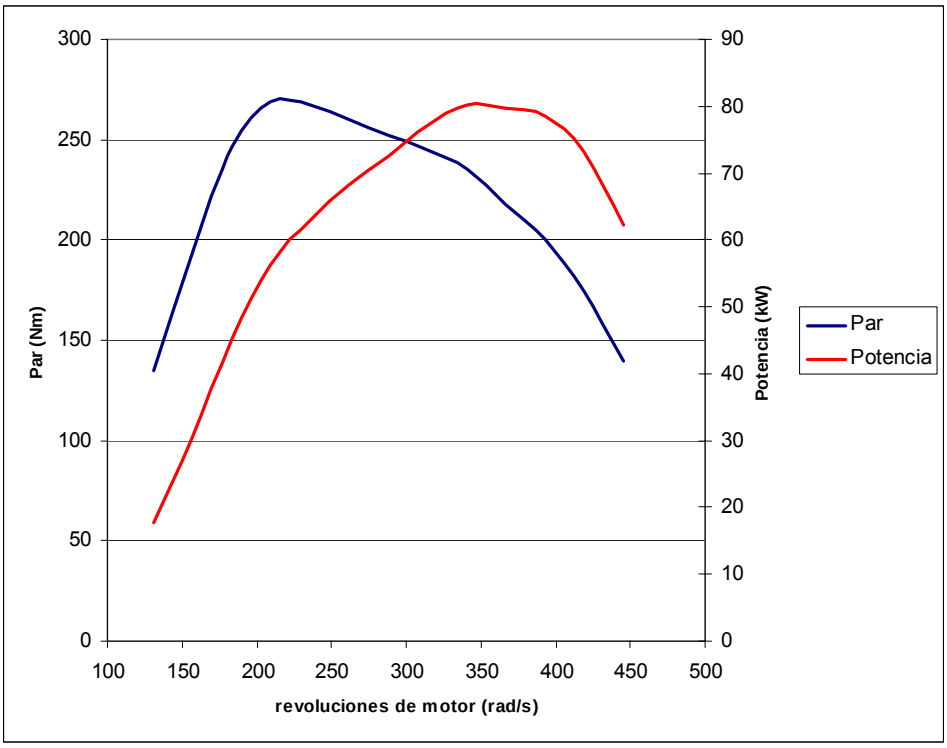

Figura 7.4. Curvas características motor de combustión.

Esto es, por ejemplo, un motor de 2.5 dm^3 de cilindrada con 80 kW de potencia y 270 Nm de par máximo.

Una vez realizado este dimensionado básico de los componentes de la línea motriz de un vehículo convencional y disponiendo del resto de datos del vehículo, se está en situación de iniciar la simulación propiamente dicha. En la tabla 7.6 se muestra una relación de los principales componentes de la línea motriz utilizados.

Motor de combustión	Tipo / Cilindrada	Diesel 4 cilindros / 2.5 dm3
	Par máximo	270 Nm a 209 rad/s
	Potencia máxima	80 kW a 335 rad/s
Embrague	Tipo / Dimensión	Disco seco / Ø 242
Caja de cambios	Tipo	Manual 5 velocidades
Diferencial	Relación de grupo	3,9
Neumáticos	Tipo	195/70 R15

Tabla 7.6. Principales componentes línea motriz modelo convencional.

Para más detalles acerca del dimensionado del modelo convencional consultar el Anexo A.

Por último, dado que la influencia del peso a lo largo de las diferentes simulaciones es elevada, es necesario realizar un análisis de los pesos considerados de manera que los pesos de las diferentes versiones híbridas puedan ser comparados.

		Unidades	CONVENCIONAL
	Peso en vacío (sin línea motriz)	kg	1075
	Carga útil	kg	2000
Línea motriz	Motor de combustión	kg	346
	Motor eléctrico	kg	0
	Generador	kg	0
	Transmisión + Diferencial	kg	79
	Batería de tracción	kg	0
	TOTAL	**kg**	**3500**

Tabla 7.7. Relación de pesos modelo convencional.

7.2.2. Resultado de la simulación

Una vez realizada la simulación, se obtiene el siguiente resultado:

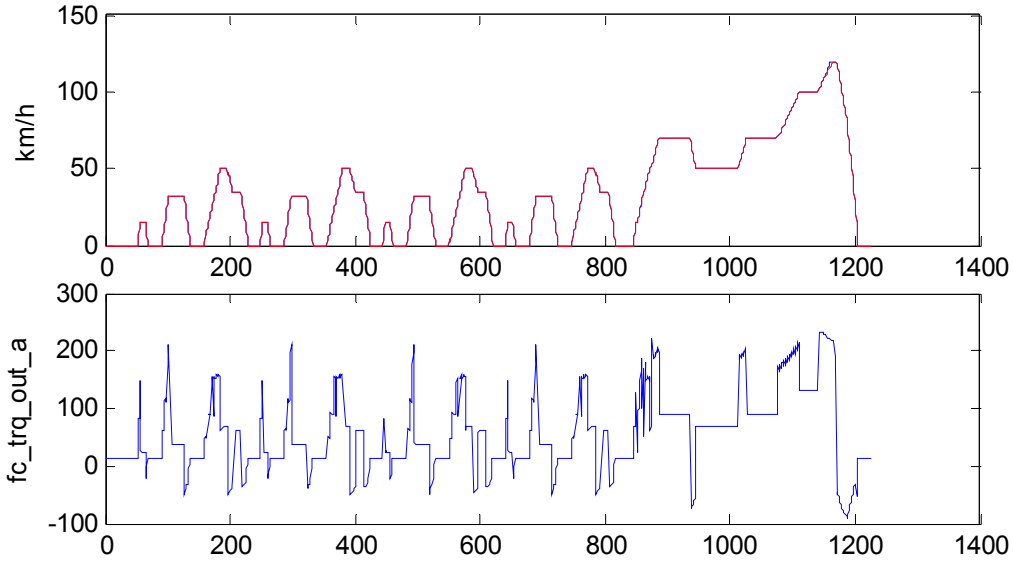

Figura 7.5. Resultado de la simulación modelo convencional.

Diferentes situaciones deben ser evaluadas en cuanto a potencia requerida al motor de

combustión en cada segundo:

- Ralentí. Se observa una demanda de potencia pequeña pero constante durante todo el tiempo que el vehículo permanece al ralentí.

- Aceleraciones. En situaciones de aceleración de la velocidad del vehículo, se puede observar la existencia de picos de demanda muy pronunciados, produciendo solicitaciones transitorias al motor de combustión.

- Deceleraciones. Durante las frenadas, se observa como existe una solicitación negativa al motor. Es decir, existe una parte de la frenada definida por el usuario de la simulación que es realizada por el trabajo en vacío del motor de combustión. Este hecho, no aumenta el consumo ya que la inyección queda cortada.

- Velocidad constante. En estas situaciones, el motor de combustión trabaja en régimen constante. Esto significa que puede obtener rendimientos muy elevados.

El siguiente gráfico muestra los puntos de trabajo del motor en el ciclo realizado. Existe mucha dispersión de los puntos, lo que da idea de los transitorios a los que ha sido sometido el motor. También se puede observar como existen muchos puntos lejos de las curvas de isoconsumo de mayor eficiencia.

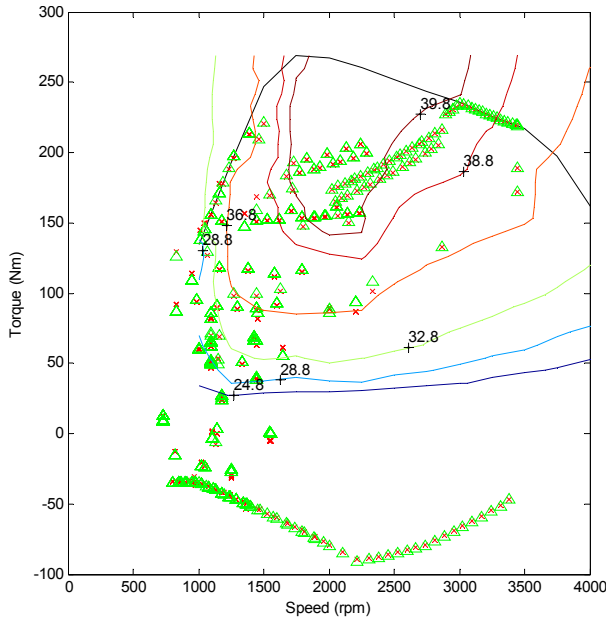

Figura 7.6. Puntos de trabajo del motor de combustión modelo convencional.

Con todo lo anteriormente expuesto, se obtiene un consumo de 11.3 dm^3 / 100 km. Este resultado muestra una buena correlación con los resultados obtenidos por los vehículos de este segmento.

7.3. Modelo Serie.

Como se ha descrito anteriormente, la principal desventaja del sistema híbrido serie es la necesidad de dimensionar todos sus componentes para la solicitación más severa. Como se podrá apreciar a continuación, esto tiene una influencia directa sobre el peso de los componentes y, en consecuencia, en los resultados de consumo obtenidos.

7.3.1. Modos de funcionamiento

El siguiente gráfico muestra el funcionamiento de la simulación del sistema híbrido serie. El simulador, calcula la potencia (par – velocidad) requerida por el vehículo en todo momento a través de las fórmulas anteriormente descritas.

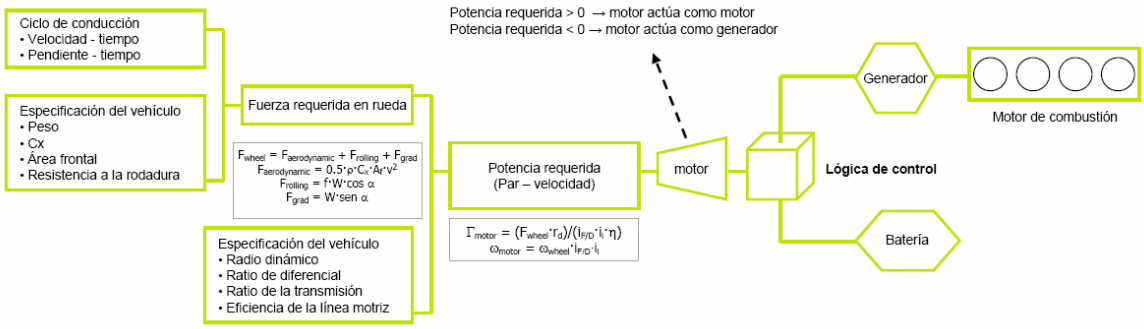

Figura 7.7. Diagrama de bloques funcionamiento simulación modelo híbrido serie.

A continuación, el programa decide a través de una lógica de control (mostrada en el siguiente diagrama) en qué situación se encuentra el motor de combustión:

1) OFF. Si el estado de carga (SOC – State of Charge) de las baterías está por encima de un determinado límitie (cs_hi_soc) y la potencia requerida por el motor es inferior a un determinado límite, el motor de combustión se apaga y, por lo tanto, el vehículo es propulsado simplemente por la acción de las baterías.

2) ON. Si la potencia requerida es superior a un determinado límite o la estado de carga de las baterías es inferior a un cierto valor (cs_lo_soc), entonces el motor se enciende (si estaba apagado) o se mantiene encendido.

3) El resto de situaciones dependen de la situación anterior. Es decir, si en el instante anterior el motor de combustión estaba apagado, en este instante se mantiene apagado. Si en instante inmediatamente anterior el motor de combustión estaba encendido, en el instante evaluado el motor seguirá encendido.

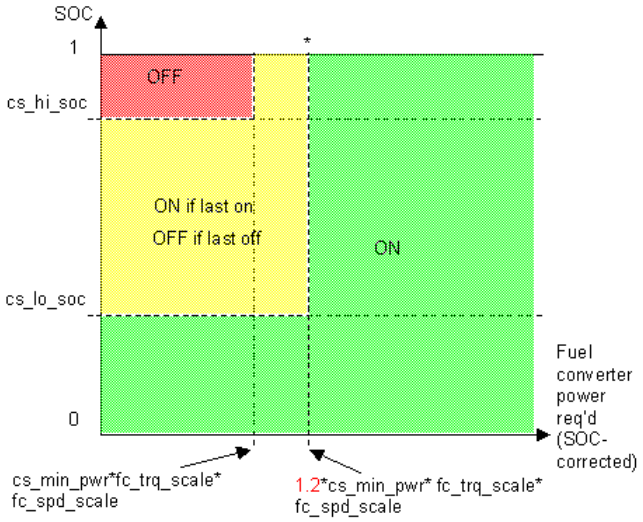

Figura 7.8. Lógica de control del modelo híbrido serie (Fuente: Advisor®).

Como se puede observar, la lógica de control no presenta grandes complicaciones a nivel teórico.

7.3.2. Dimensionado de componentes

A continuación se muestra un pequeño análisis de los diferentes componentes utilizados y sus características principales. Este dimensionado está basado en una publicación de la universidad de Texas: "Hybrid Electric Vehicle Design Based on a Multi-objective Optimization Evolutionary Algorithm".

- Motor de combustión. Se ha utilizado la versión del modelo convencional (2.5 dm^3 y 80 kW de potencia). La potencia generada por este motor es la que alimenta el generador que o bien carga las baterías o bien cede la energía generada al motor eléctrico.

- Motor eléctrico. Tal y como se ha visto en el apartado 7.2.1 de esta memoria, la potencia mínima necesaria para cumplir con los requisitos pre-establecidos es de 80 kW. Por ello, el motor escogido es un motor de inducción de imán permanente de 85 kW de potencia. (Como se verá a continuación el peso total del vehículo ha aumentado considerablemente debido al tamaño de los componentes. Este

hecho ha obligado a incrementar la potencia del motor eléctrico en 5 kW)

- Generador. El generador seleccionado es una máquina eléctrica con un rendimiento aproximado del 90%.

- Baterías. Por último, las baterías de NiMH (níquel metal-hidruro) capaces de alimentar al vehículo en los momentos de máxima solicitación deben tener una capacidad de 216.000 As (≈ *60 Ah*). Esta capacidad permite que la batería trabaje en los ciclos analizados entre el 60 y el 80% de su estado de carga.

A continuación, en la Tabla 7.8 se muestran un breve resumen de los componentes utilizados.

Motor de combustión	Tipo / Cilindrada	Diesel 4 cilindros / 2.2 dm3
	Par máximo	219 Nm a 209 rad/s
	Potencia máxima	65 kW a 335 rad/s
Generador	Tipo / Rendimiento	Síncrono de Corriente Alterna (Brushless) / 90%
Batería	Tipo / Capacidad (C/3)	NiMH / 216.000 As
Motor de tracción	Tipo / Potencia	Síncrono de Corriente Alterna (Brushless) / 65kW
Diferencial	Relación de grupo	3,9
Neumáticos	Tipo	195/70 R15

Tabla 7.8. Principales componentes línea motriz modelo serie.

Para más detalles acerca del dimensionado de los componentes del modelo híbrido serie, consultar el Anexo A.

Como se puede observar en la Tabla 7.9 el incremento de peso del modelo serie respecto del modelo convencional es de aproximadamente 400 kg.

		Unidades	CONVENCIONAL	HÍBRIDO SERIE
	Peso en vacío (sin línea motriz)	kg	1075	1075
	Carga útil	kg	2000	2000
Línea motriz	Motor de combustión	kg	346	289
	Motor eléctrico	kg	0	113
	Generador	kg	0	45
	Transmisión + Diferencial	kg	79	50
	Batería de tracción	kg	0	290
	TOTAL	**kg**	**3500**	**3862 (+10%)**

Tabla 7.9. Comparativa de pesos modelo convencional – modelo híbrido serie.

7.3.3. Resultado de la simulación

En la Figura 7.9 que muestran el resultado de la simulación se puede observar el funcionamiento del motor de combustión más constante que en el caso convencional. No hay tantos transitorios, ya que estos son absorbidos por el motor eléctrico. Esto permite que el motor pueda trabajar más tiempo en un punto óptimo.

El estado de carga de la batería se mantiene entre los valores establecido durante todo el ciclo, finalizando al mismo nivel que al inicio 70%.

Los resultados obtenidos a nivel de consumo se ajustan a lo previsto: la necesidad de diseñar todos los componentes para el mayor requerimiento hace que el peso total del vehículo sea excesivamente elevado.

Consumo obtenido: 13.0 dm^3 / 100 km (+15% respecto vehículo ‘convencional’)

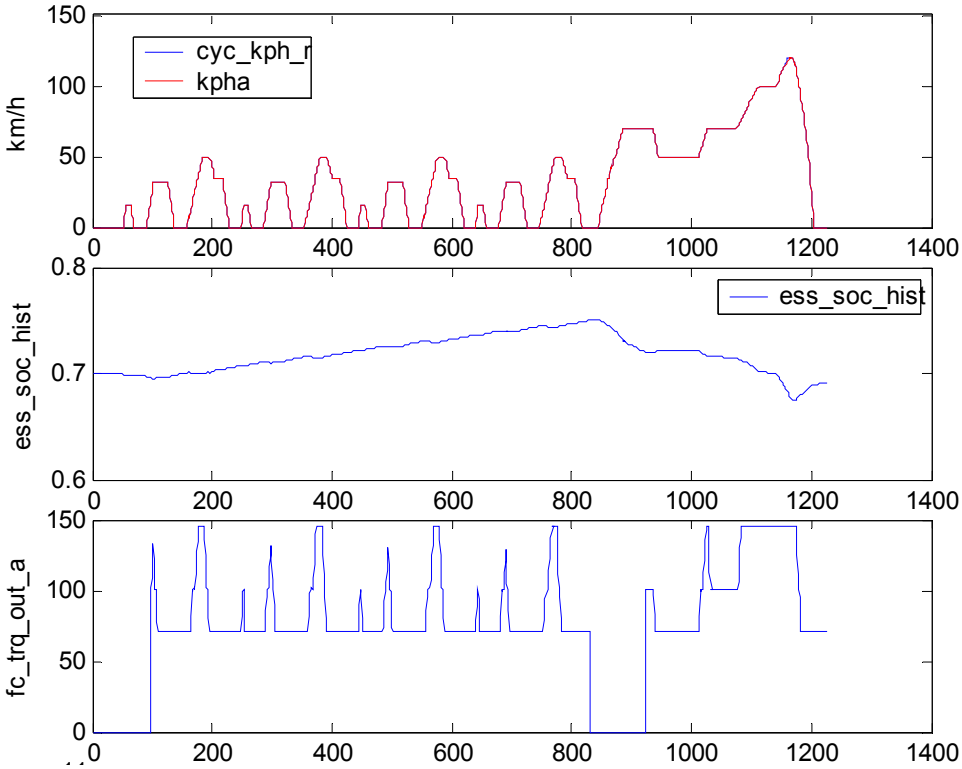

Figura 7.9. Resultado de la simulación modelo híbrido serie.

7.4. Modelo Paralelo.

El híbrido paralelo es el tipo de híbrido más extendido en el mercado dado la buena relación entre coste y rendimiento. El hecho de utilizar únicamente una máquina eléctrica implica un beneficio importante a nivel de coste.

Como se verá a continuación, se pueden obtener reducciones de consumo importantes que varían en su magnitud en función del grado de hibridación. Para analizar precisamente la influencia del grado de hibridación, se han analizado dos versiones de híbrido paralelo: una con un grado de hibridación del 20% y otra del 40%.

7.4.1. Modos de funcionamiento

El siguiente gráfico muestra el funcionamiento de la simulación del modelo híbrido paralelo. En función de la potencia requerida y del estado de carga de la batería, el sistema selecciona si trabaja únicamente el motor de combustión, únicamente el motor eléctrico o una combinación de ambos dos.

Si la potencia requerida es negativa, el motor actúa como generador recargando las baterías

de tracción.

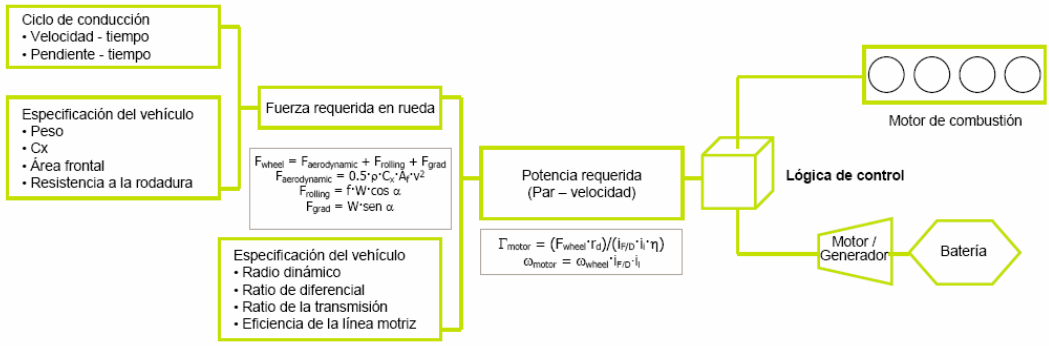

Figura 7.10. Diagrama de bloques funcionamiento simulación modelo híbrido paralelo.

Los diagramas siguientes distinguen la lógica de control entre un estado de carga por encima del límite inferior que se ha fijado o por debajo.

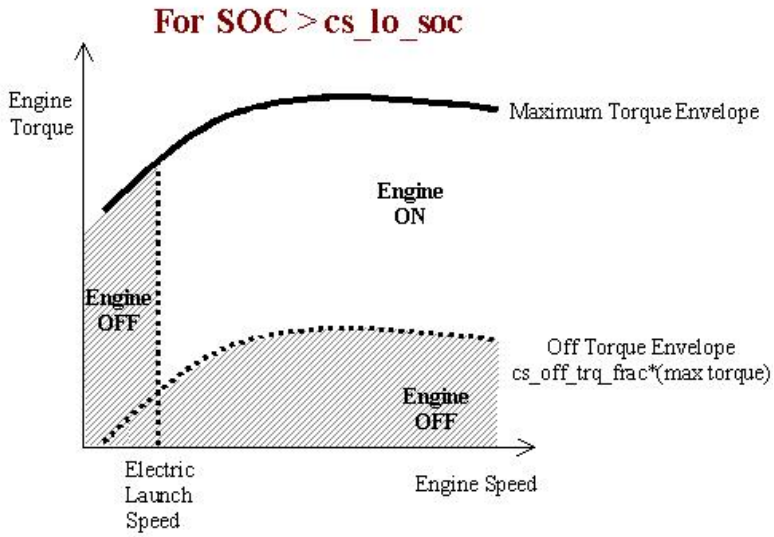

Figura 7.11. Lógica de control I del modelo híbrido paralelo (Fuente: Advisor®).

Cuando el estado de carga de la batería está por encima del valor prefijado, el motor no trabaja por debajo de una velocidad mínima y por debajo de un par mínimo (definido como fracción del par máximo).

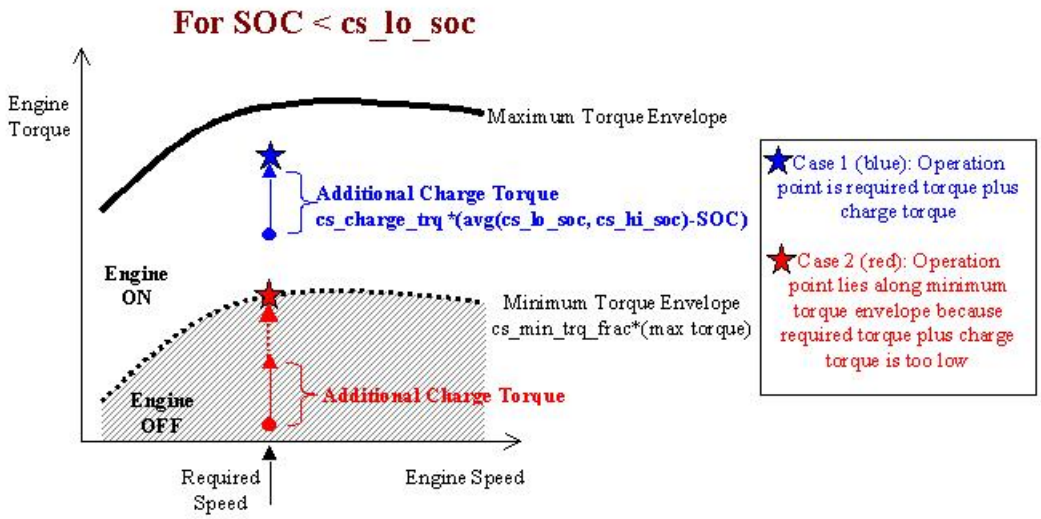

Figura 7.12. Lógica de control II del modelo híbrido paralelo (Fuente: Advisor®).

Cuando el estado de carga de la batería está por debajo del valor prefijado, el motor distingue entre 2 situaciones:

- Si el motor está encendido, se aumenta el punto de trabajo para que pueda abastecer la carga de la batería.

- En el caso de que el motor esté apagado, el régimen de trabajo del motor de combustión aumenta hasta el punto en el que el motor trabaje por encima del valor de par mínimo de trabajo.

7.4.2. Dimensionado de componentes

Como se ha comentado anteriormente, para el análisis de la versión paralelo se han utilizado dos grados de hibridación distintos.

- Modelo paralelo 20% (grado de hibridación 20%).

  Partiendo del modelo convencional, se ha dimensionado el motor eléctrico con un 20% de la potencia total del convencional.

$$Grado\,de\,Hibridación = \frac{Potencia\,motor\,eléctrico_{máx}}{Potencia\,motor\,de\,combustión_{máx}}\ ^{1} \qquad \text{(Ec.7.7)}$$

Esto es, aproximadamente una potencia eléctrica de 20 – 21 kW. Este hecho ha permitido reducir el tamaño del motor de combustión en una proporción similar pasando de una potencia de 80 a 64 kW.

El uso de un motor más pequeño (comparado con el modelo convencional), un motor eléctrico menor y una batería mucho más ligera (comparado con el modelo serie) permiten obtener un peso total del modelo híbrido paralelo de 3626 kg.

- Modelo paralelo 40% (grado de hibridación 40%).

Partiendo del modelo convencional se obtiene una potencia del motor eléctrico de 40 kW.

El detalle sobre el dimensionado de los componentes de la línea motriz se puede observar en la Tabla 7.10

[1] El Grado de Hibridación es un valor de referencia inicial. La optimización de los parámetros de la simulación puede ajustar el valor del grado de hibridación de partida.

		Paralelo 20%	Paralelo 40%
Motor de combustión	Tipo / Cilindrada	Diesel 4 cil. / 2.2 dm3	Diesel 4 cil. / 1.9 dm3
	Par máximo	219 Nm a 209 rad/s	152 Nm a 209 rad/s
	Potencia máxima	65 kW a 335 rad/s	45 kW a 335 rad/s
Embrague	Tipo / Dimensión	Disco seco / Ø 242	Disco seco / Ø 242
Caja de cambios	Tipo	Automatizada 5 velocidades	Automatizada 5 velocidades
Batería	Tipo / Capacidad (C/3)	NiMH / 72.000As	NiMH / 108.000As
Motor de tracción / Generador	Tipo / Potencia / Rendimiento Gen.	Síncrono de Corriente Alterna (Brushless) / 21kW / 90%	Síncrono de Corriente Alterna (Brushless) / 40kW / 90%
Diferencial	Relación de grupo	3,9	3,9
Neumáticos	Tipo	195/70 R15	195/70 R15

Tabla 7.10. Principales componentes línea motriz modelo paralelo.

Para más detalles acerca del dimensionado del modelo paralelo, consultar el Anexo A.

En la Tabla 7.11 se muestran los valores de peso de cada uno de los componentes incorporados en los modelos paralelo 20% y 40%. El aumento es de un 2% y un 3% respectivamente.

		Unidades	CONVENCIONAL	HÍBRIDO PARALELO 20%	HÍBRIDO PARALELO 40%
	Peso en vacío (sin línea motriz)	kg	1075	1075	1075
	Carga útil	kg	2000	2000	2000
Línea motriz	Motor de combustión	kg	346	253	188
	Motor eléctrico	kg	0	39	88
	Generador	kg	0	0	0
	Transmisión + Diferencial	kg	79	79	79
	Batería de tracción	kg	0	126	180
	TOTAL	**kg**	**3500**	**3572 (+2%)**	**3610 (+3%)**

Tabla 7.11. Comparativa de pesos modelo convencional – modelo híbrido paralelo.

7.4.3. Resultado de la simulación

A continuación se muestran los resultados de la versión híbrida 20%. Esta permite obtener un consumo para el ciclo analizado de 10.3 dm^3/100 km, lo que supone una reducción del 9% respecto al modelo convencional.

En el siguiente gráfico se puede observar el funcionamiento característico de este tipo de tecnología híbrida:

1) En situaciones de reposo, el motor de combustión permanece apagado para no gastar combustible.

2) En situaciones de aceleración, la solicitación de potencia se divide entre el motor de combustión y el motor eléctrico. Esto permite que el motor de combustión pueda trabajar en un régimen inferior y más constante que en el caso del vehículo convencional.

3) En situaciones de frenada, el motor eléctrico actúa como generador recogiendo la energía cinética que le llega desde la línea motriz.

4) Por último, cuando la velocidad del vehículo permanece constante y el motor de combustión puede trabajar en un régimen bueno, el motor eléctrico no trabaja.

Se debe observar en el gráfico, que la carga de la batería se mantiene constante al inicio y al final del ciclo, este hecho permite que el valor de consumo obtenido pueda ser fácilmente comparable con el de las otras simulaciones.

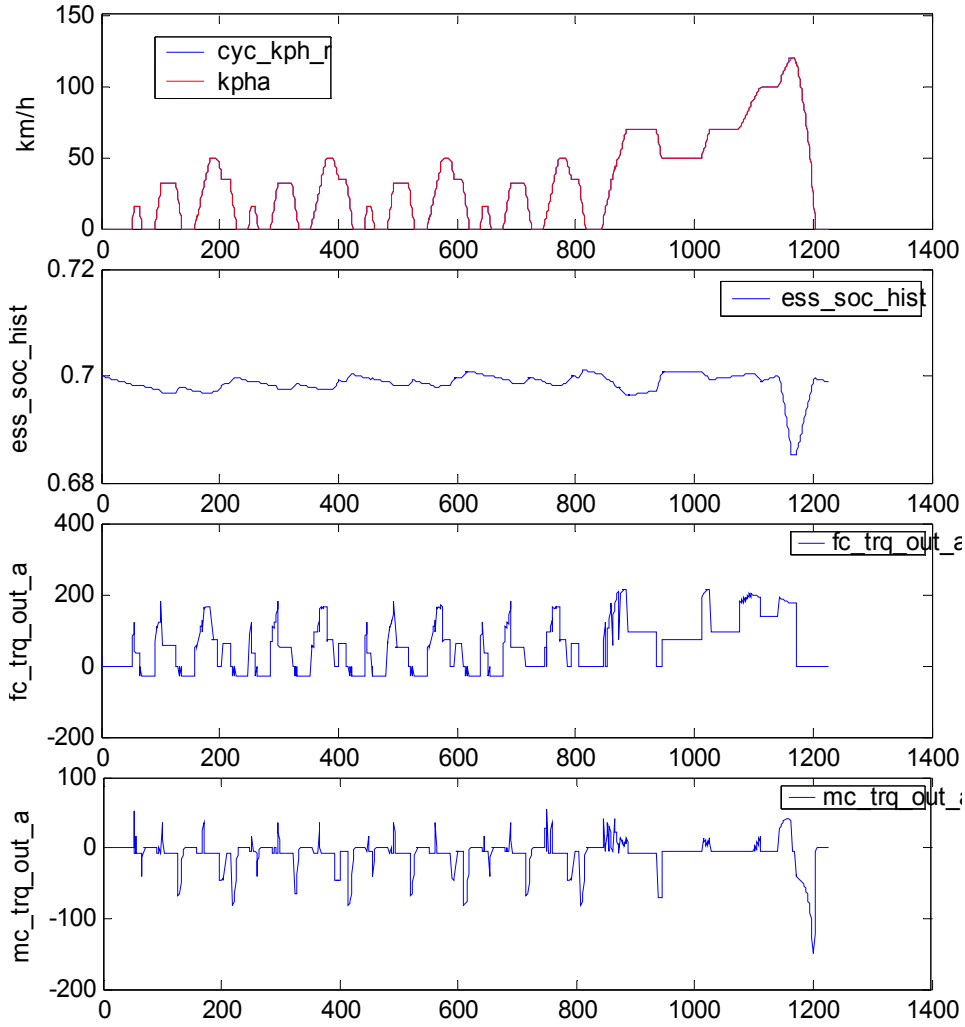

Figura 7.13. Resultado de la simulación del modelo híbrido paralelo .

En la Figura 7.14 que aparecen a continuación es sencillo observar como los puntos de trabajo de la versión híbrida paralela son más abundantes en zonas donde el rendimiento del motor es más elevado. Esto se debe principalmente a dos factores: por un lado la presencia del motor eléctrico como se ha comentado anteriormente y por otro la reducción del par del motor. (A igualdad de solicitación, el motor de combustión de la versión híbrida trabaja más cercana a su máximo).

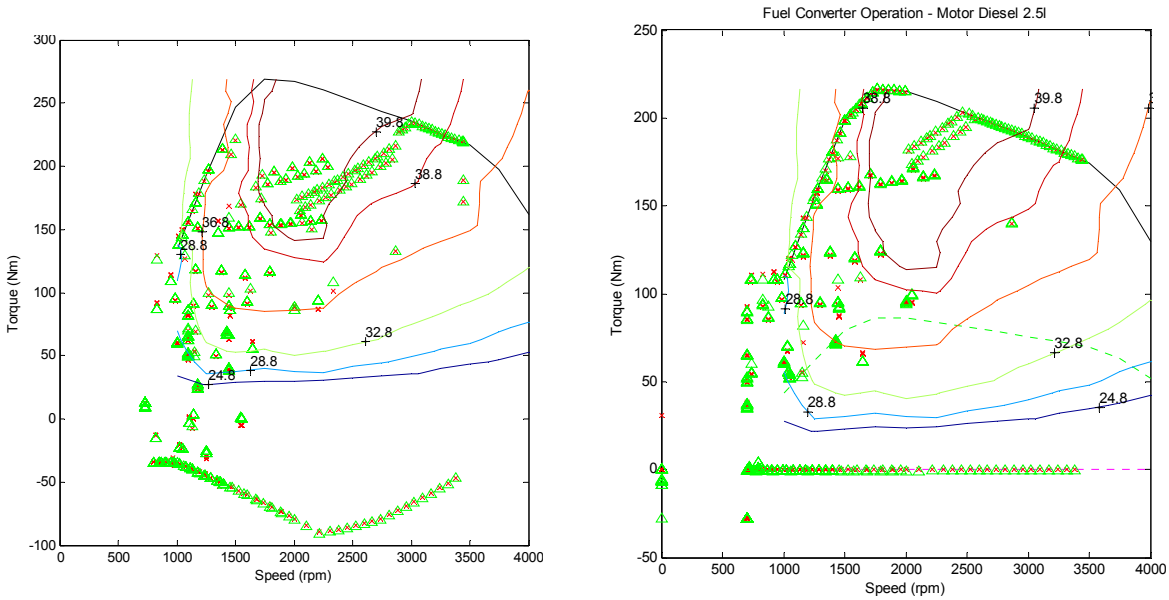

Figura 7.14. Comparativa del punto de trabajo entre modelo convencional y modelo paralelo.

Es importante notar que debido a la presencia del embrague, el modelo híbrido paralelo puede no trabajar cuando se solicitan pares negativos. Esto permite aumentar el rendimiento del freno regenerativo.

La misma simulación realizada con un grado de hibridación del 40% obtiene un consumo de 9,6 dm^3/100km, lo que supone un decremento del 15% respecto a la versión convencional.

7.5. Modelo Serie/Paralelo.

Finalmente se ha analizado la versión híbrida serie-paralelo. Esta versión de funcionamiento complejo aprovecha lo mejor de cada una de las tecnologías anteriormente estudiadas.

Dada su complejidad, se ha añadido un pequeño capítulo explicatorio de los diferentes modos de funcionamiento de esta tecnología.

7.5.1. Modos de funcionamiento.

La mejor manera de entender cómo funciona el sistema híbrido serie-paralelo es tratar de analizar el sistema en cada una de las situaciones en la que se puede encontrar el vehículo.

a) Arranque y funcionamiento a baja velocidad.

El motor de combustión se para cuando ha de trabajar en un rango ineficiente

como es el caso del arranque o la baja solicitación.

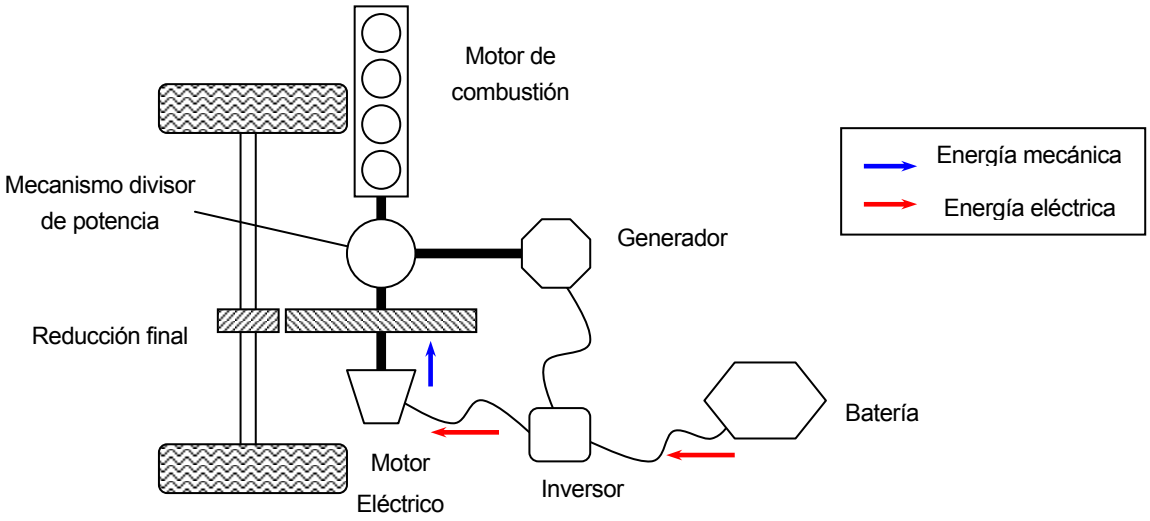

Figura 7.15. Modelo híbrido serie-paralelo: Arranque y funcionamiento a baja velocidad.

b) Conducción en condiciones normales

La potencia generada por el motor de combustión es dividida por el mecanismo divisor de potencia. Una parte de esta energía va al generador que la convierte en energía eléctrica que alimenta el motor. El resto de la potencia mueve directamente la ruedas. La proporción de potencia que va al generador y la que va directamente a las ruedas está controlada para obtener la máxima eficiencia.

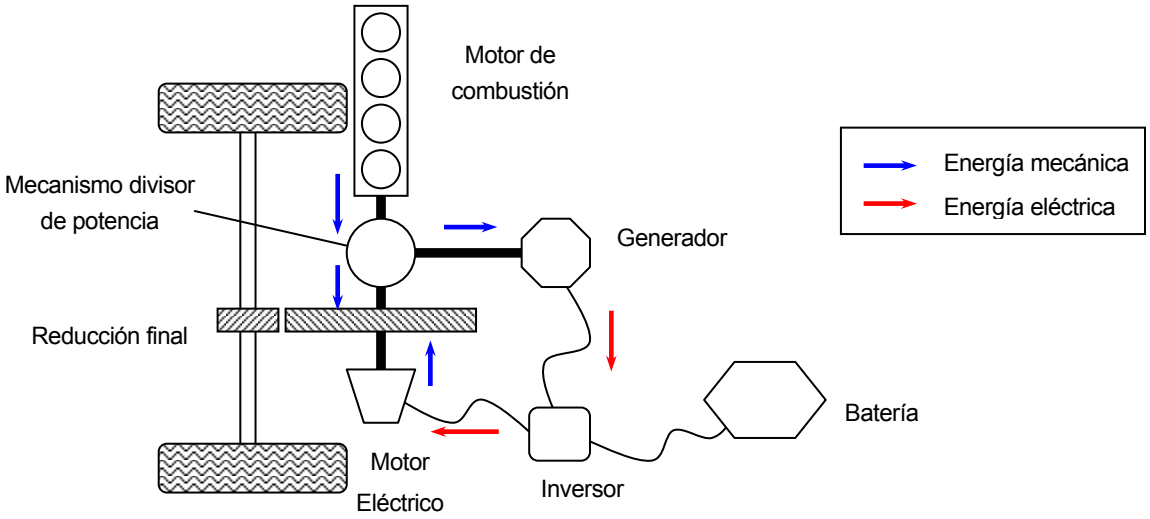

Figura 7.16. Modelo híbrido serie-paralelo: Conducción en condiciones normales.

c) Aceleración repentina

La batería proporciona en este tipo de situaciones la potencia necesaria para satisfacer las exigencias del conductor. A la vez que esto sucede, motor de combustión y eléctrico funcionan entregando la potencia de forma suave.

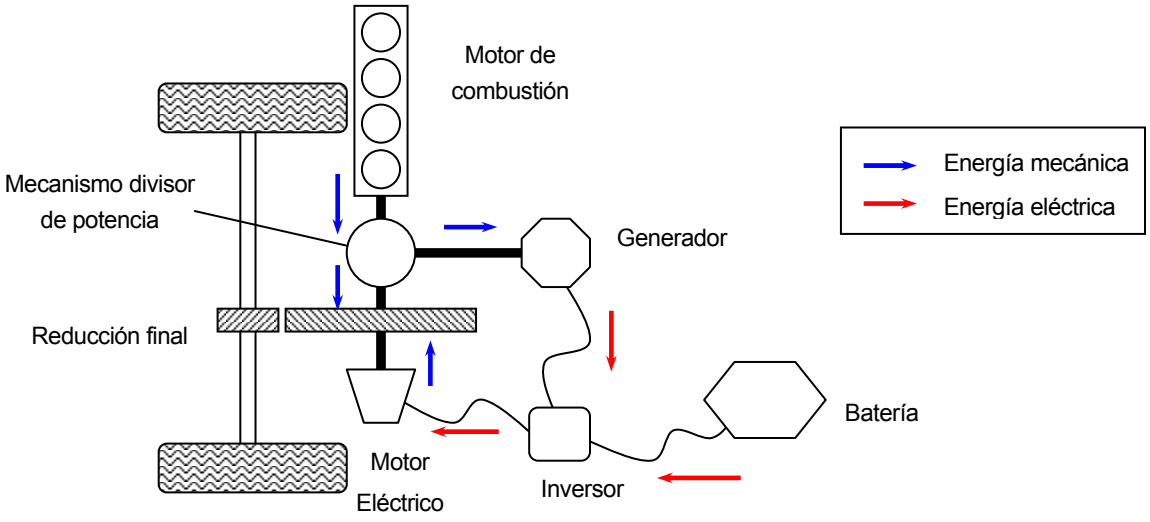

Figura 7.17. Modelo híbrido serie-paralelo: Aceleración repentina.

d) Deceleración y frenada

En esta situación el motor eléctrico actúa como generador conducido por las ruedas del vehículo. De esta manera, convierte la energía cinética del vehículo en

energía eléctrica y esta es almacenada en la batería.

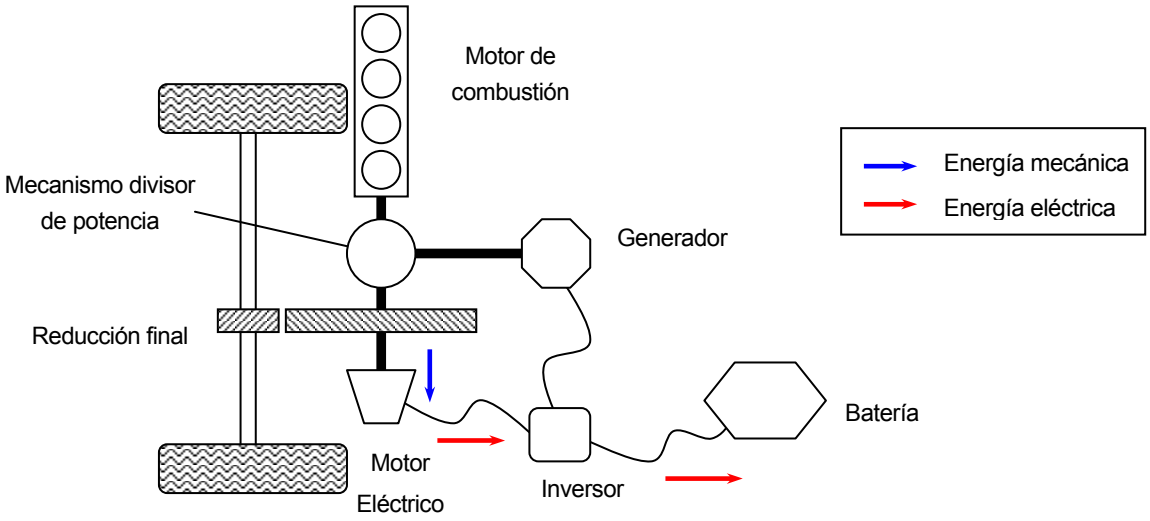

Figura 7.18. Modelo híbrido serie-paralelo: Deceleración y frenada.

e) Carga de la batería

El nivel de carga de la batería es gestionado de manera que tenga en todo momento suficiente reserva. El motor de combustión mueve el generador para cargar la batería cuando el sistema lo cree necesario. Como ya se ha comentado, esta es la característica diferencial entre el sistema híbrido serie/paralelo y el sistema paralelo.

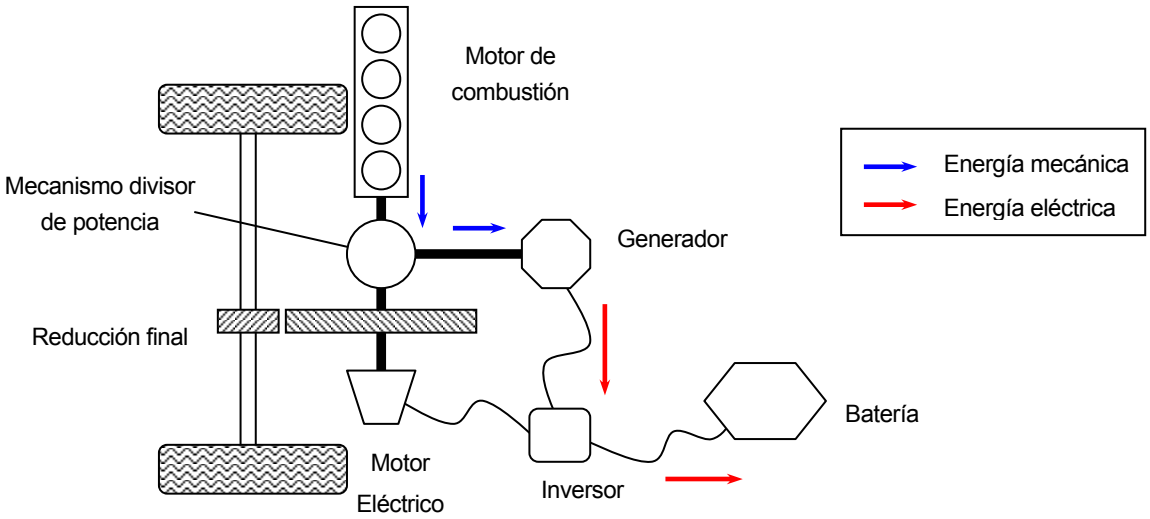

Figura 7.19. Modelo híbrido serie-paralelo: Carga de la batería.

f) En parado.

En parado el motor de combustión se apaga automáticamente.

7.5.2. Dimensionado de componentes

De la misma manera que en el caso del modelo paralelo, se ha distinguido entre 2 grados de hibridación 20 y 40%. El dimensionado de los componentes ha sido el mismo que en el modelo paralelo a excepción por supuesto del generador (ya que el modelo paralelo no utiliza generador) y el embrague (que no es necesario en el modelo serie-paralelo).

En la Tabla 7.12 se muestra un resumen del dimensionado seleccionado:

		Serie - Paralelo 20%	**Serie - Paralelo 40%**
Motor de combustión	Tipo / Cilindrada	Diesel 4 cil. / 2.2 dm3	Diesel 4 cil. / 1.9 dm3
	Par máximo	219 Nm a 209 rad/s	152 Nm a 209 rad/s
	Potencia máxima	65 kW a 335 rad/s	45 kW a 335 rad/s
Caja de cambios	Tipo	Mecanismo Divisor de Potencia	Mecanismo Divisor de Potencia
Batería	Tipo / Capacidad (C/3)	NiMH / 72.000As	NiMH / 108.000As
Motor de tracción / Generador	Tipo / Potencia / Rendimiento Gen.	Síncrono de Corriente Alterna (Brushless) / 21kW / 90%	Síncrono de Corriente Alterna (Brushless) / 40kW / 90%
Diferencial	Relación de grupo	3,9	3,9
Neumáticos	Tipo	195/70 R15	195/70 R15

Tabla 7.12. Principales componentes línea motriz modelo serie-paralelo.

El estudio de pesos queda de la siguiente manera. La necesidad del generador resulta en un incremento de peso (de entre 1 y 2%) de la versión serie-paralelo respecto del modelo paralelo:

		Unidades	CONVENCIONAL	HÍBRIDO SERIE-PARALELO 20%	HÍBRIDO SERIE-PARALELO 40%
	Peso en vacío (sin línea motriz)	kg	1075	1075	1075
	Carga útil	kg	2000	2000	2000
Línea motriz	Motor de combustión	kg	346	252	178
	Motor eléctrico	kg	0	45	88
	Generador	kg	0	54	98
	Transmisión + Diferencial	kg	79	49	49
	Batería de tracción	kg	0	126	180
	TOTAL	**kg**	**3500**	**3601 (+3%)**	**3668 (+5%)**

Tabla 7.13. Comparativa de pesos modelo convencional – modelo híbrido serie-paralelo.

7.5.3. Resultado de la simulación

Los resultados de la simulación son muy similares a los obtenidos en la versión paralelo, pero, a diferencia de este, la acción del motor eléctrico es más importante. Si en el modelo paralelo el motor eléctrico trabaja asistiendo con picos de valores cercanos a los ± 75 Nm, en este caso el motor llega a los ± 200 Nm. Esta acción más intensiva del motor eléctrico provoca unos resultados en la simulación realmente buenos.

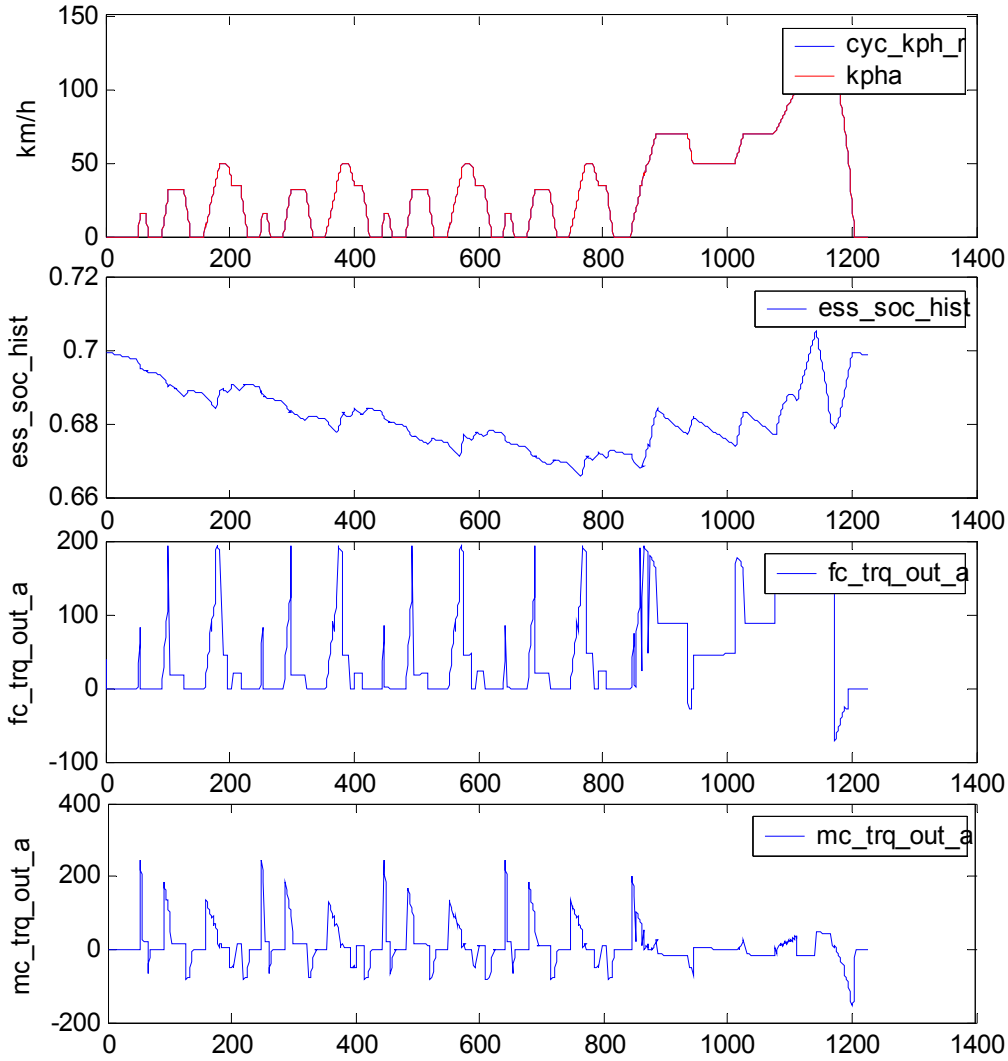

Figura 7.20. Resultado de la simulación modelo híbrido serie-paralelo.

En la Figura 7.21 se observa como en caso del modelo híbrido serie paralelo, el motor de combustión trabaja en un régimen de trabajo muy concreto (que puede ser fijado por el controlador de la simulación). También se puede observar como, por el hecho de no llevar embrague, existen algunos pares negativos que actúan sobre el motor de combustión.

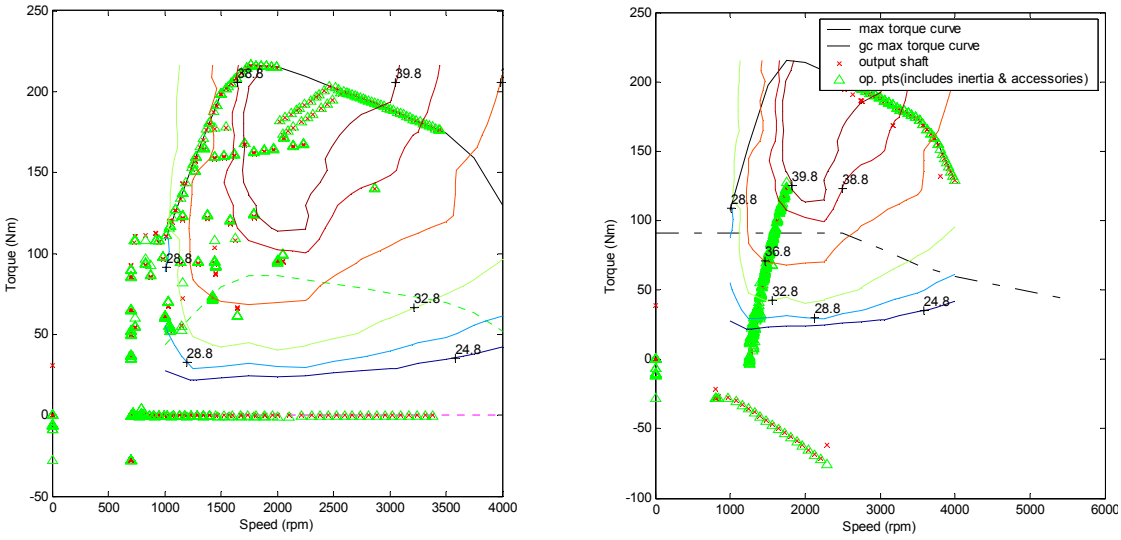

Figura 7.21. Comparativa punto de trabajo entre modelo convencional y modelo híbrido serie-paralelo.

Para la versión con grado de hibridación del 20% se obtiene un consumo del 10,0 dm^3/100km, es decir, un 12% menos de consumo que el equivalente convencional. En el caso del grado de hibridación del 40% se obtiene una reducción del consumo cercana al 20%, con un resultado en la simulación de 9,1 dm^3/100km.

8. Comparativa.

En los siguientes apartados se realiza una comparativa de los resultados anteriormente expuestos y, además, se comparan las diferentes versiones desde el punto de vista del coste de cada una de las tecnologías.

8.1. Consumos

El siguiente gráfico muestra los resultados de la simulación. Las principales conclusiones son las siguientes:

- La versión híbrida serie, tal y como se había advertido anteriormente, no representa una mejora respecto a la versión convencional.

- El resto de versiones suponen una reducción del consumo del vehículo. Los modelos híbridos paralelo permiten obtener reducciones de hasta el 15%. En el caso de las versiones serie-paralelo estas reducciones pueden llegar a ser de hasta el 20%.

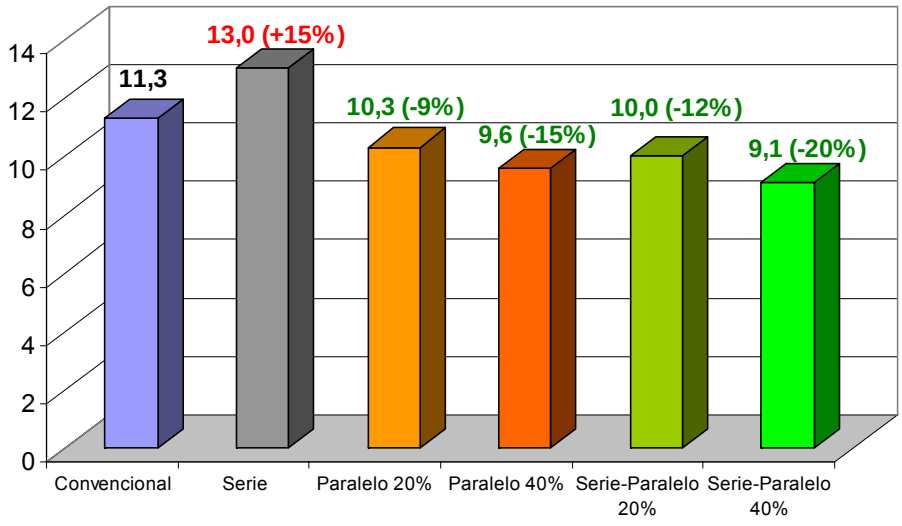

Figura 8.1. Comparativa de consumos entre los diferentes modelos evaluados.

A continuación, en la Tabla 8.1 se muestran los resultados obtenidos en la simulación para los diferentes ciclos: urbano, extra-urbano y el total, NEDC.

	Convencional	Serie		Paralelo 20%		Paralelo 40%		Serie-Paralelo 20%		Serie-Paralelo 40%	
Urbano	12,9	10,8	*-16%*	11,5	*-11%*	10,8	*-16%*	9,2	*-29%*	8,2	*-36%*
Extra-Urbano	10,9	13,2	*21%*	10,0	*-8%*	9,5	*-13%*	10,3	*-6%*	9,5	*-13%*
NEDC	**11,3**	**13,0**	***15%***	**10,3**	***-9%***	**9,6**	***-15%***	**10,0**	***-12%***	**9,1**	***-19%***

Tabla 8.1. Resultados de consumo de la simulaciones en los diferentes ciclos.

Como se puede observar en la Tabla anterior, la influencia del ciclo de conducción sobre el consumo es muy importante, por lo que el ciclo escogido para la comparativa NEDC debe ser representativo del

8.2. Estudio Económico

Una vez comparadas las prestaciones por lo que a consumo de combustible se refiere, es necesario comparar las distintas alternativas desde el punto de vista económico. Esto decir, una alternativa que conlleva una disminución de consumo importante puede no ser rentable para el cliente si, para disfrutarla, es necesario pagar una suma de dinero muy elevada. Es por ello que el estudio económico de esta memoria se ha planteado desde el punto de vista del cliente y del tiempo (o, más adecuado, el número de kilómetros) necesario para recuperar la inversión realizada.

En el Capítulo 11 se realiza un breve resumen de los aspectos que se han tenido en cuenta para realizar este estudio económico y de los resultados obtenidos.

8.3. Resultado de la comparativa.

El resultado de esta comparativa (a nivel de consumos y a nivel económico) deja claro que el beneficio mayor para el cliente se produce con la opción híbrida **serie-paralelo 40%.**

Esta alternativa, permite recuperar la inversión antes de 2 años:

- Al Usuario 1 (realiza una conducción de 100% ciudad) en el Escenario 1 (Situación actual).

- A ambos Usuarios (100% urbano y 50%/50% urbano/extra-urbano) en los Escenarios 2 y 3 (Precio del carburante 1.5€ y subvención de 1000€,

respectivamente).

Como se ha explicado en capítulos anteriores, el modelo híbrido serie-paralelo se basa en un elemento mecánico capaz de dividir la potencia que le llega del motor de combustión entre el generador y el motor eléctrico/ruedas. Este ha sido el elemento seleccionado para realizar el estudio mecánico detallado que se muestra a continuación.

9. Mecanismo divisor de potencia (MDP).

9.1. Introducción

Como se ha comentado anteriormente, el mecanismo divisor de potencia es un elemento mecánico, generalmente basado en un tren epicicloidal, que combinado con un generador y un motor eléctrico permite actuar como transmisión continuamente variable (CVT).

9.1.1. Pasado y presente del mecanismo divisor de potencia.

Aunque anteriormente ya se había desarrollado algún mecanismo divisor de potencia hidrostático, no fue hasta los inicios de la década de los 70 cuando se empezó a aplicar en combinación con máquinas eléctricas.

En 1971, la empresa TRW publico el artículo SAE “An Electromechanical Transmission for Hybrid Vehicle Powertrains” que sería la base de los mecanismos divisores de potencia posteriores. En la versión de TRW, el motor de combustión iba conectado al planeta, un generador se conectaba al brazo y el motor eléctrico se asistía el movimiento de la corona a través de una reducción de engranajes simples. A su vez, esta misma corona es la que transmitía la potencia a las ruedas.

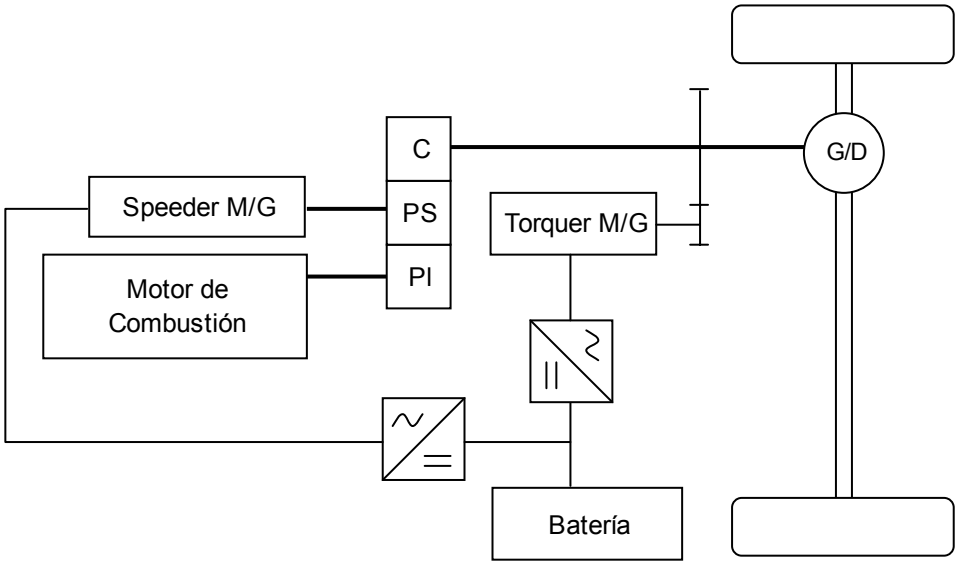

Figura 9.1. Mecanismo divisor de potencia de TRW (1971).

La versión de TRW presentaba 5 modos de funcionamiento detallados a continuación:

- Modo 1. Situación de baja aceleración cuando la potencia del motor de combustión excede las necesidades de la carretera.
    - El exceso de potencia del motor de combustión es usado para cargar las baterías empleando el generador y el motor en modo regenerativo.
    - En el momento en que la potencia del motor se adecua a la solicitación de la carretera pero no tiene par suficiente, el motor/generador "Torquer" actúa como motor cediendo ese par necesario descargando las baterías.
- Modo 2. Situación de arranque y conducción a baja velocidad.
    - El motor/generador "Speeder" actúa como generador y cede la energía del motor de combustión al motor "Torquer" por vía eléctrica.
    - El exceso de potencia es cedido a las baterías.
- Modo 3. Condición de alta solicitación.
    - En esta situación el par y la potencia solicitados por la carretera son superiores a los límites que puede dar el motor de combustión.
    - La batería cede su potencia al motor eléctrico "Torquer" que asiste en cuanto a par y al motor eléctrico "Speeder" que asiste en cuanto a velocidad.
- Modo 4. Conducción a alta velocidad.
    - El motor/generador "Speeder" se bloquea y es el motor de combustión el que conduce al vehículo.
    - El motor/generador "Torquer" actúa como motor o como generador en función de la necesidad.
- Modo 5. Deceleración.
    - Las dos máquinas eléctricas actúan en modo regenerativo recuperando la energía cinética del vehículo.

En la actualidad, el sistema o mecanismo divisor de potencia más evolucionado es el THS (Toyota Hybrid System) utilizado en el Toyota Prius, que no es más que una evolución del sistema de TRW explicado en este apartado. La principal diferencia radica en la unión de los

componentes. En el caso del THS, el motor de combustión va conectado al brazo del tren epicicloidal, el generador va conectado al planeta y el motor (igualmente que en el sistema de TRW) va conectado a la corona, pero en este caso sin necesidad de reducción de engranajes.

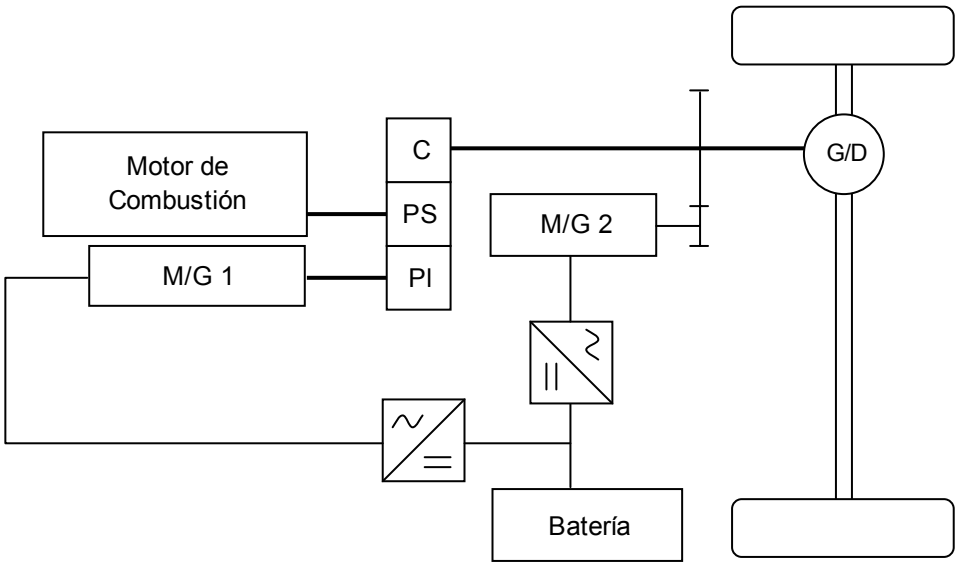

Figura 9.2. Toyota Hybrid System: Mecanismo divisor de potencia de Toyota.

En la Figura 9.2 se observa el sistema THS. El diseño de este proyecto se basa en el concepto del THS pero se observan las siguientes diferencias:

- Aplicación a un vehículo de mayor peso, por lo tanto, de mayor solicitación del mecanismo.

- Aplicación a un vehículo de tracción posterior y las posibles diferencias debidas a la disposición de cada uno de los componentes.

9.1.2. Cinemática y Dinámica de los trenes epicicloidales.

La ecuación general que rige la cinemática de un tren epicicloidal es la ecuación de Willis.

$$\frac{\omega_{pl} - \omega_{ps}}{\omega_c - \omega_{ps}} = -\frac{N_c}{N_{pl}} = -k \qquad \text{(Ec. 9.1.)}$$

donde,

$$k = \frac{R_c}{R_{pl}} = relación\ de\ transmisión \qquad \text{(Ec. 9.2.)}$$

A continuación se muestran las ecuaciones que rigen la dinámica de los trenes epicicloidales:

$$\eta_{pl} M_{pl} - \frac{1}{k} \eta_c M_c - J_{pl} \dot{\omega}_{pl} + \frac{1}{k} J_c \dot{\omega}_c = 0 \qquad \text{(Eq. 9.3.)}$$

$$\eta_{ps} M_{ps} + \frac{k+1}{k} \eta_c M_c - J_{ps} \dot{\omega}_{ps} - \frac{k+1}{k} J_c \dot{\omega}_c = 0 \qquad \text{(Eq. 9.4.)}$$

Estas ecuaciones permiten explicar el funcionamiento del mecanismo en los términos en los que se hace en el siguiente capítulo. Por simplificar, diremos que, en situación estacionaria, el par que reciben el planetario (PL) y la corona (C) depende exclusivamente del par de entrada en el porta-satélites (PL) y de la relación de transmisión (k). De ahí que el mecanismo analizado se llame “Divisor de Potencia”, ya que como el par de los elementos de salida mantiene un relación fija, si variamos la velocidad de los componentes lo que haremos será dividir la potencia de entrada entre las salidas en la proporción que se desee (controlando la velocidad de giro de los elementos).

9.2. Funcionamiento del mecanismo divisor de potencia

El funcionamiento del sistema divisor de potencia se puede descomponer en 5 situaciones:

1. En reposo. El motor de combustión y el vehículo permanecen parados.

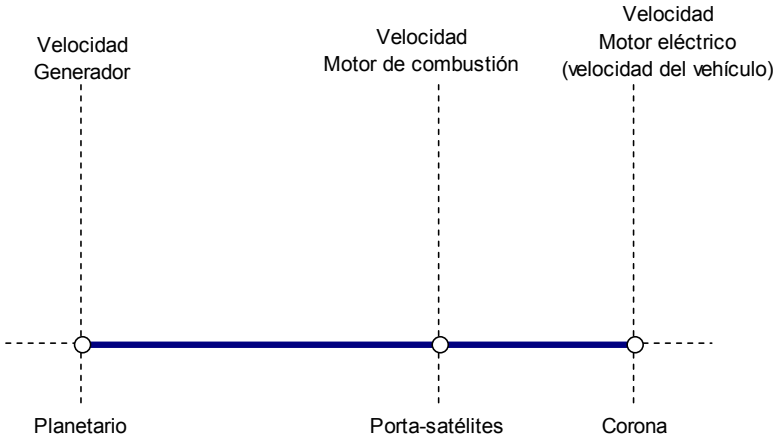

Figura 9.3. Nomograma de velocidades MDP: en reposo.

2. Durante el inicio del movimiento del vehículo. El motor eléctrico es el encargado de propulsar el vehículo. En primera instancia (tal y como muestra el gráfico), el motor de combustión permanece parado.

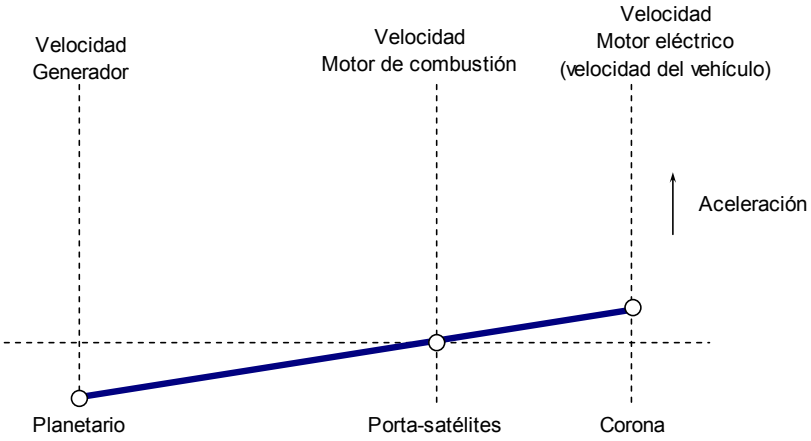

Figura 9.4. Nomograma de velocidades MDP: inicio movimiento vehículo.

3. Arranque del motor de combustión. El generador, que tiene también la función de motor de arranque, hace girar el motor de combustión arrancándolo. Una vez el motor está arrancado, el generador empieza a actuar como generador transformando energía mecánica en energía eléctrica.

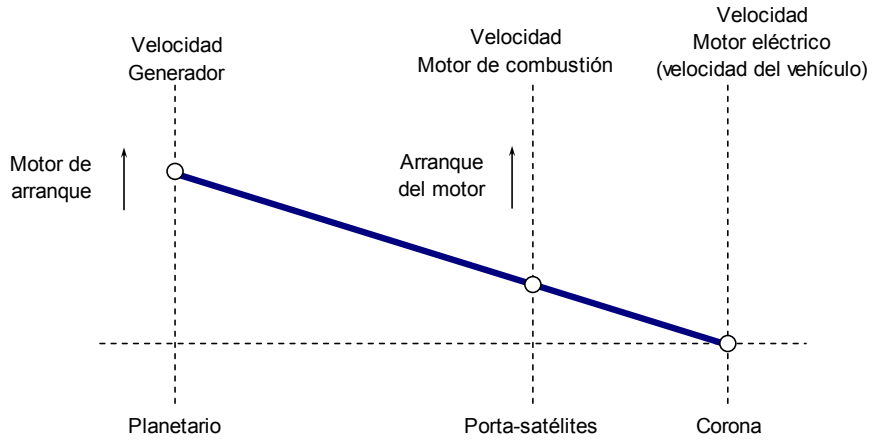

Figura 9.5. Nomograma de velocidades MDP: arranque motor de combustión.

La velocidad del vehículo en esta condición puede o no ser cero. Es decir, el proceso de arranque del motor de combustión se puede producir también con el vehículo en marcha.

4. Conducción normal. La mayor parte del tiempo, es el motor de combustión el encargado de propulsar al vehículo en la conducción normal. En momentos puntuales el motor eléctrico cede o absorbe energía de forma que minimiza los transitorios del motor de combustión.

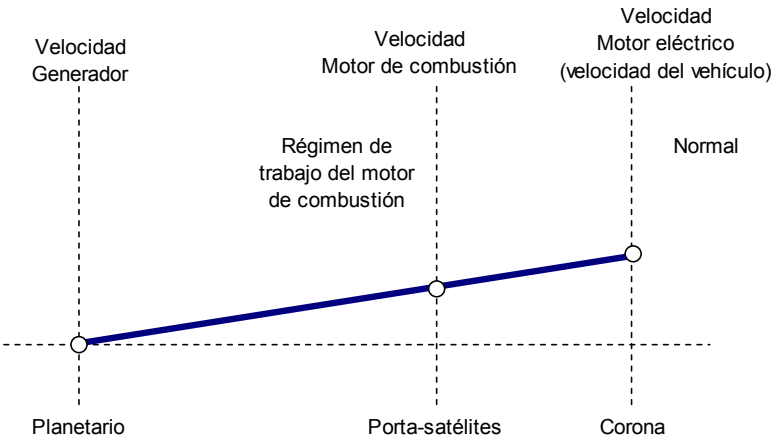

Figura 9.6. Nomograma de velocidades MDP: conducción normal.

5. Aceleración en alta solicitación. En situación de aceleración partiendo de una conducción normal, se incrementan las revoluciones del motor de combustión y, a la vez, el generador empieza a generar energía eléctrica. La energía generada además de la que el motor eléctrico puede obtener de las baterías permiten aumentar la aceleración del vehículo por medio del motor eléctrico.

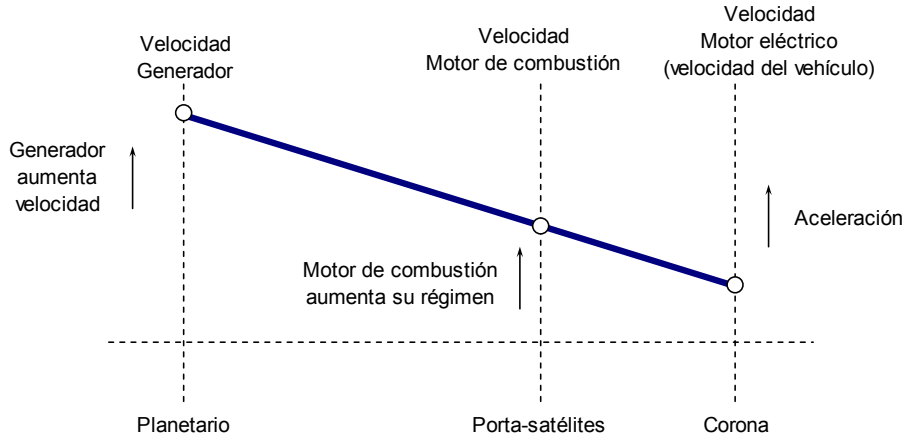

Figura 9.7. Nomograma de velocidades MDP: aceleración en alta solicitación.

9.3. Diseño básico

En primer lugar, para el diseño básico de este mecanismo divisor de potencia se ha considerado la disposición de los elementos en el vehículo. El MDP queda ubicado en la posición que ocupa la caja de cambios en los vehículos LCV (con motor delantero y tracción posterior). La configuración quedaría de la siguiente manera:

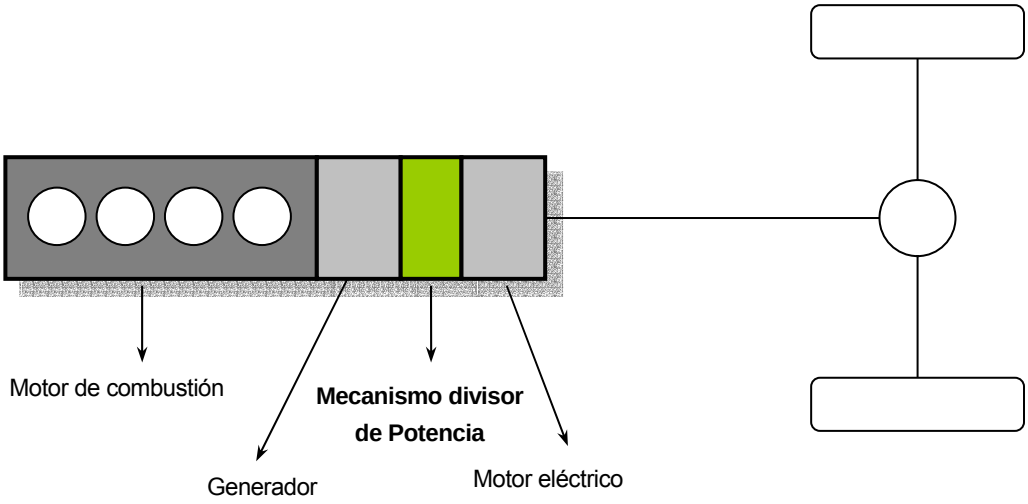

Figura 9.8. Disposición del MDP en el vehículo.

El hecho de que el generador quede por delante del MDP se justifica por el hecho de que este va conectado al planeta y, por lo tanto, esta configuración facilita el diseño de los elementos. Como se verá a continuación, el eje que conecta el motor de combustión con el MDP es concéntrico al eje del generador.

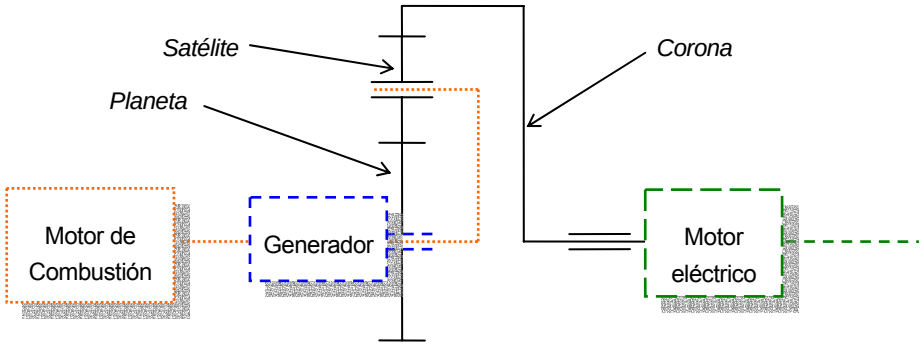

Figura 9.9. Configuración del tren epicicloidal que forma el MDP.

9.3.1. Análisis de las solicitaciones.

Al tratarse de un tren epicicloidal simple, sus solicitaciones están descritas en multitud de bibliografía. A continuación se muestra un gráfico del libro de G.Henriot, donde el subíndice B indica la corona, el U indica el brazo y el subíndice A indica el planetario.

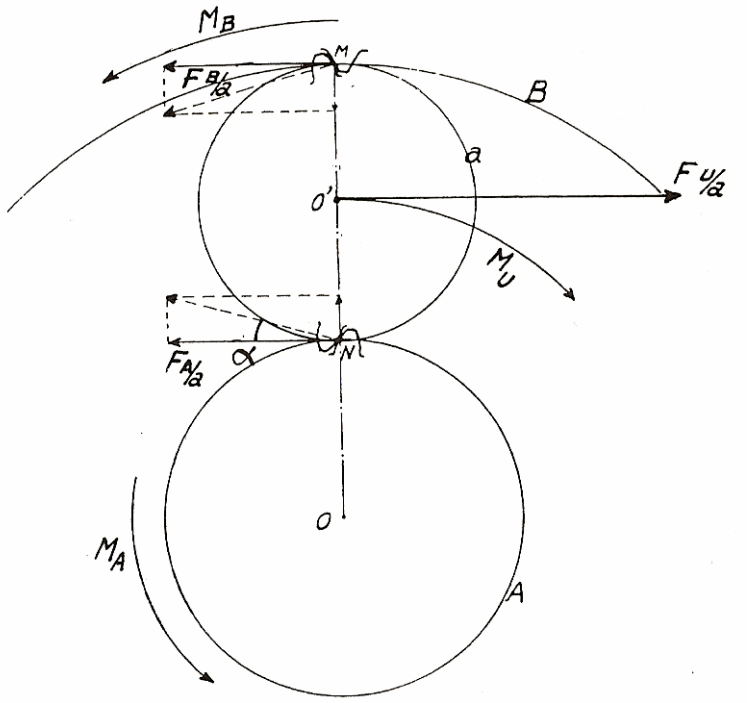

Figura 9.10. Diagrama de fuerzas tren epicicloidal simple (G.Henriot).

Partiendo del teorema de conservación de la energía,

$$M_A \cdot \omega_A + M_B \cdot \omega_B + M_U \cdot \omega_U = 0 \qquad \text{(Eq. 9.5.)}$$

Se puede obtener la siguiente relación entre los momentos de cada uno de los elementos tomando como elemento conocido el momento (par) realizado por el brazo (motor de combustión en el sistema MDP):

$$M_B = -M_U \cdot \frac{k}{(1+k)} \qquad \text{(Eq. 9.6.)}$$

$$M_A = -\frac{M_U}{(1+k)} \qquad \text{(Eq. 9.7.)}$$

$$M_B = -M_A \cdot k \qquad \text{(Eq. 9.8.)}$$

Estas relaciones permiten verificar que, en valor absoluto:

$$F_{B/a} = F_{A/a} = \frac{1}{2} F_{U/a} \qquad \text{(Eq. 9.8.)}$$

El conocimiento de la magnitud de estas fuerzas nos permitirá, a continuación, diseñar cada uno de los componentes que forma este tren epicicloidal.

9.3.2. Diseño de cada uno de los componentes.

En el Anexo C se muestra el detalle de los cálculos realizados para el dimensionado básico de los componentes. A continuación se detallan los elementos que han sido evaluados a nivel de cálculo en este proyecto:

1.	Cálculo de engranajes (Geometría y resistencia a fatiga – tensión en pie del diente y presión superficial).
2.	Cálculo de secciones críticas (principalmente sometidas a torsión)
3.	Cálculo de los estriados (unión arbol – cubo)
4.	Selección de los rodamientos (rodamientos de agujas y de bolas)

Adicionalmente se ha realizado el estudio por elementos finitos del elemento que forma el MDP más complejo: es el porta-satélites. Este estudio se muestra en la sección 9.3.4.

9.3.3. Sección general.

De acuerdo con todo lo expuesto anteriormente, teniendo en cuenta tanto los criterios de funcionalidad como los derivados de los cálculos de dimensionado, se procede a la distribución de los elementos en el espacio. Aunque el detalle del conjunto y de los elementos principales se puede observar en la sección de Planos de esta memoria, a continuación se muestra en la Figura 9.11, la sección general del Mecanismo Divisor de Potencia.

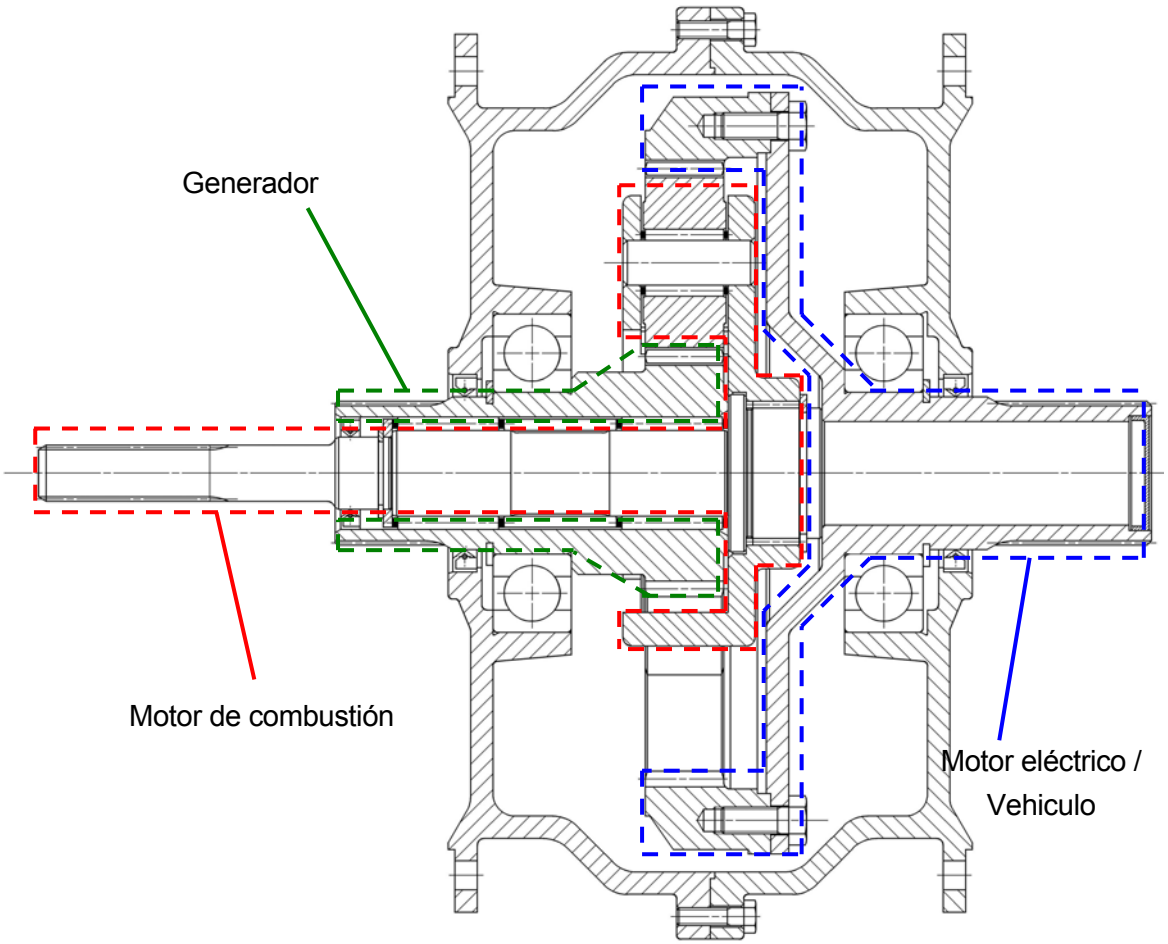

Figura 9.11. Sección general Mecanismo Divisor de Potencia

Como se puede observar, se trata de un tren epicicloidal con la peculiaridad de que el porta-satélites y el planetario son concéntricos, lo que ha dificultado en gran medida la tarea de diseño.

También es preciso comentar la corona es un elemento móvil. Este hecho diferencia en gran medida el Mecanismo Divisor de Potencia del conocido Reductor planetario normalizado.

9.3.4. Estudio de elementos finitos del porta-satélites.

Dada la complejidad geométrica del elemento porta-satélites se ha procedido al cálculo por elementos finitos. A continuación, se muestran los principales elementos del cálculo:

1. En la Figura 9.12 se muestra el elemento sobre el que se realiza el cálculo. Como se puede observar no se trata del porta-satélites exclusivamente, sino que se han añadido los bulones de los satélites, ya que al ir clavados a presión se convierten en elementos estructurales.

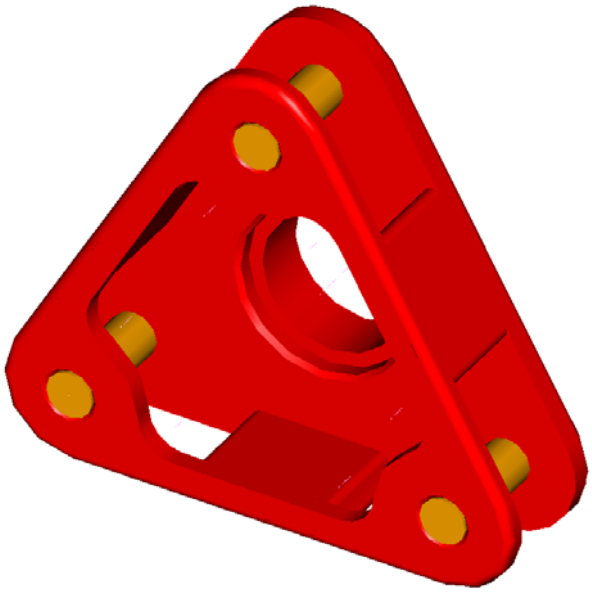

Figura 9.12. Elemento analizado por elementos finitos: porta-satélites y bulones.

2. Fijación de las condiciones de contorno. Se ha fijado el elemento por el estriado interior y se han aplicado las cargas sobre los bulones, tal como se observa en la Figura 9.13.

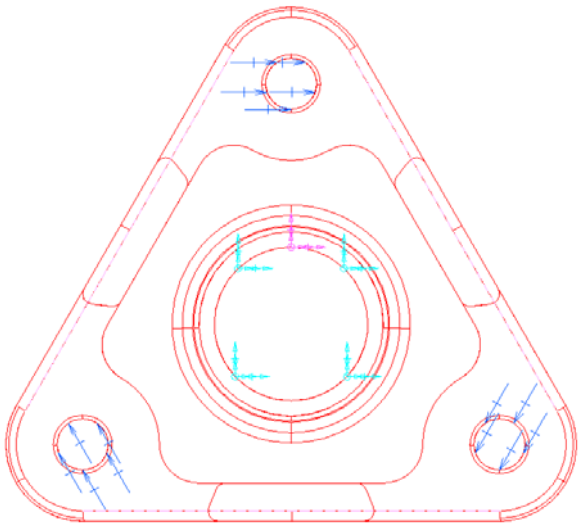

Figura 9.13. Fijación de las condiciones de contorno.

3. En la Figra 9.14 se muestra el resultado del mallado del componente.

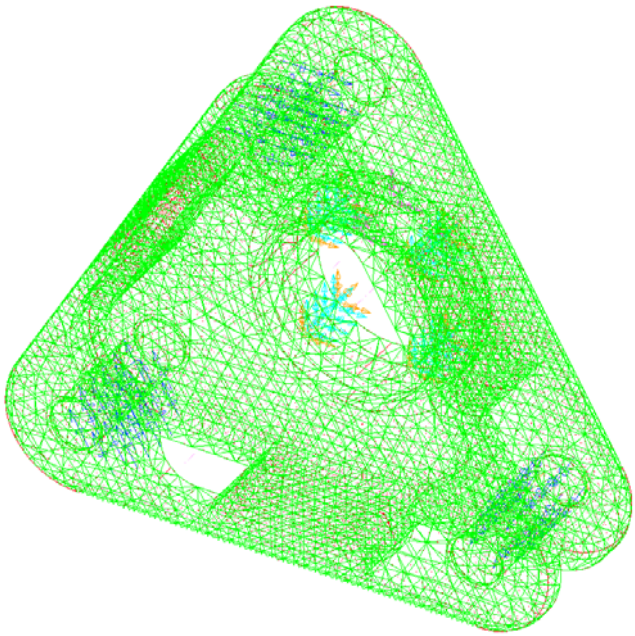

Figura 9.14. Mallado del sistema porta-satélites y bulón.

4. Resultado del cálculo: tensiones y deformaciones. Tal y como se observa en las Figura 9.15, la zona más tensionada es la zona de unión entre el cubo y la llanta del elemento porta-satélites. La zona que sufre una deformación mayor es la zona del porta-satélites que queda por encima de los bulones.

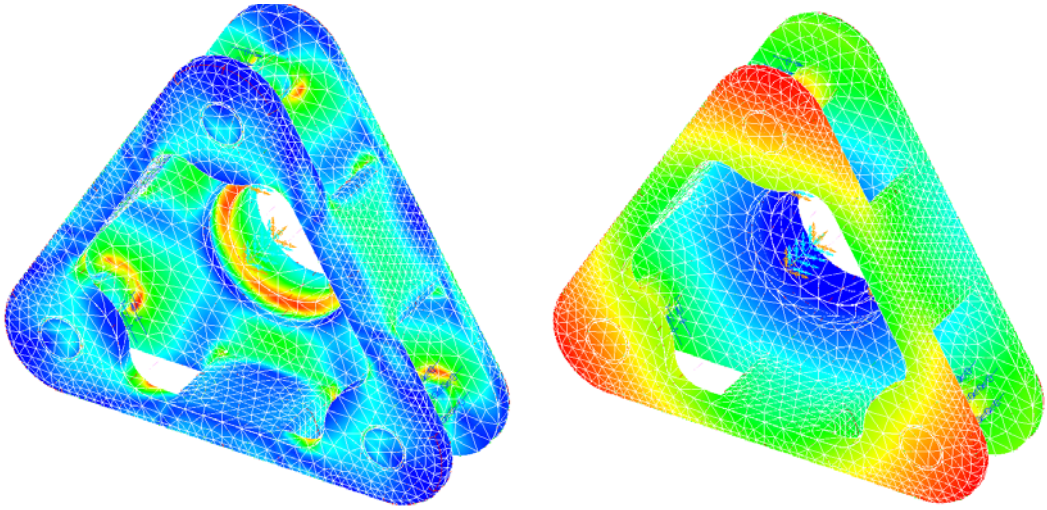

Figura 9.15. Resultado del cálculo: tensiones y deformaciones.

En ambos casos se obtienen resultados aceptables. En el caso de las tensiones se obtiene un factor de seguridad C_S=2,6.

10. Impacto ambiental.

Como se ha comentado en el Capítulo 3.1, uno de los tres principales objetivos de este proyecto es el análisis de las diversas alternativas dentro de la tecnología híbrida como opción para reducir consumos de combustible y emisiones gaseosas en el segmento de los vehículos comerciales ligeros.

Este análisis se ha realizado de forma exhaustiva durante el Capítulo 7, en el que se ha simulado los consumos obtenidos por las diferentes alternativas híbridas para un ciclo dado.

El consumo de combustible está directamente vinculado a la emisión de CO_2 a la atmósfera (gas neutro que es responsable en gran medida del efecto invernadero). La Ecuación 10.1 relaciona el consumo de combustible con las emisiones de CO_2.

$$C_n H_m + (n + \frac{m}{4}) \cdot O_2 \Rightarrow n \cdot CO_2 + \frac{m}{2} \cdot H_2 O \qquad \text{(Ec. 10.1.)}$$

Así pues, si, como se ha demostrado en este proyecto, es posible disminuir el consumo de los vehículos comerciales ligeros en un 20%, podemos afirmar que existe la posibilidad de reducir las emisiones de CO_2 a la atmósfera en un 20%.

Por lo que se refiere al resto de emisiones contaminantes producto de la combustión del diesel (NOx, HC, CO, partículas materiales…), no se ha realizado un estudio exhaustivo. Cabe recordar que la cantidad de este tipo de emisiones no está directamente relacionada con el consumo ya que cada una de ellas tiene su origen en situaciones particulares del motor alternativo (funcionamiento en frío, combustión incompleta, altas temperaturas puntuales…). El estudio detallado de la influencia de las alternativas híbridas sobre estas emisiones requeriría un proyecto independiente.

11. Estudio económico.

Como hemos comentado anteriormente, en el segmento de los vehículos comerciales el coste operativo de la empresa es finalmente el elemento de decisión a la hora de comprar un vehículo u otro.

El elemento que se ha tomado como parámetro de evaluación han sido los kilómetros necesarios para amortizar la inversión. En primer lugar se ha estimado el coste por vehículo de cada tecnología y,

			Paralelo 20%	Paralelo 40%	Serie-Paralelo 20%	Serie-Paralelo 40%
GASTOS DE DESARROLLO	Desarrollo + Inversion	€	20.000.000			
	Plazo de amortización	años	2			
	Producción anual	vehículos	25.000			
	% de vehículos híbridos	-	50%			
	Repercusión por vehículo	***€/ vehículo***	***800***			
COSTE DIRECTO	+ Motor eléctrico	€	300	600	300	600
	+ Generador	€	---	---	300	600
	+ Baterías	€	600	1.000	600	1.000
	+ Inversor	€	400	400	400	400
	+ Embrague adicional	€	300	300	---	---
	+ Transmisión automatizada	€	600	600	---	---
	+ Mecanismo Divisor de Potencia	€	---	---	300	300
	Repercusión por vehículo	***€/ vehículo***	***2.200***	***2.900***	***1.900***	***2.900***
TOTAL POR VEHÍCULO		**€/ vehículo**	**3.000**	**3.700**	**2.700**	**3.700**

Tabla 11.1. Estimación gastos de desarrollo y coste directo.

A continuación, se han calculado los kilómetros que debería de realizar el vehículo para amortizar dicha inversión. Finalmente se ha comparado este valor de kilómetros con un valor estimado que corresponde con los kilómetros realizados por un vehículo de esta categoría durante el período de 2 años (aproximadamente 45.000 km).

Para el estudio se ha diferenciado entre 2 tipos de usuarios (que corresponden a las diferentes aplicaciones que se realizan con este tipo de vehículos). Por un lado, el usuario que realiza el 100% de su actividad en entorno ciudad. Es el caso de los vehículos de reparto de las grandes ciudades. Por otro, los usuarios que realiza aproximadamente un 50% de su actividad en ciudad y un 50% en carreteras de unión entre ciudades. Es el caso de los vehículos de reparto de las pequeñas ciudades o pueblos.

También se han supuesto tres escenarios distintos:

- ESCENARIO 1. El precio del combustible es igual a 1€. Intenta reflejar la situación del mercado actual.

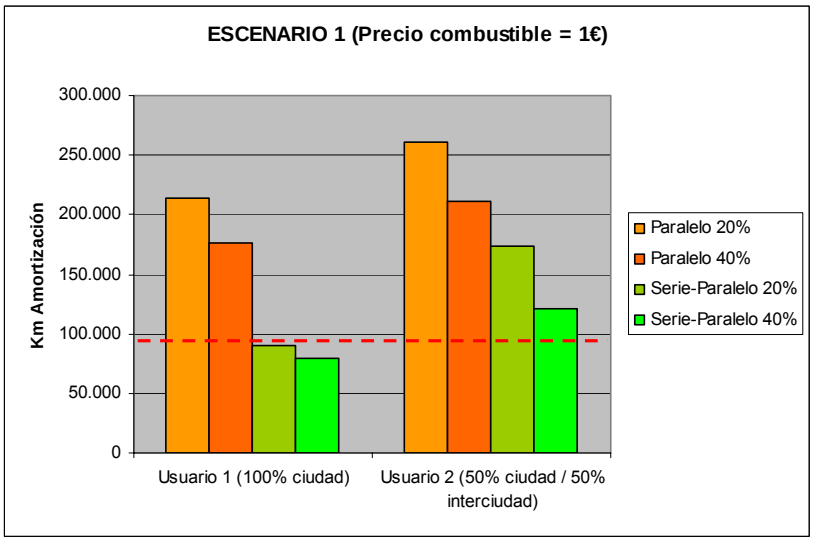

Figura 11.1. Resultado estudio económico Escenario 1.

Conclusión: sólo las versiones Serie-Paralelo en el caso del Usuario 1 permiten rentabilizar la inversión en menos de 2 años.

- ESCENARIO 2. El precio del combustible es igual a 1.5€. Pretende ilustrar la situación de una eventual subida del precio del combustible y de las consecuencias de ello sobre los kilómetros que permiten recuperar la inversión.

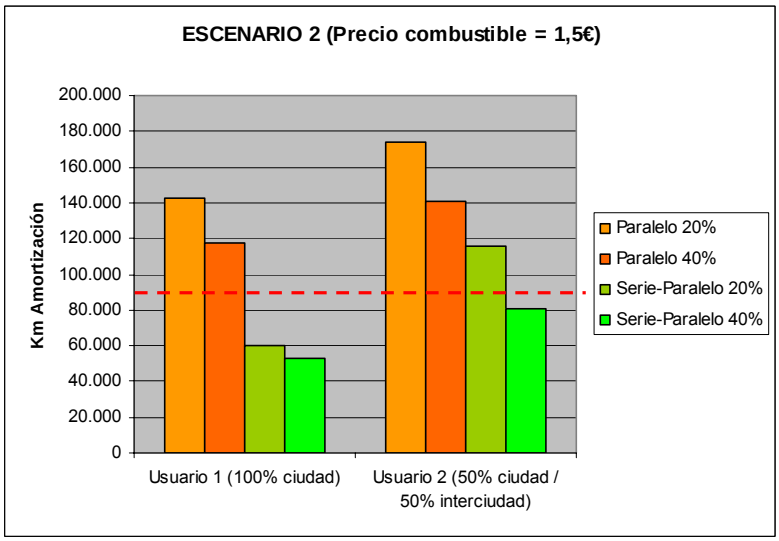

Figura 11.2. Resultado estudio económico Escenario 2.

Conclusión: La versión serie-paralelo 40% permite recuperar la inversión para ambos Usuarios y la versión serie-paralelo 20% permite hacerlo para Usuarios del tipo 1.

- ESCENEARIO 3. El precio del combustible es igual a 1.5€ y se ofrece una subvención gubernamental de 1000€ por vehículo en la adquisición de vehículos poco contaminantes.

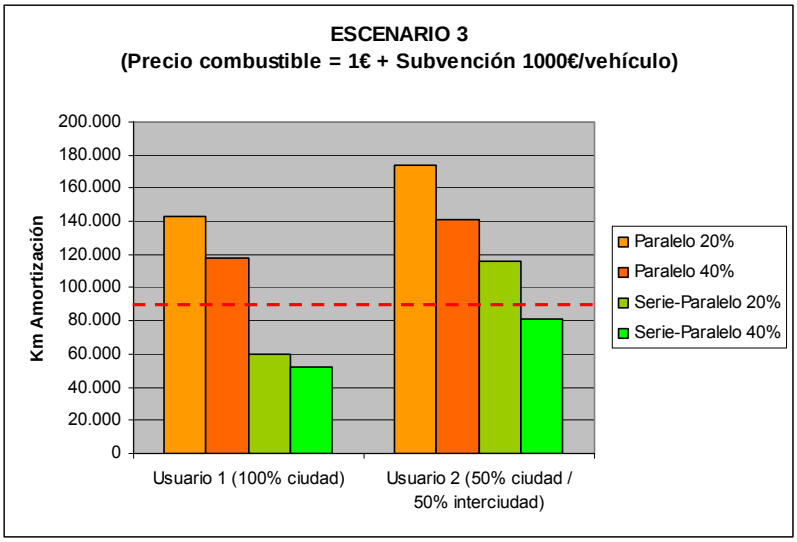

Figura 11.3. Resultado estudio económico Escenario 3.

Conclusión: el resultado obtenido es muy similar al Escenario 2.

El resultado del estudio económico, permite seleccionar como versión más adecuada para un estudio más detallado el modelo híbrido Serie-Paralelo. Además demuestra que un grado de hibridación alto (alrededor del 40%) permite obtener resultados más favorables.

Conclusiones

El proyecto llevado a cabo ha analizado las diversas alternativas dentro de la tecnología híbrida como opción para reducir consumos de combustible, las ha comparado y ha seleccionado la más adecuada, tal y como se había fijado en los objetivos.

La principal conclusión que se obtiene de este proyecto es la demostración de la existencia de una tecnología *rentable* capaz de reducir los consumos de un vehículo comercial ligero en un 20% para el ciclo NEDC.

Con ello queda demostrado que la tecnología híbrida representa:

- Una tecnología viable a medio/corto plazo: en su aplicación al motor de combustión interna (diesel o gasolina).

- Pero también una tecnología a tener en cuenta para el futuro: en su aplicación a los combustibles alternativos (biocombustibles, GN, H_2).

De entre las alternativas evaluadas se puede concluir que la serie-paralelo es la que obtiene mejores resultados en su aplicación a los vehículos comerciales ligeros y, por lo tanto, es la alternativa con más posibilidades de triunfar en una hipotética comercialización de este producto.

Quedan, sin embargo, dos elementos que deberían ser estudiados con mayor profundidad, pero que se escapan del ámbito de estudio de este proyecto. Esto es:

- Primero, la representatividad del ciclo NEDC respecto del ciclo habitual realizado por el usuario de los vehículos comerciales ligeros.

- Segundo, el análisis exhaustivo de la disminución de las emisiones contaminantes que supondría la aplicación de la tecnología híbrida. En este proyecto se ha detallado la influencia sobre el consumo y en consecuencia del CO_2, pero el resto de emisiones no han sido analizadas. (Aunque de acuerdo con otros estudios realizados sobre vehículos de turismo, la disminución de emisiones de CO, NOx, HC… por la aplicación de la tecnología híbrida produce resultados extraordinarios).

Bibliografía

Referencias bibliográficas

[1] FRANCESC LIESA Y DANIEL CLOS. *Vehicles I. Prestacions*. Barcelona: CPDA, 1998, p. 43.

[2] HENRIOT, G. *Traité Théorique et Pratique des Engrenages*, Paris : DUNOD, 1968, p.80-81.

[3] ORIOL BOIX, LUÍS SAINZ, FELIPE CÓRCOLES, FRANCESC J.SUELVES. *Tecnología Eléctrica Vol.I.* Barcelona: CPDA, 2002, p. 37-38

[4] NREL. Ayuda del programa ADVISOR ®. p. 43-44-55-58-59.

Bibliografía complementaria

[1] JOHN M.MILLER. *Propulsión Systems for Hybrid Vehicles*. London: The Institution of Electrical Engineers, 2004.

[2] IQBAL HUSAIN. *Electric and Hybrid Vehicles. Design Fundamentals*. USA: CRC Press. 2003.

[3] C.C.CHAN and K.T.CHAU. *Modern Electric Vehicle Technology.* London: Oxford Science Publications. 2001.

[4] G.NIEMANN. *Elementos de máquinas. Primera Parte*. Barcelona: CPDA. 1998.

[5] G.NIEMANN. *Elementos de máquinas. Segunda Parte: Transmisiones*. Barcelona. CPDA. 1998.

[6] HARRY L. HUSTED. *A Comparative Study of the Production Applications of Hybrid Electric Powertrain.* SAE Paper: 2003-01-2307. 2003.

[7] TOYOTA MOTOR CO. *Toyota Hybrid System. THS II*. [www.toyota.com]

[8] ISIDOR BUTCHMAN. *What is the perfect battery?.* [www.evbattery.com]. 2001

[9] LINGFENG WANG. *Hybrid Electric Vehicle Design Based on a Multi-Objective*

Optimization Evolutionary Algorithm. Texas A&M University. 2005.

[10] Z. RAHMAN, K.L. BUTLER and M. EHSANI. *A study of Design Issues on Electrically Peaking Hybrid Electric Vehicle for Diverse Urban Driving Patterns*. SAE Paper: 1999-01-1151. 1999.

[11] JOAN BOTEY. *Area 9. Regalmentación. Motor. Emisiones.* FUNDACIÓ POLITÈCNICA DE CATALUNYA. MASTER DE INGENIERÍA Y GESTIÓN INDUSTRIAL DE AUTOMOCIÓN: 2003.