



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)  
INGENIERO INDUSTRIAL

# **ANÁLISIS SOBRE LA IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA KERS, EN UN VEHÍCULO CONVENCIONAL MEDIANTE SIMULACIÓN**

Autor: Teresa Serrano Villodres  
Director: Juan de Norverto Moriñigo

Madrid  
Mayo 2015

Madrid  
Mayo 2015



Proyecto realizado por el alumno/a:

**Teresa Serrano Villodres**

Fdo.:  Fecha: 26/04/2015

Autorizada la entrega del proyecto cuya información no es de carácter confidencial

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

**Juan de Norverto Moriño**

Fdo.:  Fecha: 13/ 05/2015

Vº Bº del Coordinador de Proyectos

**José Ignacio Linares Hurtado**

Fdo.: Fecha: ...../ ...../ .....





UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)  
INGENIERÍA INDUSTRIAL



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)  
INGENIERO INDUSTRIAL

# ANÁLISIS SOBRE LA IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA KERS, EN UN VEHÍCULO CONVENCIONAL MEDIANTE SIMULACIÓN

Autor: Teresa Serrano Villodres  
Director: Juan de Norverto Moriñigo

Madrid  
Mayo 2015





# ANÁLISIS SOBRE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA KERS, EN UN VEHÍCULO CONVENCIONAL MEDIANTE SIMULACIÓN

Autor: **Serrano Villodres, Teresa.**

Director: Norverto Moriñigo, Juan.

Entidad Colaboradora: ICAI - Universidad Pontificia Comillas.

## RESUMEN DEL PROYECTO

### Introducción

Los sistemas de recuperación de energía se introdujeron por primera vez en la temporada del 2009 en la *Fórmula 1*. Su descubrimiento comenzó con el *KERS* (*Kinetic Energy Recovery System*), dispositivo que permitía aprovechar la energía disipada en la frenada para posteriormente proporcionar una potencia extra al monoplaça.

El transporte es uno de los sectores que mayor dependencia en el petróleo y sus derivados. Los consumos y los costes de las energías de recursos limitados como el petróleo, se han incrementado a lo largo del tiempo y suponen un verdadero problema en el consumo energético del mundo occidental.

España padece una alta dependencia de los países productores de hidrocarburos, ya que la inmensa mayoría de los mismos han de ser importados. Los cambios en los precios internacionales, afectan directamente a la economía de los españoles ya que el consumo energético en el transporte representa en torno al 40% del total de la energía consumida. A la subida del petróleo y sus derivados, se une la demanda de vehículos más económicos en cuanto al consumo por parte de la población, que además desea un producto cada vez más respetuoso con el medio ambiente. Además no hay que olvidar la necesidad de cumplir con las normativas regulatorias de emisiones cada vez más exigentes.

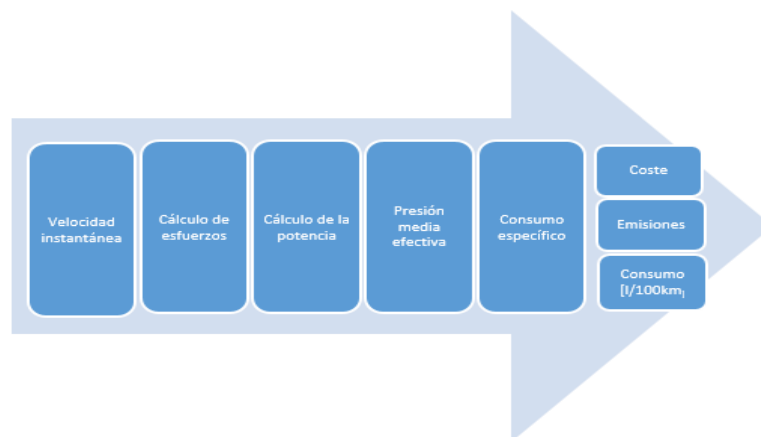
Ante esta situación, se idearon los conocidos sistemas de recuperación de energía, entre ellos el *KERS*, el cual se estudiará en este proyecto. Para ello, se ha realizado un análisis técnico de cómo afecta la adición de este sistema a un vehículo convencional y analizar el impacto que éste tiene sobre el consumo y emisiones de CO<sub>2</sub>.

Para la evaluación de estos objetivos, se ha elaborado un simulador mediante la interfaz de *Matlab*, conocida como *Simulink*. Mediante esta herramienta capaz de simular con la mayor precisión posible el impacto del sistema de recuperación de energía (*KERS*), se reproduce el comportamiento del vehículo siguiendo el ciclo NEDC y analiza los resultados obtenidos.

### Elaboración del simulador

Como se ha mencionado anteriormente, el propósito de la construcción de este simulador es poder evaluar cómo afecta la implementación de un *KERS* en un vehículo convencional. Para la simulación, se ha aplicado un *KERS* a un *Nissan Qashqai 1.5 dCi de 110 CV*.

Para la simulación, se comienza con la obtención de los esfuerzos resistentes mediante las ecuaciones de la dinámica. Con los datos de la velocidad gracias al ciclo NEDC y a las ecuaciones de la dinámica aplicadas sobre el vehículo, obtenemos la potencia efectiva y régimen del motor en cada instante. El simulador por tanto es capaz de obtener los esfuerzos resistentes y la potencia necesaria, la velocidad de giro del motor, el consumo y las emisiones de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera. En el siguiente gráfico se observa la secuencia seguida:



*Secuencia seguida para la elaboración del simulador*

### Resultados y conclusiones:

Mediante la elaboración de este proyecto, se ha hecho un análisis de distintas simulaciones. La primera simulación, consta de un motor de combustión interna, es decir, la simulación de un *Nissan Qashqai* y se ha





comprobado la calibración del simulador con los datos aportados por el fabricante.

La segunda simulación, consta de un motor de combustión interna al que se le añade un *KERS*, con sus correspondientes baterías para almacenar la energía y un motor eléctrico. Para la elaboración del simulador se ha tenido en cuenta la adición de peso que el *KERS* suma, además de la función de recuperar energía de la frenada para posteriormente ser usada.

En la tercera simulación, se añade un sistema *Start&Stop* al motor de combustión y se analizan las repercusiones que éste produce sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> y consumo del vehículo.

Finalmente, las últimas dos simulaciones han sido simular las tres descritas anteriormente para distintos vehículos y analizar cómo afectaría una disminución del peso del sistema de recuperación de energía.

Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

Nissan Qashqai	<i>Fabricante</i>	<i>Térmico</i>	<i>Start&amp;Stop</i>	<i>Híbrido</i>
<i>Consumo [l/100km]</i>	5	5.15	4.723	2.965
<i>Ahorro consumo [%]</i>	0	0	8.29	42.43
<i>Emisiones [g/km]</i>	137	126.11	115.61	72.57
<i>Ahorro emisiones [%]</i>	0	0	8.33	42.46

*Resultados obtenidos para el Nissan Qashqai*

Como se puede observar de la tabla, la calibración del simulador es buena. Los resultados arrojan resultados muy favorables tanto para el sistema *Start&Stop* como para a la implantación de un *KERS* en los vehículos de calle, produciéndose un ahorro de combustible de un 42.43%. Además, a esto se añade el coste que supondría incluir este sistema, que se ha estimado en 2498.56 € por unidad. Por lo tanto, en 4 años aproximadamente se habría amortizado el incremento de costes y a partir de entonces comenzar a ahorrar combustible.

En cuanto a la segunda parte del proyecto, se ha estudiado cómo afectaría una reducción de peso del *KERS* en un 25% y 50%. Además se ha realizado un estudio de cómo afecta la adición de un *KERS* en distintos vehículos que usan el mismo motor que el *Nissan Qashqai*. Los resultados fueron los siguientes:

	0%	25%	50%
<i>Consumo [l/100km]</i>	2.965	2.875	2.8063
<i>Ahorro consumo</i>	42.43 %	44.18 %	45.51 %
<i>Emisiones [g/km]</i>	72.57	70.37	68.69
<i>Reducción emisiones</i>	42.46 %	44.2 %	45.54 %

*Reducción de peso de un KERS en un Nissan Qashqai*

Como se puede observar, la reducción de peso del 50% en el *KERS* supondría una reducción del consumo equivalente a un 3.08 %.

El análisis obtenido con la simulación de diferentes sistemas aplicado a varios vehículos existentes en el mercado ha arrojado los siguientes resultados (consumo en *l/100km* y emisiones de  $CO_2$  en *g/km*):

	<i>TÉRMIICO</i>		<i>START&amp;STOP</i>		<i>KERS (HÍBRIDO)</i>	
	<i>Consumo</i>	<i>Emisiones</i>	<i>Consumo</i>	<i>Emisiones</i>	<i>Consumo</i>	<i>Emisiones</i>
<i>Qashqai</i>	5.15	126.11	4.72	115.61	2.97	72.57
<i>Ahorro[%]</i>	0	0	8.35	8.33	42.33	42.45
<i>Juke</i>	4.90	120	4.47	109.50	2.47	60.50
<i>Ahorro[%]</i>	0	0	8.78	8.75	49.59	49.58
<i>Clio</i>	3.958	96.87	3.53	86.38	2.19	53.50
<i>Ahorro[%]</i>	0	0	10.81	10.83	44.67	44.77
<i>Megane</i>	4.63	113.52	4.21	103.03	2.64	64.69
<i>Ahorro[%]</i>	0	0	9.07	9.24	42.98	43.01

*Resultados de distintos vehículos con un sistema Start&Stop y con un KERS*

Puede comprobarse como la reducción tanto en consumo como en emisiones de  $CO_2$  ha sido superior en el modelo *Nissan Juke* debido a su relación peso (incluido el *KERS*) y dimensiones que hacen que la implantación de este sistema de recuperación de energía sea óptimo en este vehículo.



Finalmente, la reducción a casi la mitad en el consumo de combustible-mostrado en la *Tabla 1*, ratifica el ahorro derivado de la implantación de estos sistemas de recuperación de energía. La efectividad tanto del sistema *Start&Stop* como de los frenos regenerativos ha quedado demostrada. En el caso de los sistemas *Start&Stop*, las marcas que lo incluyen en sus vehículos lo hacen de serie, por lo que es difícil de calcular el periodo de amortización. Sin embargo, en el caso de los frenos regenerativos, el incremento de costes en 4 años quedaría amortizado. Además, se estima que la vida media de un vehículo en España es de 11.3 años, por lo que durante gran parte de la vida útil del automóvil se mantendría una reducción clara en los costes de utilización, produciéndose así un ahorro sustancial para el cliente.





# ANALYSIS ON THE IMPLEMENTATION OF AN ENERGY RECOVERY SYSTEM IN A CONVENTIONAL VEHICLE THROUGH SIMULATION

## PROJECT SUMMARY

### Introduction

The Energy Recovery Systems were first introduced in the 2009 season in Formula 1. The mother of this discovery was the KERS (Kinetic Energy Recovery System), device that allowed to store the energy dissipated in the brakes to provide extra power to the vehicle.

Transport is one of the sectors with the highest dependence on oil and its derivatives. The consumption and energy costs of limited resources such as oil, have increased over time and have become a real problem on the energy consumption in Western countries.

Spain suffers a heavy dependence on oil producer countries since the vast majority of it needs to be imported. Changes in international prices affect directly to the Spanish economy as the energy consumption in transport accounts for 40% of the total energy consumed. The rise of the price of oil and its derivatives has made the demand for more efficient vehicles increase. Furthermore, people look for environmentally friendly products and we should not forget the need to comply with the regulatory standards of emissions, which have become more restrictive over the last years.

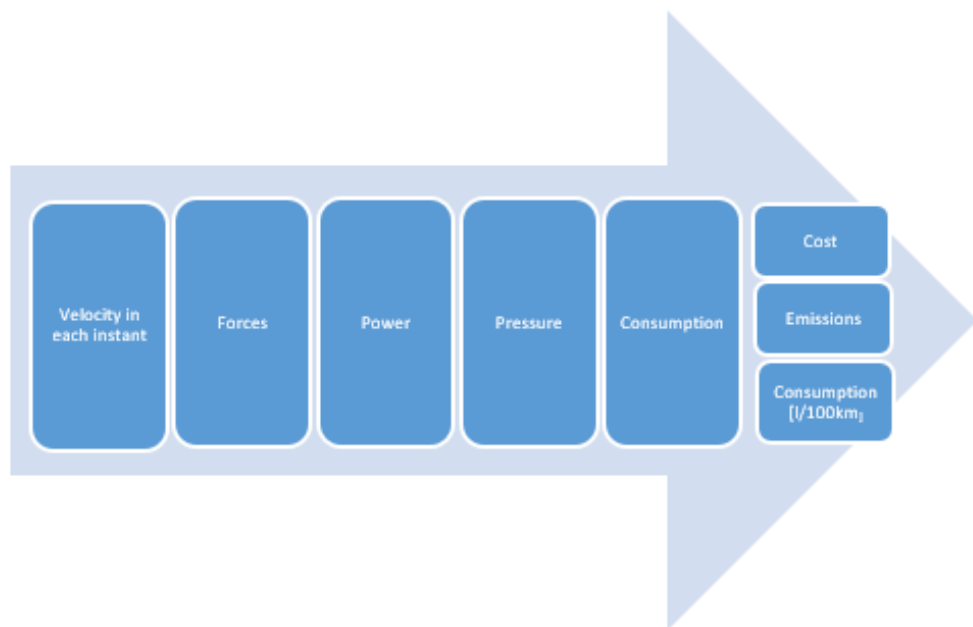
In this context, the Recovery Energy Systems were developed, including the KERS, device that will be studied in this project. In order to study this device, a technical analysis has been made to see how the addition of this system affects to a conventional vehicle. A study of the impact of consumption and emission of CO<sub>2</sub> of the vehicles has been made.

For the evaluation of these objectives, a simulator has been developed using a *Matlab* interface, known as Simulink. This tool can simulate as accurately as possible the impact of the Kinetic Energy Recovery System (KERS) by analysing the behaviour of the vehicle following the NEDC cycle.

### Development of the simulator

As mentioned above, the purpose of the construction of the simulator is to evaluate how the implementation of a KERS to a conventional vehicle affects. For the simulation, a *KERS* has been applied to a *Nissan Qashqai 1.5 dCi 110 HP*.

In order to start the simulation, we begin by obtaining the resistant forces by the dynamic equations. To continue, with the dynamic equations and the velocity obtained from the *NEDC cycle*, we obtain the power and motor regime for each instant. The simulator is able to obtain the forces, the engine speed, fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions to the atmosphere. The following image shows the sequence followed:



*Sequence followed for the creation of the simulator*

### Results and conclusions

Through the development of this project, an analysis of different simulations has been done. The first simulation studies the internal combustion engine of a *Nissan Qashqai* and checks the results obtained with the data provided by the manufacturer (*Nissan*).



The second simulation consists of an internal combustion engine which has been added a KERS, including batteries to store the energy and an electric motor. It has been taken into account the addition of weight the KERS implies and the function of obtaining energy from the brakes.

In the third simulation, a Start&Stop system has been included to the combustion engine and the effects on the vehicle CO<sub>2</sub> emissions and consumption are analyzed.

Finally, the two last simulations have been to analyse the three simulations explained before for different car brands and study how a reduction of up to 50% of the weight of the KERS affects.

The results obtained have been the following:

Nissan Qashqai	<i>Manufacturer</i>	<i>Combustion</i>	<i>Start&amp;Stop</i>	<i>Hibrid</i>
<i>Consumption [l/100km]</i>	5	5.15	4.723	2.965
<i>Reduction consumpt. [%]</i>	0	0	8.29	42.43
<i>CO2 Emissions [g/km]</i>	137	126.1	115.61	72.57
<i>Reduction emissions [%]</i>	0	0	8.33	42.46

*Results obtained for Nissan Qashqai*

As seen in the table, the calibration of the simulator is very good and accurate. The results show very favorable results for both, the *Start&Stop* system and for the addition of the *KERS*, resulting in savings of 42.43%. Furthermore, the cost of this system has been estimated to 2498.56 € per unit. Therefore, in approximately four years the increase of cost could be amortized and from there on start saving fuel.

The second part of the project, studied how the reduction of weight of 25% and 50% would affect. In addition, a study of how the KERS affects in different vehicles was made. These vehicles use the same engine as Nissan Qashqai.

The results obtained were the following (Fuel consumption in *l/100km* and CO<sub>2</sub> emissions in *g/km*):

	<i>COMBUSTION ENGINE</i>		<i>START&amp;STOP</i>		<i>KERS (HIBRID)</i>	
	<b>Fuel Consump.</b>	<b>CO2 Emissions</b>	<b>Fuel Consump.</b>	<b>CO2 Emissions</b>	<b>Fuel Consump.</b>	<b>CO2 Emissions</b>
<i>Qashqai</i>	5.15	126.11	4.72	115.61	2.97	72.57
<i>Saving</i>	0 %	0 %	8.35 %	8.33 %	42.33 %	42.45 %
<i>Juke</i>	4.90	120	4.47	109.50	2.47	60.50
<i>Saving</i>	0 %	0 %	8.78 %	8.75 %	49.59 %	49.58 %
<i>Clio</i>	3.958	96.87	3.53	86.38	2.19	53.50
<i>Saving</i>	0 %	0 %	10.81 %	10.83 %	44.67 %	44.77 %
<i>Megane</i>	4.63	113.52	4.21	103.03	2.64	64.69
<i>Saving</i>	0 %	0 %	9.07 %	9.24 %	42.98 %	43.01 %

*Results for different brand vehicles with Start&Stop and KERS*

As the table shows, the reduction of consumption and CO<sub>2</sub> emissions were the highest in the Nissan Juke model, due to the dimensions-weight ratio (including the KERS) which makes it the most optimal vehicle, from the studied, to include a KERS.

Finally, as shown in *Table 1*, it can be concluded that adding a *Start&Stop* system or a *KERS* saves fuel and reduces CO<sub>2</sub> emissions. The effectiveness of both, the *Start&Stop* system and the regenerative braking, has been demonstrated. In the case of the *Start&Stop* system, brands include this system in standard vehicles, so it is difficult to calculate the payback period. However, in the case of the regenerative braking, the increased cost at the beginning, would be amortized over 4 years. Furthermore, it is estimated that the average life of a vehicle in Spain is of 11.3 years, so a clear increase of the savings of the customer can be made.





*A mi director de proyecto, Juan de Norverto, por los consejos y orientación que me ha brindado.*

*A mi familia, y en especial a mis padres y a mi hermana Cristina, por sus ánimos y gran apoyo durante estos cinco años de carrera.*

*A mis amigos, por los éxitos y experiencias vividas y su ayuda prestada a lo largo de todos estos años.*





# Índice general

<b>Capítulo 1</b> .....	35
Introducción.....	35
1.1. Estado de la cuestión .....	35
1.2. Motivación .....	37
1.3. Objetivos.....	38
1.4. Metodología de trabajo .....	38
1.5 Recursos a emplear.....	40
<b>Capítulo 2</b> .....	41
Comportamiento del vehículo .....	41
2.1. Fuerzas que se oponen al desplazamiento del vehículo.....	41
2.1.1 Fuerza aerodinámica.....	42
2.1.2 Fuerza de rozamiento a la rodadura de los neumáticos .....	45
2.1.3 Fuerza de ascensión.....	48
2.1.4 Fuerza resistente total .....	48
2.2. Equilibrio de fuerzas. Aceleración y Fuerza motriz.....	49
<b>Capítulo 3</b> .....	55
Vehículo Híbrido .....	55
3.1. Clasificación .....	56
3.2. Componentes del vehículo híbrido.....	58
3.3. Carga y descarga de las baterías y su funcionamiento .....	59
3.4. Ahorro combustible en un vehículo híbrido .....	61
<b>Capítulo 4</b> .....	63
Sistemas de Recuperación de energía .....	63
4.1. Freno regenerativo o <i>KERS</i> .....	63
4.1.1 Funcionamiento del <i>KERS</i> .....	65
4.1.2 Funcionamiento del <i>KERS</i> en coches eléctricos o híbridos.....	65
4.1.3 Recuperación de la energía: Sistemas Eléctricos.....	66
4.1.4 Recuperación de la energía: Sistemas Mecánicos .....	67
4.2. <i>Energy Recovery System</i> o <i>ERS</i> .....	69
4.3. Sistema de recuperación de las fuerzas gravitatorias o <i>GFRS</i> .....	71
4.3.1 Funcionamiento del <i>GFRS</i> .....	72

4.4. Sistema Start and Stop.....	72
<b>Capítulo 5.....</b>	<b>75</b>
Elaboración del simulador .....	75
5.1. Consideraciones previas .....	75
<b>Capítulo 6.....</b>	<b>79</b>
Elaboración del simulador: Motor térmico .....	79
6.1. Obtención de los esfuerzos resistentes y potencia requerida.....	81
6.2. Régimen de giro del motor .....	85
6.3. Presión media efectiva.....	90
6.4. Consumo específico .....	91
6.5. Consumo .....	93
6.6. Emisiones de CO <sub>2</sub> .....	94
<b>Capítulo 7.....</b>	<b>97</b>
Elaboración del simulador: Motor híbrido .....	97
7.1. Conversión y almacenamiento de energía .....	102
7.2. Régimen de giro del motor eléctrico .....	105
7.3. Consumo híbrido.....	107
7.4. Emisiones de CO <sub>2</sub> de un híbrido .....	109
<b>Capítulo 8.....</b>	<b>111</b>
Elaboración del simulador: Motor térmico con Start & Stop .....	111
8.1. Consumo[l/h] .....	112
8.2. Emisiones de CO <sub>2</sub> [kg/100km] .....	113
<b>Capítulo 9.....</b>	<b>117</b>
Resultados.....	117
9.1. Consumo de un vehículo con motor térmico, híbrido y con sistema Start&Stop .....	118
9.2. Emisiones de CO <sub>2</sub> de un vehículo con motor térmico, híbrido y con sistema Start&Stop .....	119
9.3 Consumo y emisiones para distintos vehículos .....	120
9.4 Reducción de peso del sistema de recuperación de energía al 25% y 50% .....	122
9.5. Balance económico .....	124
<b>Capítulo 10.....</b>	<b>127</b>
Conclusiones .....	127
10.1 Consumo según el trazado de la carretera .....	128



10.2 Conclusiones sobre la mejora del consumo .....	128
10.3 Conclusiones sobre las emisiones de CO <sub>2</sub> .....	129
10.4 Conclusiones sobre el KERS y Sistema Start&Stop en distintos vehículos. ....	130
10.5 Conclusiones sobre el coste económico .....	131
10.6 Cumplimiento de los objetivos .....	131
<b>Capítulo 11</b> .....	133
Futuros desarrollos .....	133
11.1 Desarrollo del <i>Software</i> con otras aplicaciones.....	133
11.2 Ampliaciones sobre los sistemas de recuperación de energía .....	135
<b>Capítulo 12</b> .....	137
Estudio económico.....	137
12.1 Tareas previas al proyecto .....	137
12.2 Elaboración del Simulador mediante <i>Simulink</i> .....	138
12.3 Simulación, análisis de resultados y conclusiones .....	139
12.4 Resumen y presupuesto .....	139
Bibliografía .....	141
Anexo I: MANUAL DE USUARIO .....	143
Anexo II: FICHAS TÉCNICAS VEHÍCULOS .....	1499
Anexo III: CATÁLOGO DEL MOTOR ELÉCTRICO .....	1555





## Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Posición del KERS en un monoplaza .....	36
Ilustración 2: Distribución de tareas .....	39
Ilustración 3: Fuerzas resistentes .....	42
Ilustración 4: Área frontal proyectada de un vehículo .....	43
Ilustración 5: Descomposición de la Fuerza Aerodinámica .....	43
Ilustración 6: Coeficiente de fricción a la rodadura según el tipo de neumático .....	45
Ilustración 7: Tipos de neumáticos. Diagonales (izq) y radiales (dcha) .....	46
Ilustración 8: Tipos de neumáticos .....	46
Ilustración 9: Coeficiente de resistencia a la rodadura para distintos tipos de suelo ..	48
Ilustración 10: Coeficiente de inercia rotacional .....	50
Ilustración 11: Curva de isoconsumo del motor Volkswagen 1.9 TDI .....	53
Ilustración 12: Ventas automóvil híbrido para Toyota y Honda .....	56
Ilustración 13: Híbrido en serie .....	57
Ilustración 14: Híbrido en paralelo .....	57
Ilustración 15: Principio de funcionamiento batería .....	60
Ilustración 16: Esquema de frenado regenerativo de Toyota Prius .....	64
Ilustración 17: Freno regenerativo de un tren .....	65
Ilustración 18: Campo magnético inducido por la corriente que circula .....	66
Ilustración 19: Sistema de Recuperación de energía: Sistemas mecánicos .....	68
Ilustración 20: MGU-H con turbocompresor .....	70
Ilustración 21: Funcionamiento del Start-Stop .....	73
Ilustración 22: Botón Start-Stop .....	74
Ilustración 23: Nissan Qashqai 1.5 dCi .....	75
Ilustración 24: Isoconsumos en forma de matriz en EXCEL .....	78
Ilustración 25: Vista global del motor térmico (simulación) .....	80
Ilustración 2126: Subsistema "Esfuerzos resistentes" .....	81
Ilustración 27: Velocidad [km/h] y aceleración [m/s] .....	82
Ilustración 28: Fuerza total .....	83
Ilustración 29: Potencia requerida en KW .....	84

Ilustración 30: Subsistema "Régimen de giro" .....	85
Ilustración 31: Régimen de giro/Ralentí .....	86
Ilustración 32: Gama de velocidades para cada marcha F1 .....	86
Ilustración 33: Subsistema "Marcha" .....	87
Ilustración 34: Subsistema Desarrollos.....	88
Ilustración 35: Régimen de giro [rpm], Marcha y Desarrollo .....	89
Ilustración 36: Subsistema Presión media efectiva .....	90
Ilustración 37: Presión media efectiva [bar].....	91
Ilustración 38: Subsistema Consumo Específico.....	92
Ilustración 39: Consumo específico [g/kwh].....	92
Ilustración 40: Subsistema Consumo.....	93
Ilustración 41: Velocidad [km/h] vs Consumo [l/h] .....	94
Ilustración 42: Subsistema emisiones de CO2.....	94
Ilustración 43: kg de CO2 cada 100km .....	95
Ilustración 44: Batería Bosch elegida.....	97
Ilustración 45: Motor Siemens elegido.....	100
Ilustración 46: Unidad de control elegida.....	100
Ilustración 47: Visión general del motor eléctrico en Simulink .....	101
Ilustración 48: Conversión de energía y carga de batería .....	103
Ilustración 49: Subsistema "Sistema de recuperación de energía" .....	104
Ilustración 50: Cálculo de régimen de giro del motor eléctrico .....	105
Ilustración 51: Régimen de giro del motor eléctrico .....	106
Ilustración 52: Sistema para obtener el Consumo específico del híbrido .....	107
Ilustración 53: Consumo Híbrido .....	108
Ilustración 54: Consumo híbrido [l/h].....	108
Ilustración 55: Cálculo del consumo medio de un vehículo híbrido.....	109
Ilustración 56: Emisiones CO2, híbrido.....	110
Ilustración 57: Emisiones CO2 [kg/100km] vs Velocidad [km/h] .....	110
Ilustración 58: Vista general del sistema Start&Stop de Simulink.....	111
Ilustración 59: Consumo Start and Stop [l/h] .....	112
Ilustración 60: Consumo [l/h] vs velocidad [km/h] con sistema Start&Stop.....	112
Ilustración 61: Zoom consumo [l/h] vs velocidad [km/h] con sistema Start&Stop...	113





Ilustración 62: Emisiones de CO <sub>2</sub> , con sistema Start&Stop .....	114
Ilustración 63: Emisiones CO <sub>2</sub> [kg/100km] vs Velocidad [km/h] con sistema Start&Stop .....	114
Ilustración 64: Zoom Emisiones CO <sub>2</sub> [kg/100km] vs Velocidad [km/h] con sistema Start&Stop .....	115
Ilustración 65: Gráfico de consumos con distintos sistemas.....	119
Ilustración 66: Gráfico de emisiones de CO <sub>2</sub> para distintos sistemas .....	120
Ilustración 67: Ahorro combustible con sistema de recuperación de energía en distintos vehículos .....	121
Ilustración 68: Disminución de emisiones de CO <sub>2</sub> para distintos vehículos.....	122
Ilustración 69: Consumos con distintas reducciones de peso del sistema recuperador de energía .....	123
Ilustración 70: Emisiones con distintas reducciones de peso del sistema de recuperador de energía .....	124
Ilustración 71: Consumo híbrido [l/h] vs la velocidad [km/h] .....	128
Ilustración 72: Interfaz MATLAB para la selección de la carpeta .....	1455
Ilustración 73: Vista del fichero DATOS_CONSUMO.m .....	1466
Ilustración 74: Vista de la simulación e icono "Run" .....	1477





## Índice de tablas

Tabla 1: Distribución de tareas .....	39
Tabla 3: Poderes caloríficos para distintos combustibles.....	51
Tabla 4: Características batería BOSCH .....	98
Tabla 5: Características motor eléctrico Siemens.....	99
Tabla 6: Resumen de resultados de consumo .....	118
Tabla 7: Resultado de emisiones de CO <sub>2</sub> para distintos sistemas .....	119
Tabla 8: Tabla comparativa de consumos y emisiones para distintos vehículos.....	121
Tabla 9: Comparación de consumo y emisiones mediante una reducción de peso..	123
Tabla 10: Coste de combustible durante 20 min.....	124
Tabla 11: Coste sistema de recuperación de energía .....	125
Tabla 12: Reparto horas correspondientes a las tareas previas al proyecto.....	137
Tabla 13: Reparto horas correspondientes a las tareas para la elaboración del simulador .....	138
Tabla 14: Reparto de horas correspondiente a la simulación, recopilación de resultados y conclusiones .....	139
Tabla 15: Presupuesto en función de horas de trabajo y retribución asignada .....	140





# Parte I:

# Memoria





# Capítulo 1

## Introducción

Los sistemas de recuperación de energía se introdujeron por primera vez en la Fórmula 1 en la temporada 2009, con el objetivo de promover la investigación y extraer enseñanzas para posteriormente introducirlas en los coches de producción masiva.

El transporte es uno de los sectores de mayor consumo energético y que mayor presión viene ejerciendo al alza sobre el consumo de energía. Existe una evolución, que aunque compartida con otros países cercanos, es más acusada en el nuestro. España padece una alta dependencia de hidrocarburos (petróleo y gas) como de su importación. Los cambios en los precios internacionales de estos afectan directamente a la economía de los españoles ya que el consumo de energía en el transporte representa en torno a un 40% del consumo total del país. Por lo tanto, es imprescindible idear una alternativa al consumo de petróleo.

Los fabricantes de automóviles muestran un interés creciente en el desarrollo de los sistemas de recuperación de energía en frenada. En todos los vehículos, ya sean híbridos, eléctricos, convencionales con *Start-Stop*, la energía que antiguamente se perdía en la frenada se convierte en energía eléctrica que se puede almacenar en baterías o acumuladores para posteriormente cuando sea necesaria reutilizarla. Lo que prima en todos estos vehículos es ahorrar en el consumo y prolongar la autonomía sin perder por ello confort o prestaciones.

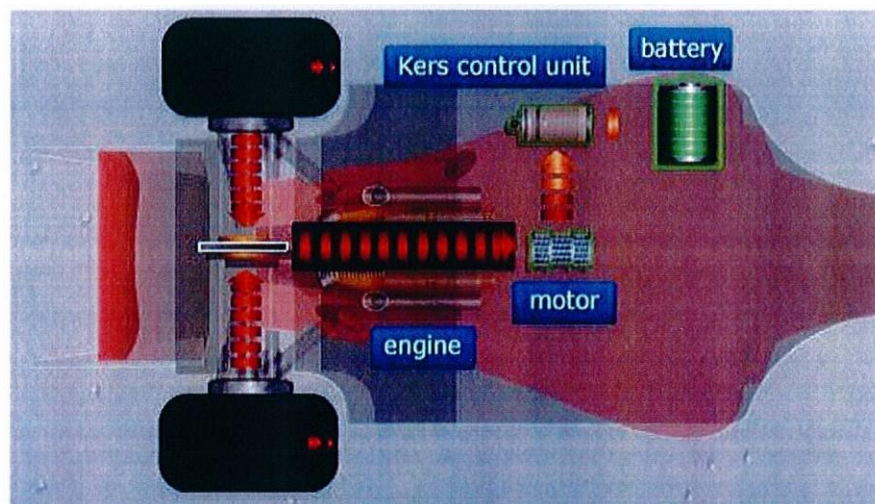
### 1.1. Estado de la cuestión

Los sistemas de recuperación de energía se empezaron a utilizar en 2009 con el freno regenerativo o *KERS (Kinetic Energy Recovery System)*, dispositivo que permite aprovechar la velocidad del coche al ser frenado para almacenar esa energía cinética de diversas formas aunque la más

conocida es la eléctrica. Estos frenos regenerativos se emplean actualmente en coches híbridos y eléctricos para auto-recargar las baterías.

Existen tres opciones para diseñar un KERS: un sistema mecánico, un sistema eléctrico o un sistema neumático. La mayoría de los vehículos, apuestan por el sistema mecánico puesto que es más eficiente y compacto. Para continuar, el sistema eléctrico también es usado en múltiples ocasiones ya que puede colocarse en cualquier posición del monoplaza (en el mecánico ha de estar cerca de la transmisión). No obstante, es menos eficiente ya que debe de convertir energía mecánica en energía eléctrica y viceversa, con su consecuente pérdida de energía.

El funcionamiento consiste en que durante la frenada, las ruedas hacen que el motor siga girando, al contrario que cuando lo aceleramos (el motor es el que transmite la potencia a las ruedas). Por lo tanto, el motor funcionará como generador y manda energía a un acumulador (una batería o un acumulador del KERS). Esto por tanto permite recuperar parte de la energía gastada en los vehículos eléctricos o en el caso del KERS obtener una potencia extra.



*Ilustración 1: Posición del KERS en un monoplaza*

A partir del 2014, pasaron a llamarse ERS, simplemente Sistemas de Recuperación de Energía. Dentro del ERS, habrá dos sistemas distintos, ERS-H (H de Hot) donde se aprovecha el calor para generar energía y ERS-K (K de





Kinetic), que es el actual KERS que aprovecha la energía cinética. La potencia combinada entre ambos sistemas es de en torno unos 285 CV, divididos entre los 163CV provenientes de la energía cinética y 122 CV del aprovechamiento del calor.

Estos sistemas de recuperación se usan en diversos modelos de coches como los siguientes:

- Toyota: comercializa el modelo Prius desde 1997 usando un sistema de recuperación de energía. A partir del 2010, comienza a usar este tipo de freno regenerativo en su modelo Auris Híbrido HSD.
- BMW: incorporan un sistema que aprovecha la energía de frenado ("Brake Energy Regeneration") en los modelos "Efficient Dynamics" para recargar las baterías del coche sin usar un alternador continuamente, ahorrando combustible.
- Volvo: desarrolló un KERS propio para implementarlo en sus vehículos.
- Fíat: en 2013 incorpora a su nuevo modelo de Ferrari un KERS que le proporciona 163 CV de potencia.

En grandes ciudades con tráfico, es donde la idea de aprovechar la energía cinética sobrante de un vehículo se hace más necesaria. Los sistemas de recuperación de energía utilizan la energía desperdiciada en la frenada y tendríamos por tanto un medio para producir electricidad, sin gastar combustible fósil.

## 1.2. Motivación

Actualmente España tiene una dependencia energética exterior superior al 80%, frente a una media europea que ronda el 54%. El precio del combustible se ha visto incrementado durante los últimos años, razón por la cual se empieza a optar por otros sistemas de abastecimiento de energía o lo más importante, de recuperación de energía. A esto, se une la creciente preocupación por el impacto ambiental que originan los vehículos.

Los sistemas KERS se están comenzando a usar cada vez más en los coches híbridos para transformar la energía disipada en energía eléctrica.

### 1.3. Objetivos

Los objetivos del proyecto quedan definidos por:

- Elaboración de un modelo de simulación capaz de simular con la mayor precisión posible el impacto de un sistemas de recuperación de energía de un vehículo. El sistema elegido ha sido un KERS.
- Mediante el uso de este simulador, sacar conclusiones de cara a la eficiencia del ciclo de dicho sistema de recuperación de energía.

### 1.4. Metodología de trabajo

Una vez definidos los objetivos, se recopilará información sobre los distintos sistemas de recuperación de energía existentes a través de lecturas, bibliografías recomendadas, revistas y apuntes de distintas asignaturas para conocer los distintos componentes que lo forman. Se definirán claramente cuáles son los objetivos y planificar las distintas tareas estableciendo una serie de fechas límites.

Tras la documentación, se procederá a analizar cuáles son las ecuaciones que rigen los distintos sistemas para posteriormente, simularlos. Se analizarán los resultados, observando si es cierto que estos sistemas ayudan a mejorar la eficiencia del ciclo de un vehículo. Si dichos sistemas ayudan a la mejora de la eficiencia, se concluirá analizando cuánto de efectivos son y el precio que supondría implantarlo.



<i>Tareas</i>	<i>Duración</i>	<i>Comienzo</i>	<i>Fin</i>
<b>Recopilación de información</b>	2sem	14/07/2014	<b>28/07/2014</b>
<b>Lectura y estudio del material</b>	1sem	29/07/2014	<b>05/08/2014</b>
<b>Anexo A</b>	1 día	09/08/2014	<b>10/08/2014</b>
<b>Redacción Anexo B</b>	4 días	11/08/2014	<b>15/08/2014</b>
<b>Revisión Anexo B</b>	10 días	15/08/2014	<b>25/08/2014</b>
<b>Entrega Anexo B</b>	1 día	25/08/2014	<b>26/08/2014</b>
<b>Análisis de cada subsistema y cálculos previos</b>	40 días	02/09/2014	<b>12/10/2014</b>
<b>Simulaciones en Matlab</b>	30 días	01/11/2014	<b>01/12/2014</b>
<b>Análisis de resultados</b>	30 días	08/01/2015	<b>07/02/2015</b>
<b>Conclusiones de cada subsistema</b>	7 días	15/02/2015	<b>22/02/2015</b>
<b>Cálculos finales</b>	7 días	01/03/2015	<b>08/03/2015</b>
<b>Conclusiones</b>	10 días	10/03/2015	<b>20/03/2015</b>
<b>Redacción de la Memoria</b>	<b>190 días</b>	<b>12/10/2014</b>	<b>20/04/2015</b>

Tabla 1: Distribución de tareas

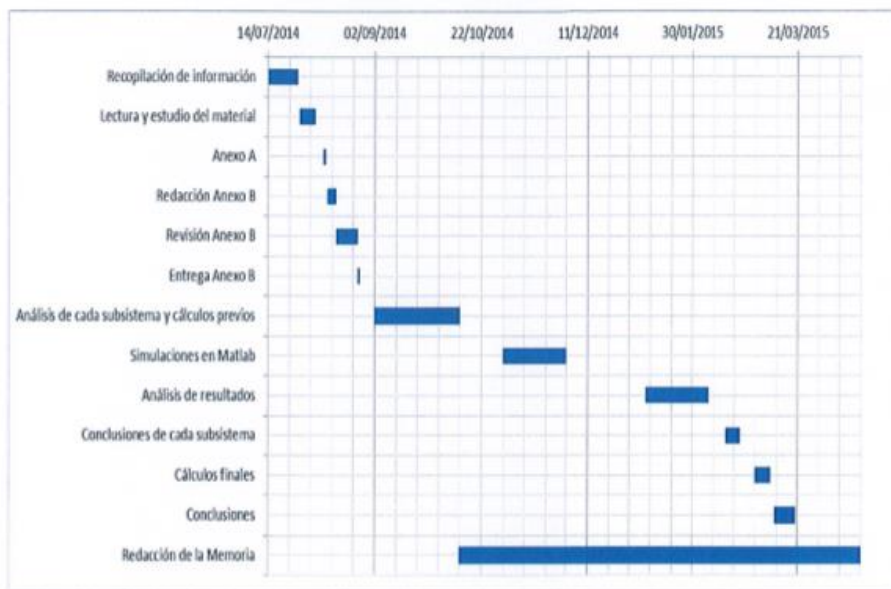


Ilustración 2: Distribución de tareas

## 1.5 Recursos a emplear

Para la recopilación de información y estado del arte se usarán los siguientes recursos:

- Apuntes de la plataforma SIFO de las asignaturas relevantes como pueden ser: Motores de Combustión Interna Alternativa, Máquinas Eléctricas o Regulación Automática.
- Internet
- Bibliografía
- Revistas

Para los cálculos posteriores y simulación de un vehículo con y sin sistemas de recuperación de energía se usará:

- Matlab, Módulo de Simulación (*Simulink*)
- Hojas de cálculo (Microsoft Office Excel)

Para la redacción final se recurrirá a:

- Microsoft Office Word



## Capítulo 2

### Comportamiento del vehículo

En este capítulo, se hace referencia a los distintos parámetros que van a ser de gran interés de cara a la simulación. Para modelar la dinámica del vehículo, es necesario conocer las fuerzas que se oponen al movimiento de este.

#### 2.1. Fuerzas que se oponen al desplazamiento del vehículo

Para el cálculo se aplica la segunda ley de Newton en dirección longitudinal:

$$F_t - \sum F_r = m \cdot km \cdot a \quad (1)$$

Donde  $F_t$  corresponde a la fuerza tractora y  $F_r$  al sumatorio de las fuerzas resistentes. Existen numerosas fuerzas que se aplican sobre el vehículo, siendo tres de gran importancia:

- Resistencia aerodinámica
- Resistencia a la rodadura
- Resistencia gravitatoria

Dichas fuerzas aparecen señaladas en el siguiente diagrama de cuerpo libre:

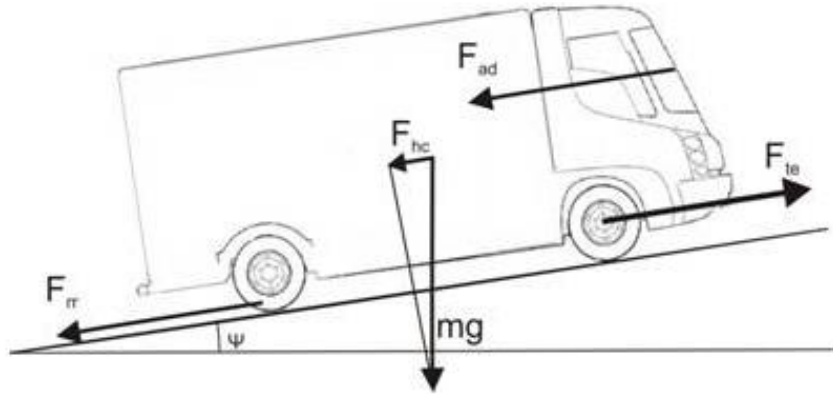


Ilustración 3: Fuerzas resistentes

### 2.1.1 Fuerza aerodinámica

Durante el movimiento del automóvil, este atraviesa una masa de aire que se opone a su movimiento. Esta fricción del cuerpo moviéndose a través del aire se denomina fuerza aerodinámica y tiene la siguiente expresión matemática:

$$F_{ae} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_f \cdot (V_{rel})^2 \quad (2)$$

Donde  $\rho$  corresponde a la densidad del aire. Esta depende de la altura y de la temperatura. A mayor altura, menor será la densidad; lo mismo ocurre con la temperatura, a mayor temperatura, menor densidad. En el caso de nuestra simulación la supondremos constante.

$A_f$  corresponde al área frontal del vehículo proyectada, como se puede mostrar en la figura de la siguiente página.

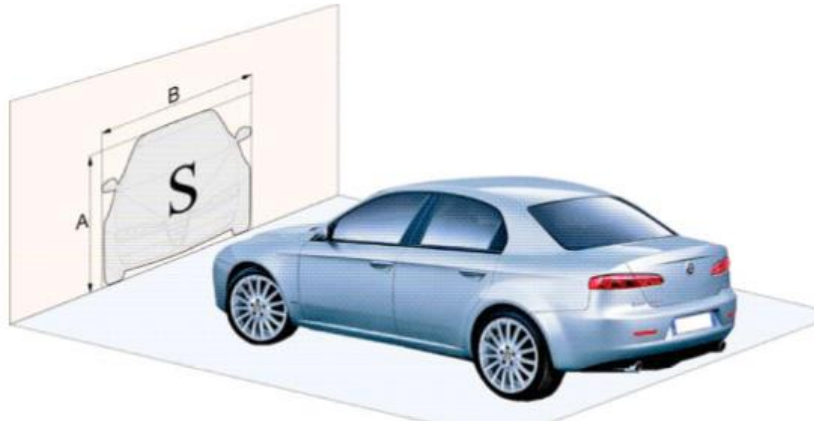


Ilustración 4: Área frontal proyectada de un vehículo

Se escoge este área frontal puesto que es el plano mayor de área donde se produce la separación de flujo aerodinámico de la carrocería, principal causa de resistencia aerodinámica en un automóvil.

$V_{rel}$  es la velocidad relativa entre el vehículo y la masa de aire. Se trata de una resta vectorial (viento en contra se suman, viento a favor se restan).

$$v_{rel} = v - v_{aire} \quad (3)$$

En cuanto a la componente del aire, vamos a tener sólo en cuenta la que es paralela al avance del vehículo.

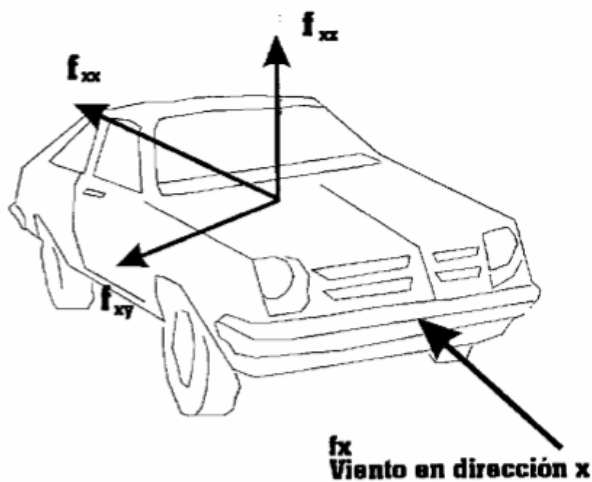


Ilustración 5: Descomposición de la Fuerza Aerodinámica

- $F_x$  es la fuerza que se opone al avance del vehículo
- $F_{xx}$  la componente según el eje x
- $F_{xy}$  la componente sobre el eje y
- $F_{xz}$  la componente sobre el eje z (Fuerza antideportante, ya que tiende a levantar el vehículo)

$C_x$  corresponde al coeficiente de penetración aerodinámico, también conocido en la mecánica de fluidos como  $C_D$  (coeficiente de arrastre o "drag"). El subíndice x, corresponde como se puede observar en la imagen al eje longitudinal. En la industria automovilística, se formula de la siguiente manera:

$$C_x = F_{xx}/F_x \quad (4)$$

Se trata de un coeficiente adimensional e indica el grado de "perturbación" que la forma del vehículo introduce en el aire. El  $C_x$  en automoción suele ser entre 0.25 y 0.40, aunque algunos vehículos experimentales o prototipos llegan a 0.20. La resistencia de un vehículo al moverse a través de un fluido es debida a dos razones:

- Debido al rozamiento viscoso de la carrocería con el aire al desplazarse el vehículo. No obstante, esta razón es de menor peso que la siguiente.
- La diferencia de presiones entre la parte delantera del vehículo y la trasera al desplazarse a través de un fluido. La parte delantera queda como punto de remanso donde la velocidad del vehículo es muy grande, traduciéndose en un incremento de presión. Sin embargo, en la parte trasera se produce el desprendimiento de la capa límite, traduciéndose en un cambio a flujo turbulento. Por lo tanto, esta diferencia entre presiones produce una fuerza opuesta al desplazamiento del automóvil.





### 2.1.2 Fuerza de rozamiento a la rodadura de los neumáticos

La resistencia a la rodadura se debe principalmente a la fricción que existe entre las ruedas del vehículo con la carretera, además de las debidas por los rodamientos y conexiones mecánicas. Se trata de una fuerza debida a la histéresis de los materiales del neumático durante la rodadura. Su expresión matemática es la siguiente:

$$F_{rod} = (f_0 + f_v \cdot V^n) \cdot M \cdot g \cdot \cos\theta \quad (5)$$

Donde  $f_0$  es el coeficiente de fricción (independiente de la velocidad),  $f_v$  es el coeficiente de fricción dependiente de la velocidad,  $V$  es la velocidad del vehículo,  $M$  es la masa del vehículo,  $\theta$  es el ángulo de la pendiente que tiene que ascender o descender el vehículo y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Agrupando el paréntesis como  $f$ , coeficiente de fricción a la rodadura, obtenemos la siguiente gráfica en función de la velocidad:

$$f = f_0 + f_v \cdot V^n \quad (6)$$

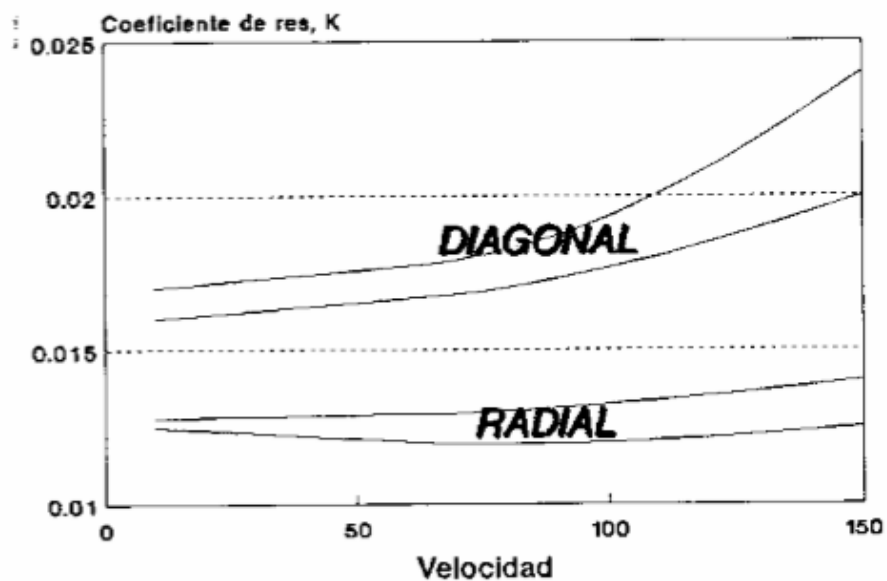


Ilustración 6: Coeficiente de fricción a la rodadura según el tipo de neumático

Se puede observar como el neumático radial, ofrece menor resistencia a la rodadura debido a su mayor rigidez (la deformación es menor). Este es el caso por ejemplo de las ruedas *Michelin*.

La histéresis debida a los materiales de la rueda (la rueda cimbreo sobre el asfalto) hace que  $f$  varíe con la velocidad. Los neumáticos deben de presentar un contacto adecuado entre el suelo y el vehículo por adherencia y fricción.

Los neumáticos están formados por caucho y unos hilos. Los neumáticos se clasifican según este tipo de hilos que son los que refuerzan y sustentan el neumático en dos tipos: radiales o diagonales. La siguiente imagen muestra estos dos tipos:

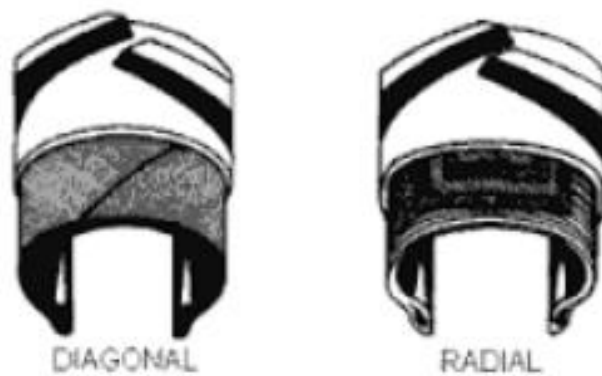


Ilustración 7: Tipos de neumáticos. Diagonales (izq) y radiales (dcha)

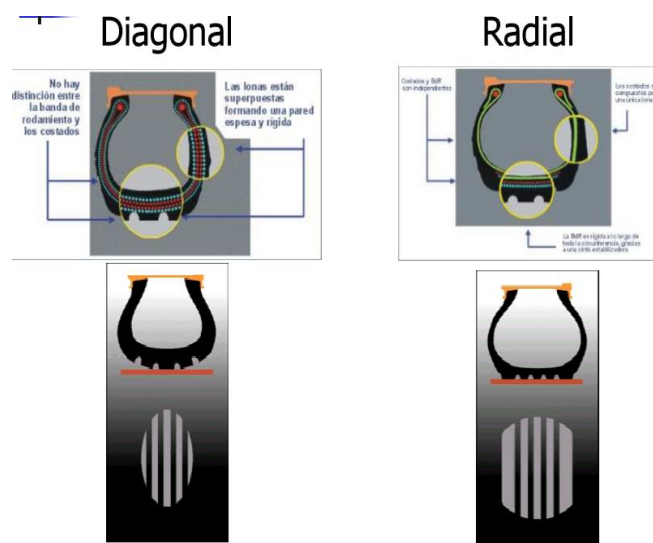


Ilustración 8: Tipos de neumáticos



Las principales ventajas de las radiales son las siguientes:

- Menos fricción interna
- Las capas son más flexibles lateralmente, por lo tanto menor resistencia a la rodadura
- Mayor duración de la banda de rodamiento
- Mejor adherencia
- Menos material para soportar la misma carga

La principal desventaja son las siguientes:

- Mayor dureza de marcha
- Mayor esfuerzo de dirección

$f$  también depende de otra serie de factores como son la presión del neumático (disminuye al aumentar la presión), el diámetro del neumático (disminuye al aumentar el diámetro) y el tipo de suelo (mayor sobre suelos blandos que duros).

En la fuerza de rozamiento también contribuyen, aunque en menor medida la fricción entre el neumático y el suelo por deslizamiento, las pérdidas por ventilación debidas a la rotación del neumático en el aire y la fricción debida a la circulación del aire en el interior del neumático.

En la simulación de este proyecto se ha realizado una simplificación de la fuerza de rozamiento a la rodadura de los neumáticos ya que  $f$  varía poco con la velocidad. De esta manera, la hemos considerado constante, obteniendo finalmente la siguiente ecuación simplificada:

$$F_{roz} = f \cdot m \cdot g \cdot \cos\theta \quad (7)$$

Donde  $f$  se obtiene de tablas como la siguiente, para los distintos tipos de suelos:

Resistance coefficient values for rolling in different types of soil.			
Naturaleza y Estado del Suelo	Coefficiente de Resistencia a la Rodadura (k) <sup>1</sup>	Índice de Cono (CI) [kPa]	Número Característico (B <sub>n</sub> )
Carretera en buen estado	0,02 a 0,04	-	
Camino de tierra afirmado	0,03 a 0,05	-	
Camino de tierra	0,04 a 0,06	-	
Suelo baldío	0,06 a 0,10	1.800	80
Rastrojo seco	0,08 a 0,10	1.200	55
Tierra labrada	0,10 a 0,20	900	40
Arena y suelo muy suelto	0,15 a 0,30	450 - 250	20

<sup>1</sup> La resistencia a la rodadura se obtiene multiplicando el peso del vehículo por el valor del coeficiente del suelo por el que se circula.

Ilustración 9: Coeficiente de resistencia a la rodadura para distintos tipos de suelo

### 2.1.3 Fuerza de ascensión

La fuerza de ascensión es la resistencia que ofrece el vehículo al ascender por una pendiente. El motor del automóvil ha de vencer esta fuerza. Es proporcional al peso y al ángulo de la pendiente. Tiene la siguiente forma:

$$F_p = M \cdot g \cdot \text{sen}\theta \quad (8)$$

Donde M es la masa del vehículo, g la gravedad y  $\theta$  el ángulo de la pendiente a ascender.

### 2.1.4 Fuerza resistente total

La fuerza resistente total puede expresarse como la suma de todas las anteriores:

$$F_{tot} = F_{ae} + F_{roz} + F_p \quad (9)$$



## 2.2. Equilibrio de fuerzas. Aceleración y Fuerza motriz

La fuerza resistente anterior tiene que ser vencida por el motor del vehículo. Para ello, se ha de tener en cuenta el desarrollo de la transmisión ( $d_i$ ). Las vueltas del motor, se convierten en movimiento lineal gracias a la transmisión. Dicha velocidad lineal será mayor o menor dependiendo de la marcha engranada, del grupo diferencial y del perímetro de la rueda. Estos tres forman lo que se conoce como el desarrollo de la transmisión.

Cada marcha, tiene una relación de cambio distinta ya que depende del número de dientes de cada piñón que se engrane. Por ejemplo, con la primera marcha, las ruedas siempre dan menos vueltas a igualdad de régimen de giro del motor que con la quinta.

El desarrollo se expresa de la siguiente manera:

$$d_i = \frac{v}{n} \quad (10)$$

Siendo  $v$  la velocidad lineal del vehículo,  $n$  el régimen de giro del motor e  $i$  la marcha engranada. Las unidades del desarrollo en SI son  $m \cdot s^{-1} \cdot Hz^{-1}$  aunque también se exprese de la siguiente manera,  $km/h^{-1}/(1000rpm)^{-1}$ .

Analizando la ecuación anterior,

$$F_{tot} = F_{ae} + F_{roz} + F_p \quad (11)$$

La fuerza que llega a las ruedas ha de ser superior a las fuerzas que se oponen al desplazamiento, produciéndose así la aceleración del vehículo. Por lo tanto, al aumentar la velocidad, la fuerza de tracción tratará de vencer los esfuerzos resistentes anteriores, otra parte produce la aceleración lineal del automóvil y finalmente una última parte se invierte en aumentar la velocidad angular de los distintos elementos rotativos del tren de transmisión. Por lo tanto la ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$F_{tot} = F_{ae} + F_{roz} + F_p + m \cdot a + J_{TOT,R} \frac{\alpha_R}{r_R} \quad (12)$$

Donde  $a$  es la aceleración lineal del vehículo,  $J_{TOT,R}$  es el momento de inercia total de las partes rotativas reducidas a la rueda,  $\alpha_R$  la aceleración angular de las ruedas y  $r_R$  el radio de las ruedas.

Si analizamos los términos de la ecuación:

- $m \cdot a$  corresponde a la aceleración lineal del vehículo
- $J_{TOT,R} \frac{\alpha_R}{r_R}$  tienen en cuenta la aceleración angular de los distintos elementos rotativos presentes en el tren de transmisión.

Para simplificar los cálculos de cara a la simulación estos dos términos ( $m \cdot a + J_{TOT,R} \frac{\alpha_R}{r_R}$ ) son simplificados de la siguiente manera:

$$m \cdot a + J_{TOT,R} \frac{\alpha_R}{r_R} = m_{eq} \cdot a = m \cdot k_m \cdot a \quad (13)$$

Donde  $m$  es la masa del vehículo,  $k_m$  es un coeficiente de inercia rotacional que incluye la aceleración angular de cada uno de los elementos rotativos. En ocasiones, calcular todos los momentos de inercia del tren motriz resulta una tarea engorrosa por lo que se puede usar gráficos como el siguiente:

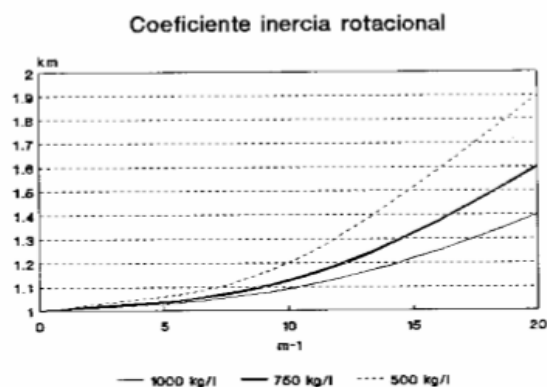


Ilustración 10: Coeficiente de inercia rotacional



### 2.3. Ecuaciones fundamentales de los MCIA

Los motores de combustión interna alternativos (MCIA) obtienen energía mecánica de la energía química de un combustible producida dentro de una cámara de combustión. La mayor parte de los automóviles usan un ciclo de combustión de cuatro tiempos (ciclo de OTTO) con las siguientes etapas:

- **Admisión:** El pistón baja en el momento que la válvula de admisión abre, permitiendo la mezcla de aire/gasolina entrar.
- **Compresión:** El pistón sube comprimiendo la mezcla de aire/gasolina mientras las dos válvulas están cerradas.
- **Explosión:** El pistón llega a su punto de máximo recorrido y la bujía crea una chispa, produciéndose así la explosión y por tanto, el pistón es impulsado para abajo.
- **Escape:** El pistón vuelve a subir, la válvula de escape se encuentra abierta, permitiendo por tanto la salida de los gases quemados.

Cada combustible tiene un poder calorífico distinto y representa la cantidad de energía que se puede desprender al producirse la reacción de combustión por kilogramo de combustible. En la siguiente tabla se pueden observar los distintos poderes caloríficos para los distintos combustibles:

	DENSIDAD [KG/M <sup>3</sup> ]	PCI [MJ/KG]	PCS [MJ/KG]
<b>GASOLINA</b>	750	44	47.3
<b>GASÓLEO</b>	810	43.2	46.1
<b>GAS NATURAL</b>	0.78	50	55.6
<b>ETANOL</b>	785	26.9	29.7

Tabla 2: Poderes caloríficos para distintos combustibles

Para continuar, la energía química es transformada en energía de presión al quemar el combustible en el interior de la cámara de combustión, obteniendo

la potencia indicada ( $\dot{W}_l$ ). La potencia indicada es fácil de calcular si se conoce la presión media indicada ( $P_{mi}$ ), la cilindrada y las revoluciones a las que gira el motor:

$$\dot{W}_l = P_{mi} \cdot V_D \cdot n \cdot i \quad (14)$$

Donde  $P_{mi}$  corresponde a la presión media indicada,  $V_D$  a la cilindrada del vehículo,  $n$  la velocidad de giro del motor y finalmente  $i$ , el índice de tipo de ciclo. Toma el valor de 1 en motores de combustión interna de dos tiempos ya que el ciclo termodinámico se produce cada vuelta y 0.5 en los de cuatro tiempos, donde el ciclo termodinámico se produce cada dos vueltas.

El rendimiento indicado, expresa la “calidad” con la que se transforma la energía almacenada en el combustible en energía mecánica en el pistón:

$$\eta_i = \frac{\dot{W}_l}{m_{comb} \cdot H_c} \quad (15)$$

La potencia desarrollada en el interior del cilindro (Potencia indicada) no se transmite íntegramente al eje de motor de salida (Potencia efectiva,  $\dot{W}_e$ ). Parte de la energía es absorbida o perdida debido a los rozamientos de los distintas partes mecánicas del motor.

$$\dot{W}_l = \dot{W}_e + W_{roz} \quad (16)$$

Por lo tanto, se puede expresar  $\dot{W}_e$  como:

$$\dot{W}_e = P_{me} \cdot V_D \cdot n \cdot i \quad (17)$$

Donde  $m_{comb}$  corresponde al gasto másico de combustible,  $H_c$  al poder calorífico del combustible e  $W_i$  a la potencia indicada.

El rendimiento mecánico relaciona ambas potencias:





$$\eta_m = \frac{\dot{W}_e}{\dot{W}_i} \quad (18)$$

Uno de los aspectos más importantes de cara al consumidor es el consumo. Depende de las fuerzas resistentes del vehículo mencionadas anteriormente, del rendimiento de la transmisión y del consumo específico. Se expresa en volumen de combustible consumido para recorrer una distancia, normalmente de la forma  $l/100km$  y su expresión es la siguiente:

$$C = \frac{g_e \cdot \dot{W}_e}{\rho_f \cdot v} \quad (19)$$

Donde  $g_e$  corresponde al consumo específico,  $\dot{W}_e$  a la potencia efectiva,  $\rho_f$  a la densidad del combustible y  $v$  a la velocidad.

Finalmente, las condiciones de funcionamiento de un motor vienen representadas mediante sus curvas de carga parcial. Estas curvas se obtienen variando el par, manteniendo el régimen de giro constante y representando el consumo específico efectivo para cada punto. Se suelen representar a modo de mapas como el siguiente:

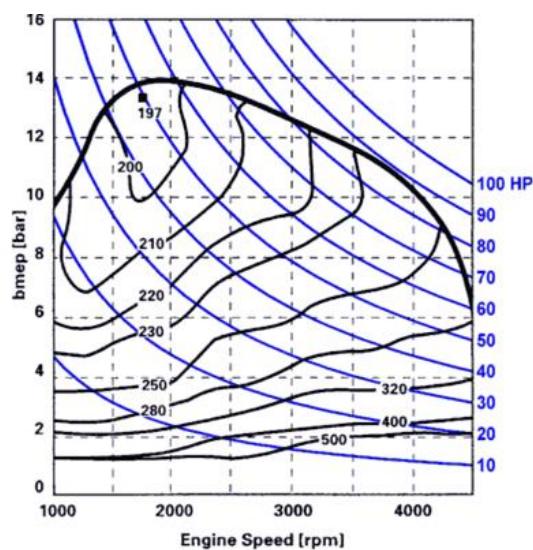


Ilustración 11: Curva de isoconsumo del motor Volkswagen 1.9 TDI





## Capítulo 3

### Vehículo Híbrido

Un vehículo híbrido es aquel que combina dos tipos de motorizaciones distintas. El crecimiento de estos tipos de vehículos ha sido debida entre otras, a la crisis. A esto le acompaña el alza del combustible, el abaratamiento de la tecnología y la concienciación ambiental. Los sistemas de propulsión híbrida se usan en distintos tipos de vehículos: camiones, automóvil, bicicletas, trenes, aviones y barcos. Las bicicletas híbridas, combinan las fuerzas de un motor pequeño eléctrico con la fuerza de pedaleo de quién las maneja. También en el mar, los rompehielos utilizan motores híbridos diésel-eléctricos, donde los motores de combustión interna usan diésel para funcionar y dar movimiento a los grandes generadores eléctricos que a su vez producen electricidad para alimentar los enormes motores eléctricos que mueven las hélices que lo impulsan.

El “Padre del coche híbrido” fue *Victor Wouk* y actualmente en España se comercializan más de 31 modelos. El país líder en automóviles híbridos es Estados Unidos (1.6 millones aproximadamente), seguido por Japón. Las marcas de coches que más fabrican automóviles híbridos son: *Toyota Motor Corporation*, *Honda Motor Co.* y *Ford Motor Corporation*.

El tipo de híbrido más común es el vehículo híbrido eléctrico que combina un motor de combustión interna y un motor eléctrico que se alimenta de unas baterías. Otros híbridos incorporan celdas de combustible, supercondensadores, motores de aire comprimido, etc, en combinación con un motor de combustión.

La eficiencia energética de los vehículos híbridos se ve incrementada al usar un motor más pequeño y la utilización de sistemas de recuperación de energía, como los frenos regenerativos que se van a estudiar en este proyecto.

En el próximo gráfico se puede observar el alza de las ventas durante los últimos años de coches híbridos en dos de las marcas más famosas de este sector:

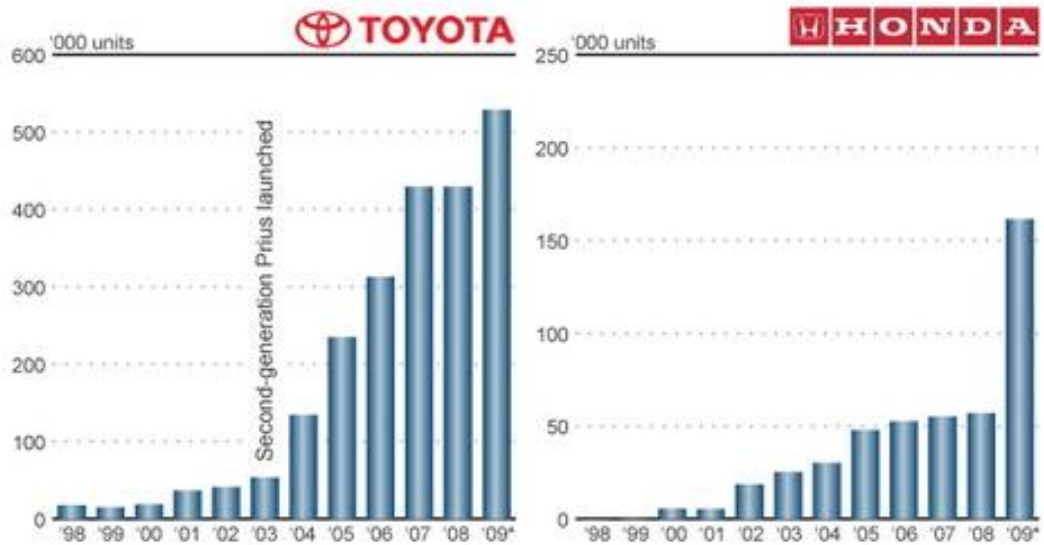


Ilustración 12: Ventas automóvil híbrido para Toyota y Honda

### 3.1. Clasificación

Dependiendo del punto de funcionamiento, los vehículos híbridos se clasifican de la siguiente manera:

- **Híbrido en serie:** El motor térmico no tiene conexión mecánica con las ruedas, sólo se usa para generar electricidad. Este motor se encarga de recargar las baterías hasta que se llenen. Una vez estén llenas, se desconecta el motor térmico temporalmente. El motor térmico se encuentra acoplado a un generador, produciendo electricidad para que el motor eléctrico accione el giro de las ruedas. Es el sistema más eficiente.

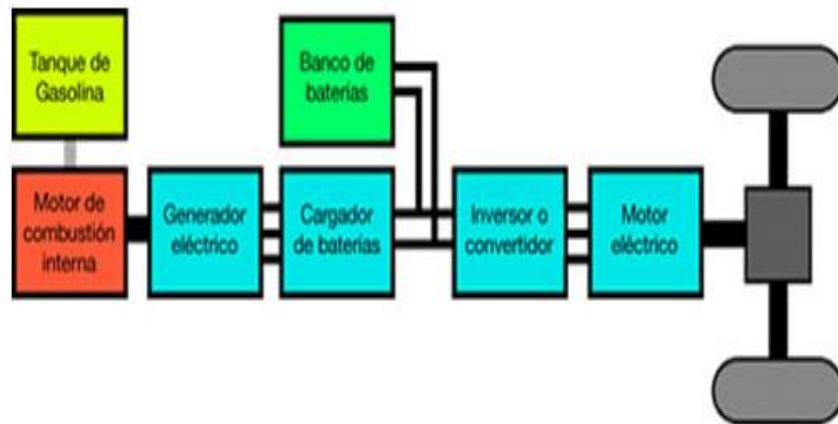


Ilustración 13: Híbrido en serie

- **Híbrido en paralelo:** Emplea tanto un motor eléctrico como uno térmico para dar fuerza a la transmisión. En este sistema, el MCI puede accionar la tracción al mismo tiempo que recarga las baterías. No es la solución más eficiente.

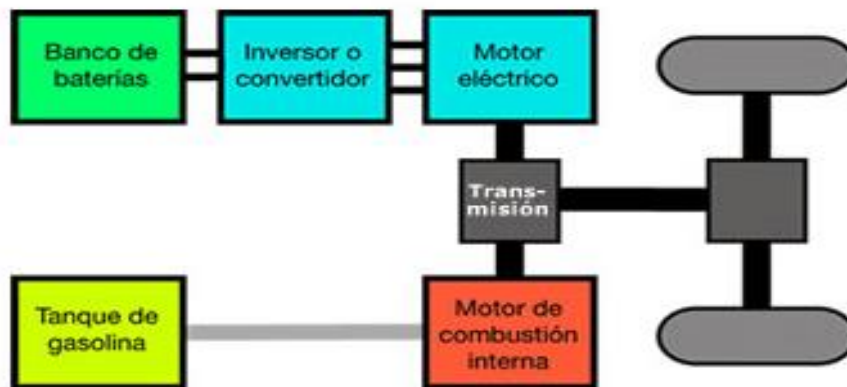


Ilustración 14: Híbrido en paralelo

- **Híbrido combinado:** Utiliza cualquier combinación de los dos motores para propulsar el vehículo. Se trata de una solución muy eficiente pero más compleja a nivel mecánico y electrónico.

Los vehículos híbridos también se pueden clasificar de la siguiente forma:

- **Microhíbridos:** el automóvil se detiene, se apaga el motor térmico. Cuando se quiere arrancar el motor, se reanuda la marcha mediante un alternador reversible que arranca el motor utilizando energía recuperada previamente en el momento de parar. No hay un motor eléctrico en este tipo de híbrido.
- **Híbrido puro**, también conocido como "*full-hybrid*", circula en determinadas condiciones sólo con el motor eléctrico mientras el térmico se encuentra apagado. Este cambio se puede hacer de manera automática o manual.
- **Semihíbrido** o "*mildhybrid*" donde el motor eléctrico se usa sólo como asistencia al motor térmico. Además genera energía en las frenadas y paradas pero no se impulsa sólo con el motor eléctrico (motor térmico apagado), a pesar de poder conseguir que el motor térmico no consuma y aun así mueva sus piezas.
- **Híbrido enchufable (PHEV):** recarga sus baterías mediante energía eléctrica convencional, es decir, enchufándolo a la red eléctrica. Es capaz de recorrer 32 km sin usar otro sistema de propulsión.
- **Coche eléctrico de rango extendido o EREV:** Se trata del caso anterior pero pueden usar el motor eléctrico al 100%. Cuando se acaban las baterías, el motor térmico se usa para generar electricidad.

### 3.2. Componentes del vehículo híbrido

Todos los coches híbridos están conformados por las siguientes componentes:

- **Motor térmico:** de gasolina o diésel. No obstante, también puede funcionar con gas o biocombustibles. Respecto a modelos equivalentes



convencionales, estos motores térmicos tienen menor cilindrada. Es más importante el par máximo que la potencia.

- **Motor eléctrico:** Son motores de sonoridad baja. Siempre está conectado a la transmisión o empuja la rueda. Para bajas revoluciones, dan todo el par.
- **Generador:** Recupera la energía de las frenadas, retenciones y aceleraciones en donde el motor térmico entrega más potencia.
- **Baterías:** Añaden mucho peso al coche y se suelen almacenar en la parte trasera. Suelen ser de Plomo-ácido, níquel-metal híbrido, níquel-cadmio o ion litio. Necesitan un sistema de refrigeración.
- **Sistema de gestión:** Ordenador para gestionar que combinación es más eficiente en cada momento a través de sensores.

### 3.3. Carga y descarga de las baterías y su funcionamiento

Las baterías son un elemento fundamental en los vehículos híbridos y eléctricos y se recargan mediante el movimiento. Se trata de la clave de la viabilidad económica y técnica de un vehículo híbrido/eléctrico.

Cuando la potencia suministrada por el motor es excesiva, se almacena el excedente en baterías. En este momento, el motor eléctrico funciona como un generador. Cuando el motor térmico requiera más energía, el motor eléctrico emplea la energía almacenada previamente.

El principio de funcionamiento es el siguiente:

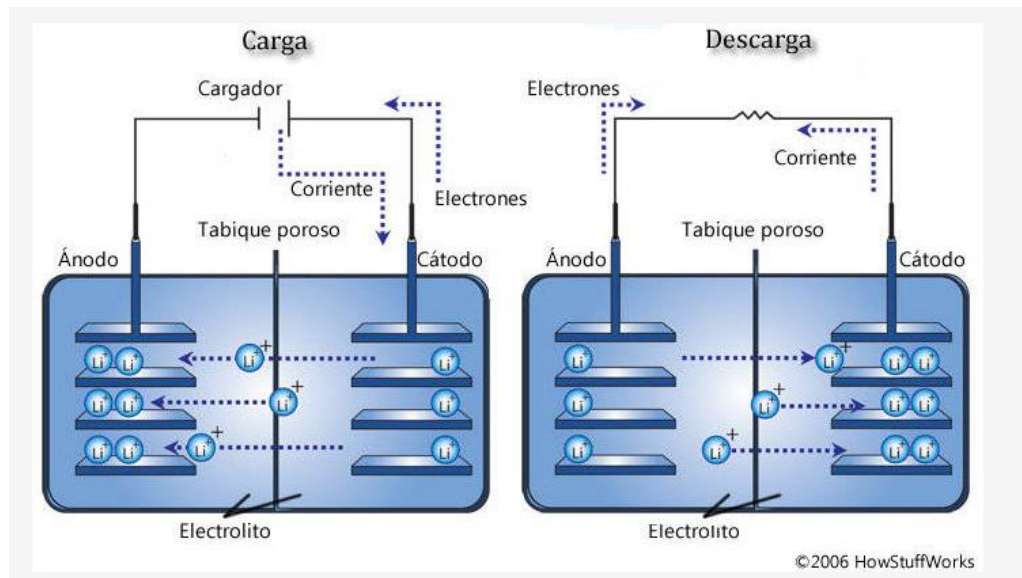


Ilustración 15: Principio de funcionamiento batería

Las baterías están formadas por un conjunto de células, en cada una de las cuales se produce una reacción química reversible. Se trata de un intercambio de iones y electrones entre sus dos polos. En el caso de la descarga, se produce una corriente eléctrica que mueve un motor eléctrico que propulsa un coche. Sin embargo, en la carga, mediante un aporte de energía externo, los iones y electrones vuelven a su situación inicial.

Cada célula está formado por un cátodo (electrodo positivo) y un ánodo (electrodo negativo) y un electrolito, que separa los dos electrodos y forma el medio neutral para la transferencia de carga. Las dos características principales en una batería son los elementos químicos para dar lugar la reacción dentro de la célula y la electrónica que controla el proceso de carga y descarga.

Actualmente, existen tres tipologías de baterías según su química: las baterías de Plomo-Ácido, las de Metal-Níquel y las de Ion Litio. Las baterías en el sector automovilístico más comunes son las de Ion-Litio. La selección entre los distintos tipos de baterías es una decisión de compromiso entre la potencia específica, los costes, la densidad energética, la seguridad y la durabilidad.





Las baterías de Plomo-Ácido son de bajo coste, buena potencia específica (W/Kg), buen comportamiento en un amplio rango de temperaturas y son fáciles de reciclar. Pueden almacenar hasta 40Wh/kg, lo cual es una densidad muy baja.

*Toyota Prius*, uno de los modelos híbridos más famosos, utiliza las baterías de Níquel-Metal. Su potencia específica es correcta, su ciclo de vida largo y no presenta problemas medioambientales como se ha mostrado a lo largo de los años en estos vehículos no enchufables. No obstante, tiene un alto índice de descarga en periodos de inactividad y su coste de producción es elevado. Su densidad es de 60Wh/kg, superior a las baterías de Plomo-Ácido.

Las baterías de Ión-Litio tienen un voltaje, densidad energética, potencia específica, carga utilizable, eficiencia de recarga y ciclo de vida mucho superior a las otras dos. No obstante, el coste de producción es mayor y son menos robustas ante variaciones en el voltaje por lo que se necesitan sistemas de gestión de baterías para su correcto funcionamiento y protección.

### 3.4. Ahorro combustible en un vehículo híbrido

Durante el arranque desde parado, el motor eléctrico se usa para mover el coche con o sin motor térmico. A cierta velocidad, comienza a funcionar el motor térmico. Se produce una transición de parado a movimiento suave y evitando una ineficiencia del motor térmico.

En el caso de aceleramiento, el motor eléctrico ayuda a propulsar el vehículo. Por lo tanto, el motor térmico realiza menos esfuerzo con su consiguiente menor consumo.

Para continuar, en zonas urbanas, el motor eléctrico puede realizar la labor de empuje. Esto se puede realizar siempre y cuando el nivel de carga de las baterías sea lo suficiente. En este momento, el consumo es nulo y por lo tanto cero emisiones. Por lo que el motor eléctrico no produce contaminación de ningún tipo.

A velocidad de crucero media/alta, el motor térmico es el que propulsa el vehículo con alguna ayuda puntual del motor eléctrico como en el caso de que

haya pendientes. Mientras el motor eléctrico no se emplee, la energía se almacena en baterías.

En el caso de la frenada, si la frenada exigida es baja, se puede aprovechar esa energía en forma de calor y almacenarla en baterías para su posterior uso, en lugar de usar frenos de disco. Si la frenada fuera mayor, se usarían los frenos convencionales además de los regenerativos.

Finalmente, cuando el vehículo se encuentra parado, ninguno de los motores funciona. No se emite ningún gas ni se consume combustible.

Hacer trabajar al motor térmico en su régimen ideal, hace que éste sea más eficiente, maximizando la distancia recorrida por combustible consumido. Además, se reducen las emisiones de NO<sub>x</sub>, hidrocarburos sin quemar, partículas sólidas, CO...



## Capítulo 4

### Sistemas de Recuperación de energía

En este capítulo se procede a explicar los distintos sistemas de recuperación que existen en la actualidad, haciendo especial hincapié en los frenos regenerativos, objetivo de este proyecto.

#### 4.1. Freno regenerativo o KERS

El freno regenerativo o KERS, es un sistema de recuperación de energía cinética que permite recuperar la energía que se genera en las frenadas para posteriormente ser empleada durante unos segundos. Se ha de resaltar que no se trata de un sistema para ahorrar energía sino para reutilizarla.

Este término se comenzó a usar en la Formula 1 en 2009, donde la energía recuperada en la frenada y almacenada, se usaba para que el monoplace fuera durante unos segundos más veloz y potente. Apareció principalmente por dos razones, la imagen que quería dar la FIA sobre la responsabilidad que tenían con el medio ambiente y por la posibilidad de en un futuro poder instaurarlos en un vehículo convencional. Además, a esto se le añade el afán de la FIA por aumentar el espectáculo facilitando los adelantamientos.

La frenada regenerativa no es ilimitada. Los vehículos han de llevar además frenos convencionales ya que en el caso de que las baterías se encuentren al 100% de su capacidad, más energía no podría ser acumulada. Por tanto, si ocurriera esto sería imposible frenar el vehículo. No obstante, los frenos regenerativos son frenos que funcionan mucho menos, siendo su desgaste menor. Por lo tanto, los intervalos de mantenimiento son mayores.

Esta tecnología se puede emplear en cualquier tipo de vehículo pero principalmente se ha encontrado en:

- Automoción: empleado tanto en coches eléctricos como híbridos. Utilizando el motor eléctrico para el frenado se recargan las

baterías. Esta energía puede posteriormente ser usada para los arranques, sistemas auxiliares o para cuando el motor está funcionando en modo eléctrico.



*Ilustración 16: Esquema de frenado regenerativo de Toyota Prius*

Existen distintas formas de almacenar la energía de la frenada, como es el caso de las baterías si se trata de un KERS eléctrico o un volante de inercia, si es mecánico. También existe el KERS neumático, pero su uso no es frecuente, ya que supone una reutilización de la energía.

- Transporte ferroviario: En este sector es donde se recupera la mayor cantidad de energía. Esto es debido a dos razones principalmente: las grandes masas de los trenes y en muchos casos las altas velocidades de estos. Además, se trata de un medio de transporte que suele estar conectados a la red eléctrica por lo que parte de la energía recuperada que no se aprovecha por el propio tren puede ser exportada a la red eléctrica.



Ilustración 17: Freno regenerativo de un tren

#### 4.1.1 Funcionamiento del KERS

Existen dos tipos de frenos, los reostáticos y los regenerativos. Los frenos reostáticos o tradicionales, transforman la energía cinética en energía calorífica a través de la fricción. Esta energía calorífica se irradia al aire que refrigera las pastillas o el tambor de frenado, por lo tanto, se desperdicia.

#### 4.1.2 Funcionamiento del KERS en coches eléctricos o híbridos

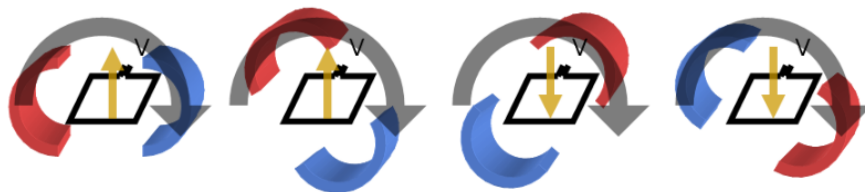
En los coches eléctricos e híbridos, la energía cinética se convierte en eléctrica y se almacena en condensadores o baterías para su uso posterior. Existe una manera de transformar la energía cinética en eléctrica por medio de un giroscopio, que devuelve en el momento de acelerar parte de la frenada.

No obstante, el freno regenerativo ha de usarse una vez recargadas las baterías o condensadores o acelerado el giroscopio ya que no frena más el vehículo, teniendo que usar los frenos tradicionales para poder detener el vehículo sin peligro.

### 4.1.3 Recuperación de la energía: Sistemas Eléctricos

Como se ha mencionado antes, existen dos tipos de sistemas: batería (eléctrica) y volante de inercia (mecánica). Los sistemas eléctricos usan un motor-generador incorporado en la transmisión del coche, que convierte la energía mecánica en energía eléctrica y viceversa. Una vez se haya convertido la energía, se almacena en una batería para posteriormente liberar cuando sea necesario.

En la siguiente imagen, se puede apreciar el funcionamiento de este sistema:



*Ilustración 18: Campo magnético inducido por la corriente que circula*

Se pueden observar unas flechas azules y rojas que son imanes y una espira de color negro. Se coloca la espira en el centro y se hace girar a los imanes alrededor. Esto produce un campo magnético variable que a su vez produce un campo eléctrico en la espira.

Este es el principio del sistema eléctrico, ya que los imanes se conectan a las ruedas del coche, para que giren y la espira a una batería para que se acumule. A la vez que se produce el campo eléctrico, se produce una fuerza mecánica que se opone al giro. Esto es debido a que al circular corriente por la espira (debida al giro), la propia espira genera a su alrededor un campo magnético. Por lo tanto, ya no tenemos sólo dos imanes y una espira sino que tenemos tres imanes; los dos originales y un tercero en la espira (campo magnético representado en la imagen de color amarillo).

La corriente en la espira siempre irá dirigida de manera que todos los polos del imán se opongan a la causa que creó la corriente (ley de Lenz), es decir, el imán de la espira trata de “equilibrar” la perturbación que lo creó. De esta manera,



el imán va cambiando continuamente de polaridad según el giro de los imanes de manera que siempre atrae a los dos imanes en su movimiento, frenándolos. Si se deja hasta que los dos imanes se paren, toda la energía cinética se transformaría en energía eléctrica en la espira. Esto es lo que ocurre en el KERS, al poner los imanes conectados a las ruedas girando alrededor de una espira que está conectada a una batería, los imanes (y las ruedas) se frenan.

La espira del KERS, se introduce más o menos entre los imanes y según el piloto pisa más o menos, la espira se introduce más o menos. Si el piloto presiona el freno a fondo, la espira se introduce completamente entre los dos imanes, siendo el efecto por tanto máximo. Si lo pisa poco, sólo se introduce ligeramente y su efecto es pequeño.

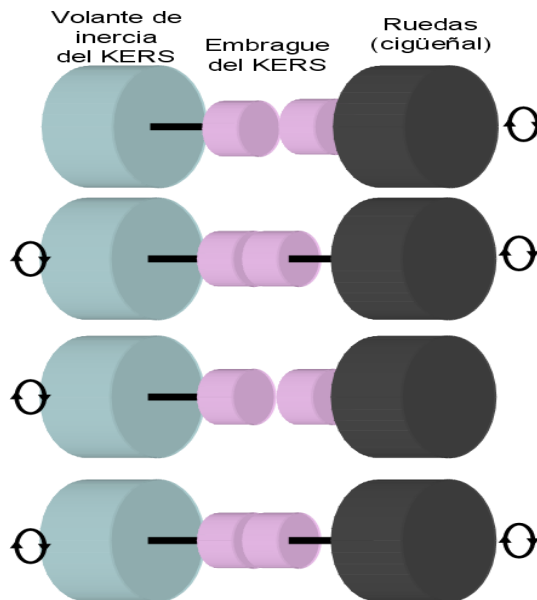
Finalmente, esta energía eléctrica se almacena en una batería para ser utilizada posteriormente. Por lo tanto cuando el piloto frena con los “frenos regenerativos” (distintos de los frenos convencionales), carga las baterías. Cuando necesita más potencia, invierte el proceso, activando el motor eléctrico que suma potencia al motor de combustión. Las baterías, se descargan rápidamente.

#### 4.1.4 Recuperación de la energía: Sistemas Mecánicos

Los sistemas mecánicos capturan la energía de frenado y la utiliza para girar un volante pequeño (hasta 80 000 rpm). Cuando se necesita potencia extra, el volante está conectado a las ruedas traseras del coche. A diferencia del sistema eléctrico, la energía mecánica no cambia de estado por lo que se trata de un sistema más eficiente.

El volante de inercia, gira a una velocidad angular. Siempre que no haya una fuerza angular que se aplique sobre el volante de inercia, la velocidad angular de este se conserva.

La siguiente imagen, muestra cómo funciona el volante de inercia del KERS:



*Ilustración 19: Sistema de Recuperación de energía: Sistemas mecánicos*

Al comenzar, el volante de inercia se encuentra parado y las ruedas girando. Cuando se comienza la frenada, las ruedas se conectan al volante de inercia, usando un embrague. Debido a que la rueda gira a una velocidad mayor que el volante de inercia, se transfiere energía cinética de la rueda girando al volante, frenando por tanto el coche. Cuando se quiere cesar la frenada, se separa el embrague de manera que la rueda ya no está conectada con el volante de inercia, a pesar de que dicho volante siga girando (está almacenando la energía cinética que le ha quitado al coche anteriormente).

Posteriormente, cuando la energía almacenada quiera ser liberada, se vuelve a conectar el volante de inercia a la rueda mediante el embrague, de modo que la energía se transfiera a la rueda mediante el uso de engranajes que permita que el volante de inercia acelere la rueda y no viceversa.

Los principales inconvenientes de este tipo de KERS es que para almacenar una cantidad de energía grande hacen falta volantes de inercia que giren más rápido o que sea más pesado. Ambas cualidades hacen que aumente el efecto giroscópico y sus efectos sobre la maniobrabilidad pueden no ser despreciables.





#### 4.2. Energy Recovery System o ERS

El ERS es un sistema que genera energía eléctrica que se almacena en unas baterías para luego impulsar la transmisión del coche en conjunto con el motor térmico de combustión interna.

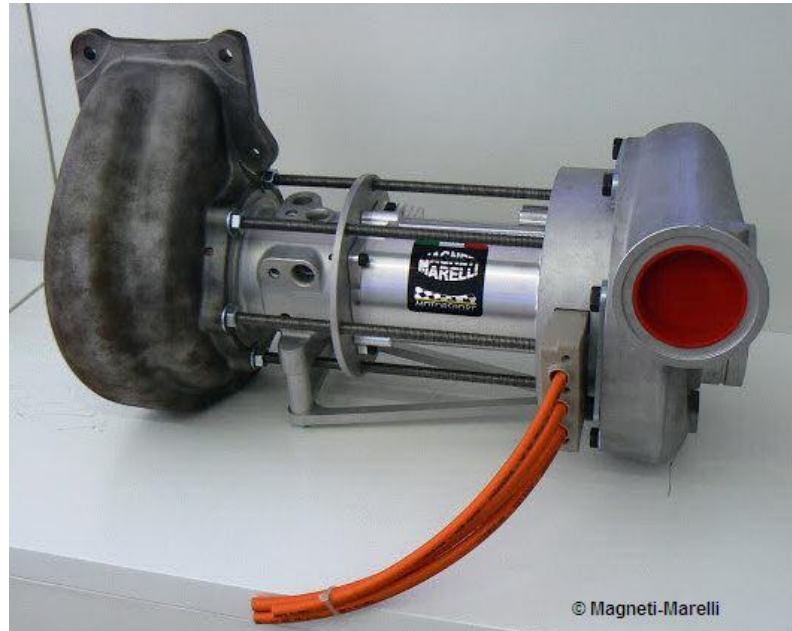
Este sistema, está formado por dos elementos principales además de un almacén de energía (*Energy Store*) y sistemas electrónicos de alimentación y control:

- El “*Motor Generator Unit-Heat*” o también conocido como MGU-H es un motor-generador eléctrico conectado al turbocompresor, aprovechando el giro de la turbina para generar energía eléctrica. El giro de la turbina es debido a los gases de escape. La diferencia con el KERS explicado anteriormente es que este último está acoplado a la transmisión mientras que el MGU-H se acopla al turbocompresor. Cuando actúa a modo de generador, absorbe la potencia del eje de la turbina para recuperar la energía térmica de los gases de escape. La energía eléctrica puede dirigirse al MGU-K o a la batería para almacenarla y aprovecharla más adelante. Este sistema también se emplea para controlar la velocidad del turbocompresor e igualarla a las necesidades de aire del motor, como en el caso de acelerar la velocidad de la válvula *wastegate* para compensar el *turbo lag*.

En un motor de combustión interna sobrealimentado se aprovecha de 20 a 25% de la energía producida en la explosión. El resto se desperdicia ya que se disipa en forma de calor por rozamientos internos y en calor de los gases de escape. Para ello, se creó el MGU-H adosado al turbocompresor haciendo que los gases de escape se aprovechen para comprimir el aire de entrada generando energía eléctrica para poder usar posteriormente. Por lo tanto, la eficiencia se incrementa.

Los motores con turbocompresor aumentan su potencia y reducen su consumo, pero presentan dos problemas importantes: el retraso en la respuesta del turbo (“turbo-lag”), que es el tiempo que pasa desde que se pisa el acelerador hasta que es efectiva el aumento de presión en la alimentación y la progresividad en el modo de

funcionamiento de la mecánica. Para solucionar esto, se adosa un motor eléctrico al turbo, permitiendo poder frenarlo o acelerarlo según sea la demanda, dosificando la presión.



*Ilustración 20: MGU-H con turbocompresor*

El MGU-H se controla mediante la ECU (“Electronic Control Unit” o unidad de control electrónico). Esta gobierna el funcionamiento del MGU-H en modo generador o eléctrico en función de la carga de las baterías, la carga de trabajo y las necesidades del motor térmico.

- “Motor Generator Unit-Kinematic” o más conocido como MGU-K, es un sistema de recuperación de energía cinemática. Este sistema cuenta con un motor-generador que se encarga en el momento de la frenada de disminuir la velocidad del coche y recupera parte de la energía cinética para convertirla en electricidad. En el momento de la aceleración, el MGU-K se alimenta mediante el MGU-H Y *Energy Store* actuando como propulsor del vehículo.

En el caso de que el vehículo frene, el MGU-K se conecta al cigüeñal del motor de combustión interna y empieza a girar creando electricidad gracias al electromagnetismo. Cuando se conecta, se genera una resistencia, reduciendo la velocidad de giro del tren



motriz. Por lo tanto, el generador se desconecta automáticamente ya que se deja de accionar los frenos.

Finalmente, la energía almacenada se puede emplear de dos maneras: para que el MGU-K propulse el vehículo o para que el MGU-H acelere el turbocompresor. En comparación al KERS del año 2013, el ERS proporciona el doble de potencia (120 KW frente a 60KW) y un rendimiento 10 veces mayor.

#### 4.3. Sistema de recuperación de las fuerzas gravitatorias o GFRS

El sistema de recuperación de las fuerzas gravitatorias o GFRS trata de recuperar una parte de la energía cinética que se ejerce sobre la masa de un vehículo cuando efectúa diferentes maniobras que se usan en la conducción: aceleración, desaceleración, frenado, curvas, variación de inclinación horizontal o vertical...

Este sistema, creado por el español *Diego Cano Zurigel*, transforma la energía cinética en energía eléctrica o mecánica para posteriormente poder ser usada, reduciendo así el consumo en los vehículos de calle o proporcionando CV adicionales en el caso de los monoplazas de la Formula 1. A diferencia de los sistemas de recuperación mencionados anteriormente, el GFRS es capaz de recuperar energía no sólo cuando frena sino cuando se producen todo tipo de maniobras como por ejemplo el trazado de curvas, aceleración...

Estos sistemas pueden usarse simultáneamente con un KERS ya que son completamente independientes. El GFRS es capaz de generar energía a partir del peso de cualquier componente del vehículo.

En el caso de los monoplazas, el tamaño es menor donde puede actuar a la vez que el KERS y recoger y enviar energía de ambos sistemas como si se tratara de uno. En los *Formula 1*, este sistema sólo dispone de un solo eje lateral por lo que sólo recoge energía de las curvas, ya que en estos momentos es cuando las fuerzas gravitatorias son más prolongadas e intensas. En conclusión, un monoplaza podría llegar a albergar un sistema de tan sólo 100 kg y dos ejes que sería capaz de recuperar 3.2 MJ por vuelta.

#### 4.3.1 Funcionamiento del GFRS

Se trata de dos sistemas, un sistema principal que aprovecha la cantidad más importante de las fuerzas gravitatorias de una forma más eficiente y un sistema secundario que obtiene energía de los cambios de ángulos horizontales y verticales del GFR.

El sistema principal está compuesto por una serie de baterías de almacenamiento distribuidas de manera que se muevan con cualquier variación de las fuerzas G, alterando lo menos posible el centro de gravedad del sistema. Estas baterías se unen mediante unos brazos a una caja multiplicadora, encargada de transmitir el movimiento rotatorio generado aumentando las revoluciones un alternador que transforma esta energía en energía eléctrica o a un sistema mecánico que aprovecha dicha rotación como es el caso de los volantes de inercia.

El sistema secundario, está formado por “amortiguadores regenerativos” que sostienen el GFR a la estructura del vehículo. Estos, son capaces de transformar en energía eléctrica parte de la fuerza que se produce. Siempre se encuentran en posición horizontal hasta que se produce una variación de ángulo de inclinación con respecto a la posición inicial. Estas variaciones podrían darse por cambios de desnivel o inclinaciones en el terreno.

Los principales problemas de este sistema son el peso, el espacio y la estabilidad. Cuando la energía generada no compensa el suplemento de peso extra, no es lógico implantarlo. A esto se le añade el coste del sistema. Para continuar, el conjunto de batería han de estar descompensadas para poder interactuar con las fuerzas G que se le apliquen, variando inevitablemente el centro de gravedad.

#### 4.4. Sistema Start and Stop

El sistema *Start-Stop* apareció en 2007 de la mano de Bosch aunque posteriormente, muchas marcas lo hayan desarrollado. Actualmente, numerosos vehículos lo incorporan. El objetivo de este sistema es reducir el



consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub> mediante el apagado del motor cada vez que el vehículo esté detenido unos minutos.

El funcionamiento de este sistema es muy simple. Cuando el vehículo se encuentra en punto muerto, el motor se apaga, se queda en “stand by”, por lo que deja de consumir combustible. En el momento en el que el conductor pise el embrague para engranar una marcha, el sistema arranca el motor otra vez.

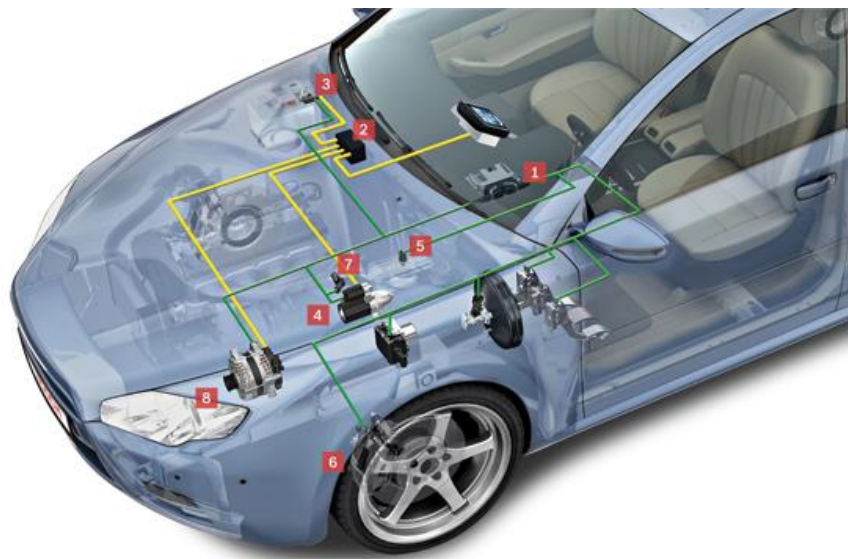


Ilustración 21: Funcionamiento del Start-Stop

En la imagen se puede observar de color verde la comunicación y en color amarillo la alimentación eléctrica (12V).

Los números de la imagen simbolizan lo siguiente:

1. Unidad de control de motor con opción a Software
2. Convertidor de corriente 12V
3. Sensor eléctrico de batería
4. Motor de arranque Star-Stop
5. Sensor de punto muerto
6. Sensor de velocidad de giro de rueda
7. Sensor del cigüeñal
8. Alternador de alta eficiencia con recuperación de energía de frenado

El *Start and Stop* funciona con un motor de arranque específico y mejorado para que con los numerosos encendidos y apagados no se averíe y así alargar su duración. También está formado por un alternador específico que ofrece más eficiencia y produce mayores cargas de la batería a bajas velocidades del vehículo, una batería con más capacidad que una convencional y una serie de sensores: para controlar el estado de carga de la batería, la velocidad del vehículo (sensor en el cigüeñal), en los pedales para informar sobre lo que quiere realizar el conductor y finalmente una centralita electrónica que gestiona el sistema.

Este sistema obtiene información de los distintos sensores en el momento en el que el conductor pone el vehículo en punto muerto y levanta el pie del embrague. Para que el *Start-Stop* funcione y se detenga el motor se han de dar las siguientes circunstancias, aunque dependiendo del fabricante existen más:

- El vehículo se tiene que encontrar totalmente detenido
- Se tiene que encontrar en punto muerto
- El sensor de la batería tiene que determinar si hay suficiente energía para posteriormente volver a arrancar
- La dirección no debe estar girada, ya que podría darse el caso de que se estuviera produciendo una maniobra de aparcamiento.

Cuando este sistema se combina con una caja de cambios automática, el apagado se produce cuando el conductor deja de pisar el freno y se detiene completamente el vehículo. El arranque ocurre cuando se suelta este pedal y se pisa el acelerador. De esta manera, se contamina y consume menos sin que el conductor tenga que realizar alguna acción en especial.



Ilustración 22: Botón Start-Stop



## Capítulo 5

### Elaboración del simulador

En este capítulo se procederá a explicar el funcionamiento del simulador teniendo en cuenta los conceptos teóricos explicados anteriormente. Para ello, se explicará los pasos y simplificaciones hechas. La simulación se ha realizado mediante *Matlab* y su interfaz para simular sistemas dinámicos, *Simulink*.

#### 5.1. Consideraciones previas

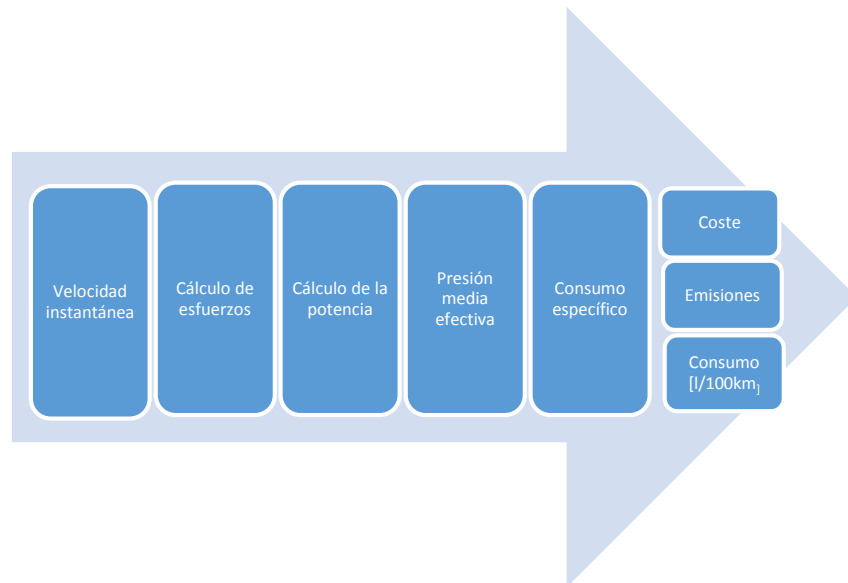
El objetivo de este proyecto es analizar cómo influyen los sistemas de recuperación de energía en un vehículo en cuanto al peso, coste, eficiencia, emisiones de CO<sub>2</sub> y consumo de combustible. Para ello, se ha escogido la simulación de un KERS aplicado a un vehículo con motor térmico como es el *Nissan Qashqai*. Dicho automóvil es producido por el fabricante de automóviles japonés *Nissan* y fue presentado oficialmente en el Salón del Automóvil de París. Se fabrica desde el año 2006 y es un automóvil del segmento C. Se trata de un vehículo de cinco puertas que está disponible con tracción a las cuatro ruedas o con tracción delantera.



Ilustración 23: Nissan Qashqai 1.5 dCi

El simulador es capaz de caracterizar el funcionamiento del vehículo de manera continua. El propósito de la construcción de este simulador es poder evaluar cómo afecta tanto de manera positiva como negativa la implementación de un KERS en un automóvil convencional. Mediante dicho simulador, se puede analizar dicho sistema sin tener que llevar a cabo ensayos empíricos. Los resultados son extrapolables y válidos para cualquier tipo de vehículo ya que el simulador parte del estado dinámico del vehículo. No obstante, los valores numéricos no son genéricos, sino que son específicos para cada vehículo. Para ello, se pueden cambiar los datos de entrada al simulador, que son principalmente las características geométricas y dinámicas del vehículo en cuestión y de esta manera poder analizar específicamente los resultados de dicho modelo.

El simulador se ha construido de manera encadenada, partiendo de datos del vehículo y velocidad instantánea. Estos son los pasos que se han dado:







El vehículo que ha sido simulado ha sido el *Nissan Qashqai* 1.5dCi de 110CV del que conocemos los siguientes datos:

<b>NISSAN QASHQAI</b>	
<b>Cilindrada</b>	1461 cm <sup>2</sup>
<b>Masa</b>	1482 kg
<b>Cx (Coeficiente aerodinámico)</b>	0.32
<b>fr (Coeficiente a la resistencia a la rodadura)</b>	0.015
<b>Km (Factor de masa)</b>	1.15
<b>Dimensiones</b>	
<b>Longitud</b>	4330 mm
<b>Anchura</b>	1780 mm
<b>Altura</b>	1615 mm
<b>Densidades</b>	
<b>Aire</b>	1.1917 kg/m <sup>3</sup>
<b>Combustible</b>	810 kg/m <sup>3</sup>
<b>Desarrollos</b>	
<b>1</b>	8.2 km/h/(1000km)
<b>2</b>	15.7 km/h/(1000km)
<b>3</b>	25 km/h/(1000km)
<b>4</b>	36.5 km/h/(1000km)
<b>5</b>	46.9 km/h/(1000km)
<b>6</b>	54.8 km/h/(1000km)
<b>R</b>	8.3 km/h/(1000km)

Para poder situar el punto de funcionamiento del vehículo, es necesario conocer sus curvas de cargas parciales. En estas curvas, se entra mediante el régimen de giro y la presión media efectiva y se obtiene el consumo específico. La elección de este vehículo y no de otro, ha sido debido a que conocíamos sus *curvas de Willians*, curvas que son muy protegidas por los fabricantes de coches. En ellas podemos observar el consumo del vehículo para cada velocidad de giro del motor:

n [rpm]/PME [bar]	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500
1	437,3	422,4	426,1	431,5	444,4	442,1	476,3	491,8	537,5	555	569,2	603,6	620,5	652,5	690,2
2	305,6	304,5	307	309,7	315,4	303	313,8	324,6	348,3	357,2	366,2	379,8	389,4	409,1	427,9
3	268	272,3	285,2	284,2	275,2	262	266,9	273,3	286,4	292,9	300,7	311,9	320,9	333,2	348
4	252,2	254,9	259,5	259	252,5	244,1	244,7	250,9	259,1	264,5	272,7	280,7	291,4	299,4	313,9
5	244	246,3	249,7	250,6	224	233,8	234,5	240,6	244,1	251,4	257,4	266,7	273,5	282,5	294,3
6	240,4	233,1	229,1	228,9	228,7	228,2	228,1	232,3	236	2424,2	247,6	254,5	261,2	269,7	280,2
7	238,9	231,2	228,2	226,7	225,9	222,6	223,5	226,8	230,2	236,9	241,6	248	253,1	260,3	269,5
8	242,4	231,7	227,7	225,3	221,9	219,1	220	222,9	226,8	233,8	237,7	242,7	246,5	252,8	262,7
9	263,9	235,4	227,8	223,3	219,1	216,9	217,7	220,3	224,4	230,8	233,9	238,1	241,4	248,5	260,6
10		232,5	227,4	222,8	217,5	216	215,9	218,1	222,9	227,8	230,7	235,3	238,3	245,9	261,4
11		235,1	226,7	220,2	216	214,7	214,6	217	221,6	225,6	228,4	233,4	236,5	246,1	267,2
12		238,8	226	218,9	215,1	213,4	213,6	216,1	220,1	224	226,47	232,5	236,5	248,3	263,8
13		241,6	225,7	218,3	214,3	212,9	213,3	215,7	219,1	222,9	225,9	232,5	237,6	248,4	262
14		245,1	226,2	217,7	213,9	212,9	213,2	215,5	218,7	222,3	225,7	232,8	239,9	249,6	
15			227,7	217,5	214,6	213,2	213,9	215,6	217,8	222,2	226,7	234,1	240	251,7	
16			227,3	218,8	215,3	215,3	215,8	217,1	218,7	223,6	229,3	235,5	240		
17			229,3	219,6	217,1	217,6	218,2	219,1	220,7	226,1	233,3	240,5			
18			229,6	221,3	218,2	218,6	219,3	220,4	223,8	229,7	237,9				
19			229,6	222,3	219,8	220,8	221	222,7	228,6	234,9					
20				223,6	221,2	221,7	223,9	227,3	231,7						
21				223,4	220,9	223,2	228,3	228,4							
22				223,4	220,3	223,5	226,9								
full load	267,9	253,7	231,8	224,8	222,4	228	227,2	227,5	230,3	235,7	241,2	244,1	243	251,5	261,7

Ilustración 24: Isoconsumos en forma de matriz en EXCEL



## Capítulo 6

### Elaboración del simulador: Motor térmico

Para poder simular el motor híbrido es necesario dividirlo en dos partes: un motor térmico y uno eléctrico. Se comenzará con el estudio del motor térmico y finalmente se añadirá el motor eléctrico en los casos señalados que se explican posteriormente.

El fin de la simulación es obtener el consumo y los kg de CO<sub>2</sub> emitidos a la atmósfera. Para ello, se parte de la velocidad instantánea del vehículo y mediante las ecuaciones de la dinámica descritas en el *Capítulo 2* se obtendrá el esfuerzo resistente total y la potencia requerida.

Las velocidades instantáneas, se obtienen de un ciclo NEDC para la simulación. Este ciclo de conducción se usa para las homologaciones de consumos de combustible y emisiones de gases contaminantes en vehículos para todos aquellos vehículos que se comercializan en la Unión Europea.

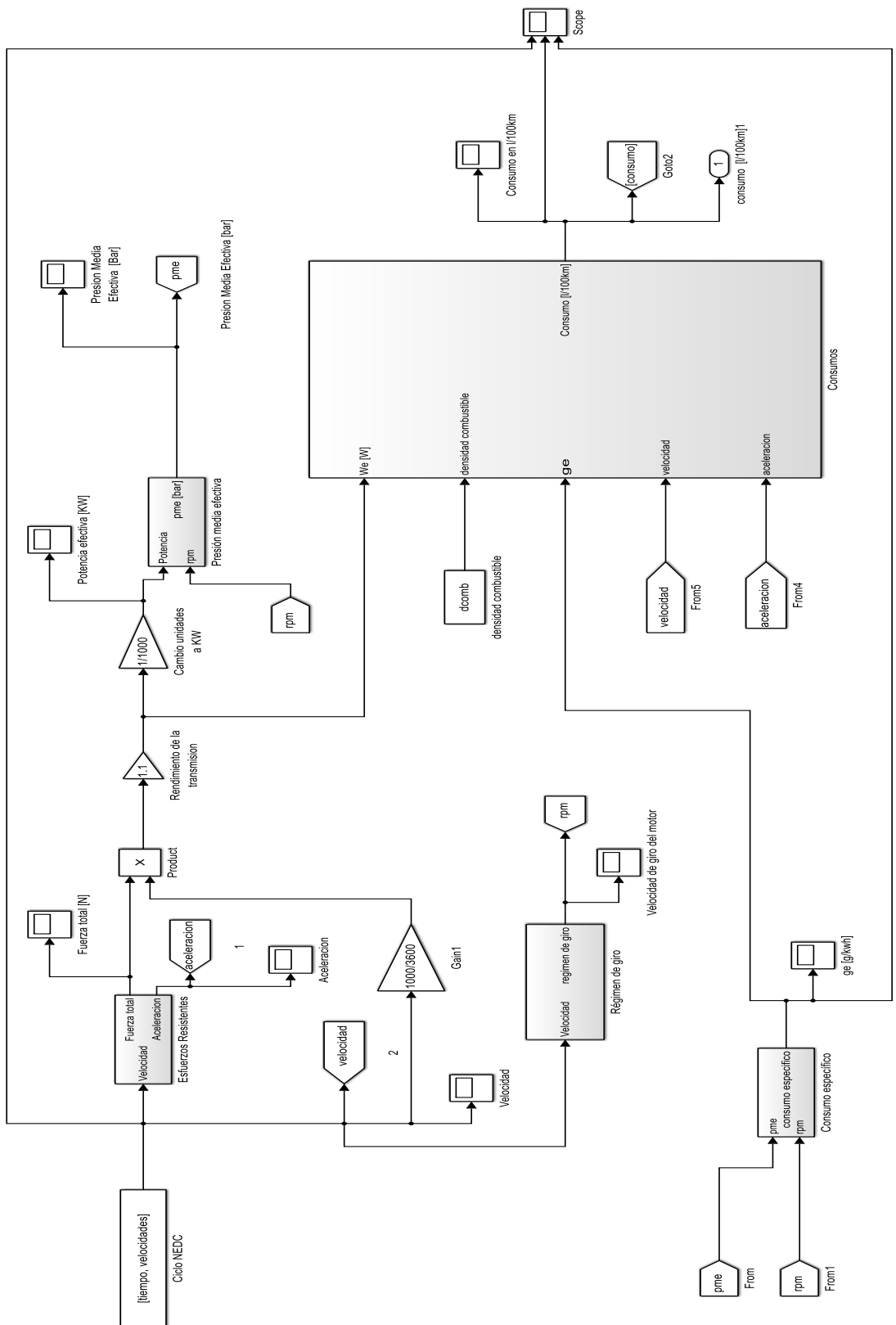


Ilustración 25: Vista global del motor térmico (simulación)

## 6.1. Obtención de los esfuerzos resistentes y potencia requerida

Para la obtención de los esfuerzos resistentes se recurre a las ecuaciones de la dinámica. Para comenzar la simulación, se parte de los datos del ciclo de velocidad NEDC, que es el ciclo elegido para la simulación. Estos valores se encuentran en forma de tabla en *Microsoft EXCEL* y han de ser exportados al espacio de trabajo de *MATLAB* mediante la función "*xlsread*". Posteriormente, se emplea el bloque "Ciclo" que introduce los datos de la velocidad y tiempos en la interfaz de Matlab denominada *Simulink* dónde se realizará toda la simulación.

Mediante las ecuaciones (2), (7) y (8) obtenemos la fuerza aerodinámica, la fuerza a la rodadura y la fuerza de ascensión por una pendiente respectivamente. Estas fuerzas son las que se oponen al desplazamiento del vehículo. Mediante ellas se obtiene la potencia requerida. Estas ecuaciones se pueden ver transformadas en la siguiente imagen mediante bloques:

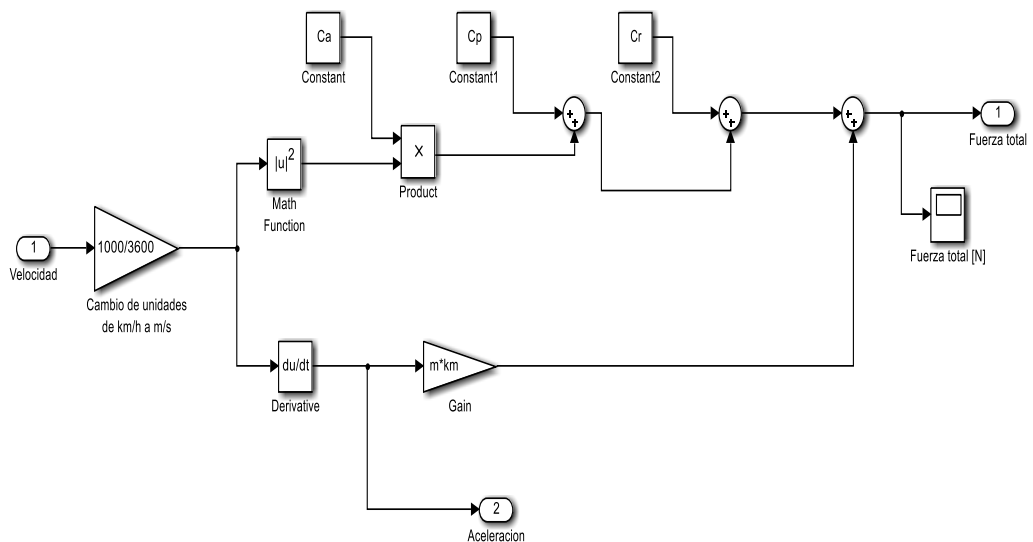


Ilustración 2126: Subsistema "Esfuerzos resistentes"

En la imagen superior se representa la suma de las cuatro fuerzas que se oponen a la marcha del vehículo: la resistencia aerodinámica, la resistencia a la ascensión de una pendiente y la resistencia a la rodadura y finalmente, la fuerza que se produce por la propia inercia del vehículo al acelerar. Las tres primeras

han sido representadas mediante constantes ( $C_a$ ,  $C_p$ ,  $C_r$ ) que se importan desde el “Workspace” de Matlab. De esta manera, el simulador puede ser válido si queremos cambiar algún parámetro del vehículo como por ejemplo en el caso de que el coche subiera una pendiente.

En cuanto a la constante “ $C_p$ ”, esta vale cero en nuestra simulación ya que el ciclo NEDC se realiza para una pendiente de  $0^\circ$ . No obstante, este valor podría ser cambiado desde el “Workspace” de Matlab. Para continuar, cabe destacar que la resistencia a la rodadura y la resistencia a la ascensión no son dependientes de la velocidad. Sólo la fuerza de ascensión se encuentra multiplicada por el bloque “Math function” que eleva al cuadrado la velocidad.

Finalmente, para obtener la resistencia a la inercia del vehículo debido a la inercia de los distintos elementos rotativos del automóvil, se procede a derivar la velocidad para así obtener la aceleración y después multiplicar por la masa del vehículo y el factor de masa equivalente, ambos obtenidos también del “Workspace” de Matlab.

Tras calcular todos los esfuerzos, se suman y se obtiene el esfuerzo total que se puede visualizar mediante el bloque “Scope” y se puede observar lo siguiente:

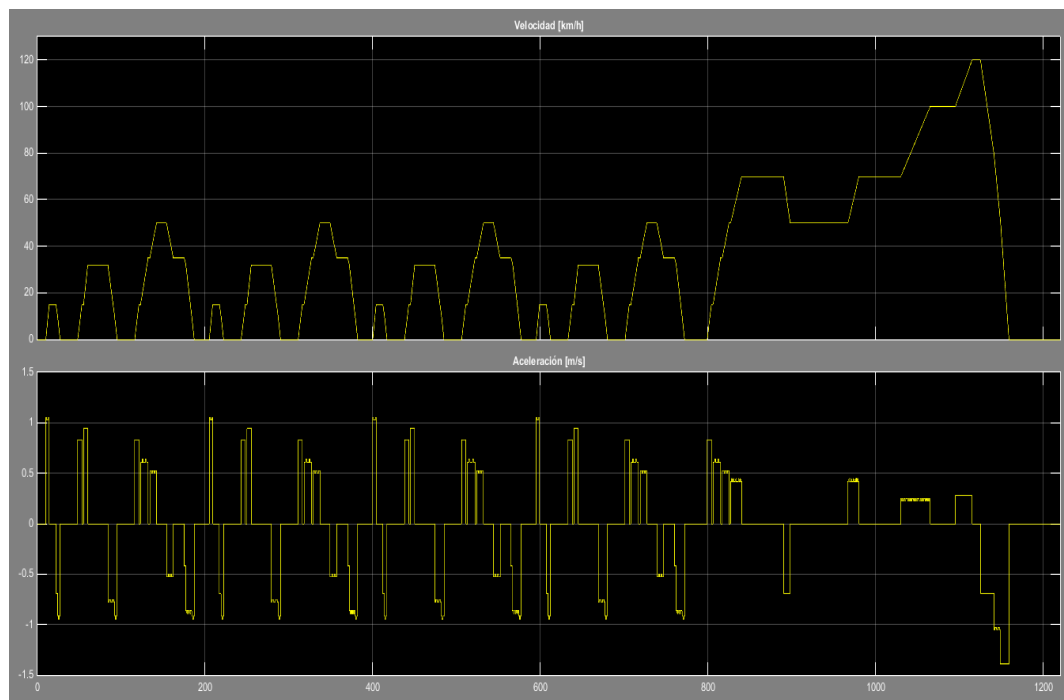


Ilustración 27: Velocidad [km/h] y aceleración [m/s]

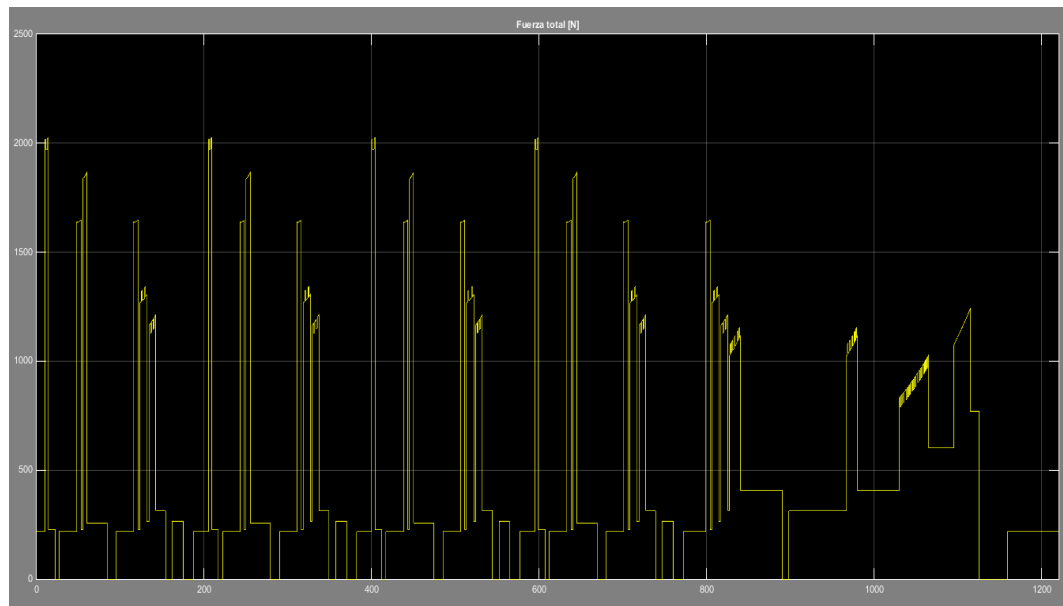


Ilustración 28: Fuerza total

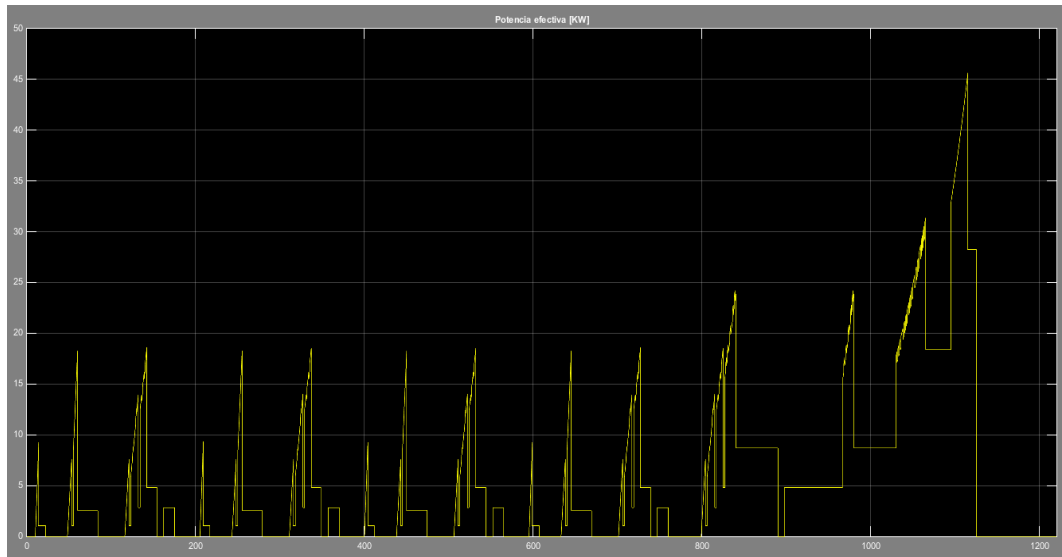
En la imagen superior se puede observar las aceleraciones y deceleraciones que se producen en el ciclo y que afectan a la fuerza total. Cuando el vehículo se encuentra decelerando, la fuerza de tracción es negativa mientras que cuando acelera es positiva. Tenemos una fuerza negativa en las deceleraciones debidas a que se requiere una fuerza para frenar el vehículo.

En la ilustración 25 también se puede observar los dos ciclos en los que se desarrolla el ciclo de conducción. Si observamos la velocidad, primero se aprecia una fase de circulación en zona urbana, cómo podría ser la circulación del vehículo por la ciudad. Se pueden observar numerosos momentos en los que el vehículo se encuentra parado. En el comienzo de esta zona, se arranca el coche y se mantiene 40 segundos en ralentí. Tras engranar la primera marcha alcanzando velocidades entorno a los 15 km/h y vuelve a detenerse. Tras 50 segundos de ralentí se acelera a 35 km/h y el vehículo se vuelve a detener. Después se acelera a 50 km/h, se reduce a 37 km/h y se vuelve a detener. Este proceso es repetido tres veces para completar el recorrido urbano.

En la fase extra-urbana, como podría ser el caso de la circulación del vehículo por una autopista, se acelera el vehículo desde 0 a 70 km/h. Durante un minuto, el vehículo circula a esta velocidad y después se disminuye a 50 km/h manteniéndose también durante un minuto. Se acelera hasta 70 km/h y tras un

minuto se incrementa la velocidad hasta 100 km/h y después a 120 km/h. Finalmente se decelera y se da por concluido el ciclo.

Para calcular la potencia requerida, simplemente se multiplica la velocidad instantánea por la fuerza total y el rendimiento de la transmisión, obteniéndose el siguiente gráfico:



*Ilustración 29: Potencia requerida en KW*



## 6.2. Régimen de giro del motor

Para poder calcular la presión media efectiva del motor y el consumo específico es necesario conocer el régimen de giro del motor. Para ello, se ha usado un subsistema denominado “Régimen de giro” el cual se divide a su vez en otros tres subsistemas como podemos observar en la siguiente imagen:

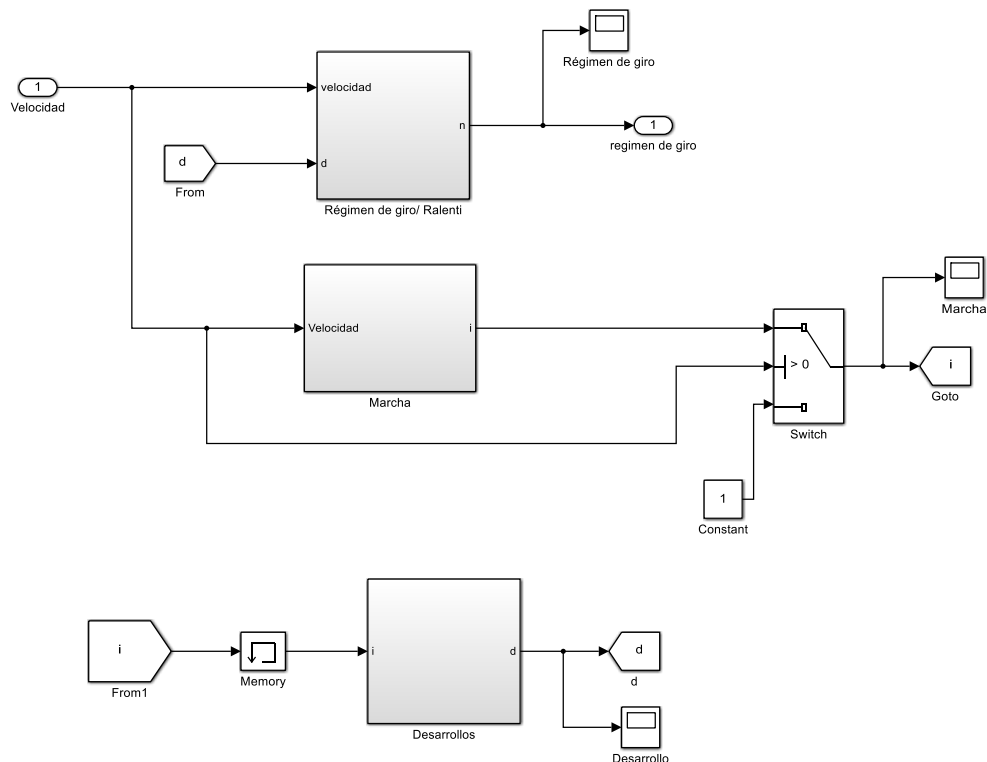


Ilustración 30: Subsistema "Régimen de giro"

En el primer subsistema, “Régimen de giro/Ralenti”, se obtiene el régimen al que gira el motor. Se parte de la velocidad instantánea y del desarrollo. Dividiendo estas dos respectivamente y con su debido cambio de unidades obtenemos el régimen de giro. Esto sólo ocurre cuando la velocidad sea estrictamente mayor de cero, es decir, cuando el vehículo se encuentra en movimiento. En el caso contrario, se encuentra parado, por lo que se encuentra

en régimen de ralentí, al cual le hemos asignado 700 rpm. Para cumplir dicha lógica, se ha empleado un bloque denominado “Switch”, que conecta la salida con una de las dos posibles entradas a las que se conecta según la lógica introducida en la parte central del bloque (entrada de control).

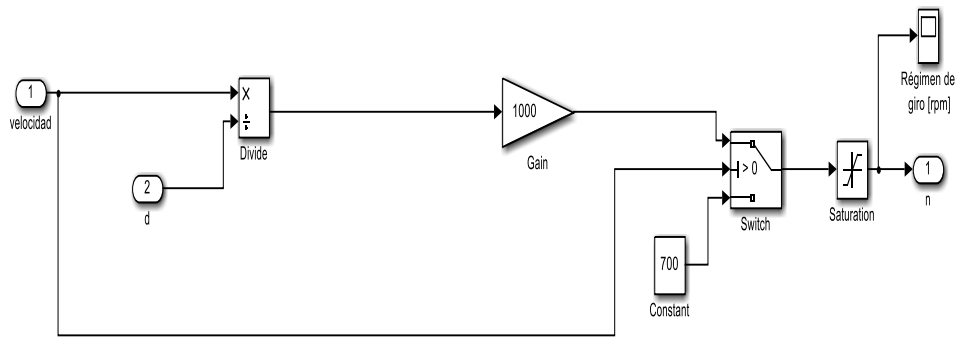


Ilustración 31: Régimen de giro/Ralentí

El segundo subsistema que se va a analizar es la marcha (i). El óptimo cambio de marcha es un factor esencial en la conducción con cambio manual así como realizarlo en el momento adecuado para obtener el aprovechamiento máximo de la potencia del motor. Cada marcha, tiene un rango de funcionamiento efectivo para hacer funcionar el coche a velocidades concretas. Esto dependerá de las revoluciones que tenga el motor. Cuanto más rápido sea capaz de girar el motor, más rápido podrá circular hasta alcanzar el límite que obliga a hacer el cambio de marcha.

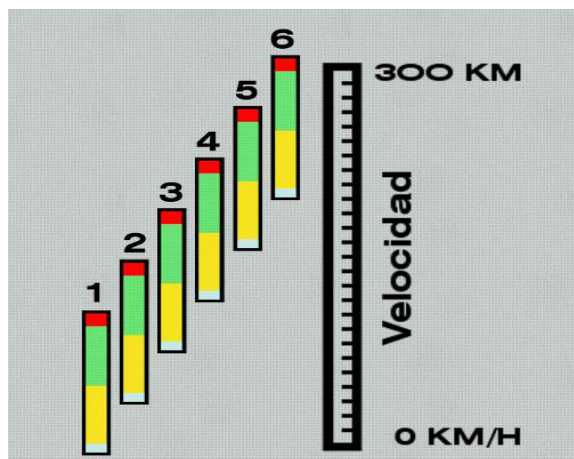


Ilustración 32: Gama de velocidades para cada marcha F1

Para la simulación, se ha empleado una lógica de “conducción eficiente”. Para ello, el motor trabaja siempre en zonas cercanas al punto de par máximo, ya que es donde se agrupan los rendimientos máximos.

Para ello, se parte de la velocidad instantánea. El subsistema “Marcha” es el siguiente:

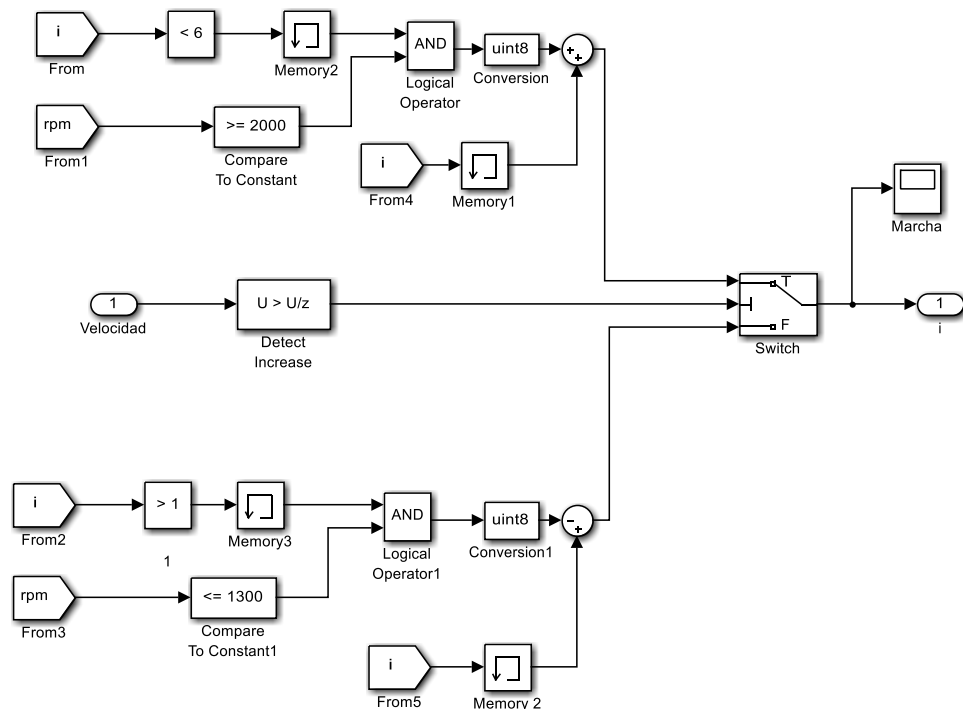


Ilustración 33: Subsistema “Marcha”

También se emplea como anteriormente un bloque “Switch” para determinar qué ocurre. Este subsistema permite elegir una marcha superior o una marcha inferior en función de la marcha engranada anteriormente y de las revoluciones a las que gira el motor. Para que la condición sea verdadera, la velocidad tiene que aumentar (variable de control). Este incremento, se detecta mediante el uso del bloque “Detect Increase” que devuelve un 1 si dicha función se cumple o 0 si la condición es falsa. Si la condición es verdadera, ocurre el bloque superior, si es falsa, el bloque inferior.

En el bloque superior se comprueba si la marcha es inferior a 6, ya que esta es la marcha máxima y si las revoluciones a las que gira el motor son mayores o iguales a 2000 rpm. Si ambas condiciones se cumplen, el bloque “AND” devuelve un 1 (TRUE), sino devuelve un 0 (FALSE). El bloque “uint8” que es un bloque “converter”, convierte el 1 lógico en un 1 numérico. Por lo tanto, este 1 se sumaría a la marcha que estaba guardada anteriormente (con el bloque “Memory”). Los bloques “Memory” son empleados para almacenar el último valor que toma la variable involucrada en un proceso iterativo. De esta manera, la iteración se puede resolver dentro del periodo de muestreo del simulador. Así se concluiría el incremento de marcha.

En el caso de bajar de marcha ocurriría lo mismo. No obstante las condiciones son distintas; la marcha ha de ser superior a uno y la velocidad de giro del motor menor o igual a 1300 rpm.

Finalmente mediante el último subsistema, “Desarrollos”, se elige el desarrollo dependiendo de la marcha. Su configuración es la siguiente:

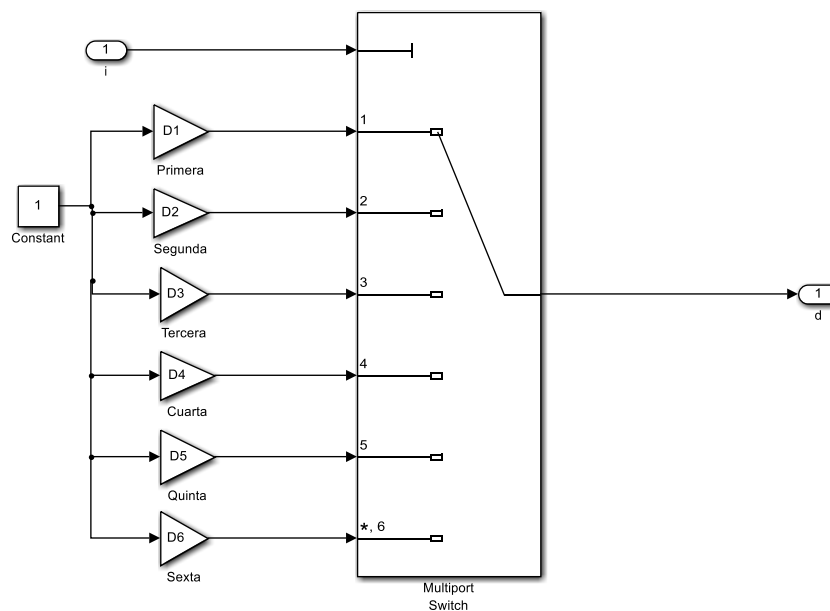


Ilustración 34: Subsistema Desarrollos

Este subsistema tiene como entrada la marcha y en función de ella se elige un desarrollo mediante el “Multiport Switch” que funciona igual que el “Switch”



descrito anteriormente. La entrada de control es la superior y el valor de ésta es el que determina el puerto de entrada que se selecciona. Finalmente de este subsistema obtenemos el desarrollo. Se ha de observar también como los valores de los desarrollos han sido parametrizados con el objeto de poder ser variados con facilidad.

Por lo tanto, los resultados obtenidos para el motor térmico son los siguientes:

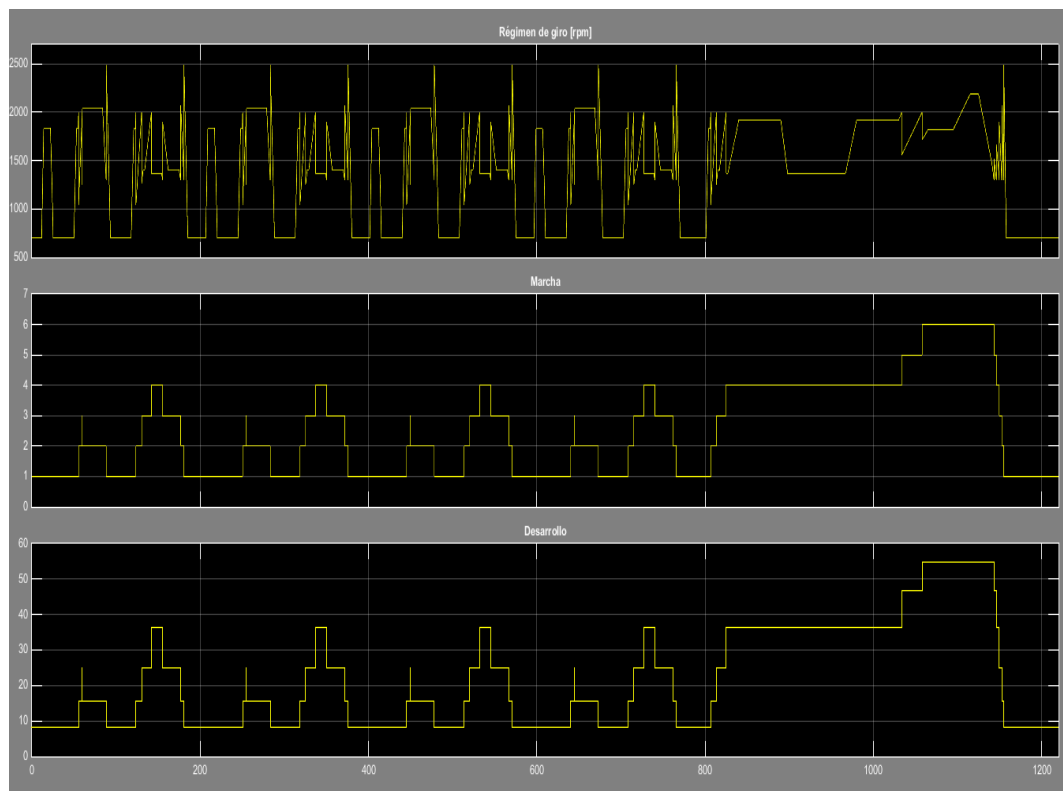


Ilustración 35: Régimen de giro [rpm], Marcha y Desarrollo

Como se puede observar, el cambio de marcha se produce siempre en los alrededores de 2000 rpm, para incremento de marcha y 1300 rpm para bajar la marcha. Cuando la marcha sexta se encuentra engranada, se puede observar un incremento de las revoluciones, superior a 2000 rpm. Esto es debido a que no existe una marcha superior, por lo que el cambio no es posible. Después de cada cambio se puede observar también como hay un incremento instantáneo (un pico) esto es debido a que en el momento justo después del cambio, el vehículo se revoluciona durante un instante.

### 6.3. Presión media efectiva

Para calcular la presión efectiva se emplea la *ecuación 17*. El subsistema utilizado para la “Presión media efectiva” es el siguiente:

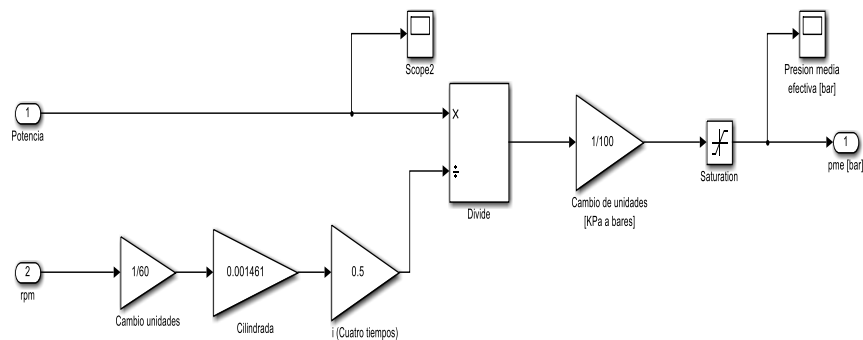


Ilustración 36: Subsistema Presión media efectiva

Partiendo de la potencia y del régimen de giro del motor, se obtiene la presión media efectiva. Para ello, se cambia de unidades el régimen de giro dividiendo por 60 y se multiplica por la cilindrada y por el parámetro  $i$ , que es 0.5 ya que se trata de un motor de cuatro tiempos. Después la potencia se divide por todo lo anterior y mediante el cambio de unidades oportuno, se obtiene la presión media efectiva. El bloque “*Saturation*” limita la presión media efectiva mínima a cero, puesto que las presiones negativas no tienen sentido. Estos puntos de presiones negativas y por tanto potencias negativas son momentos en los que el vehículo se encuentra decelerando.



La presión media que obtenemos es la siguiente:

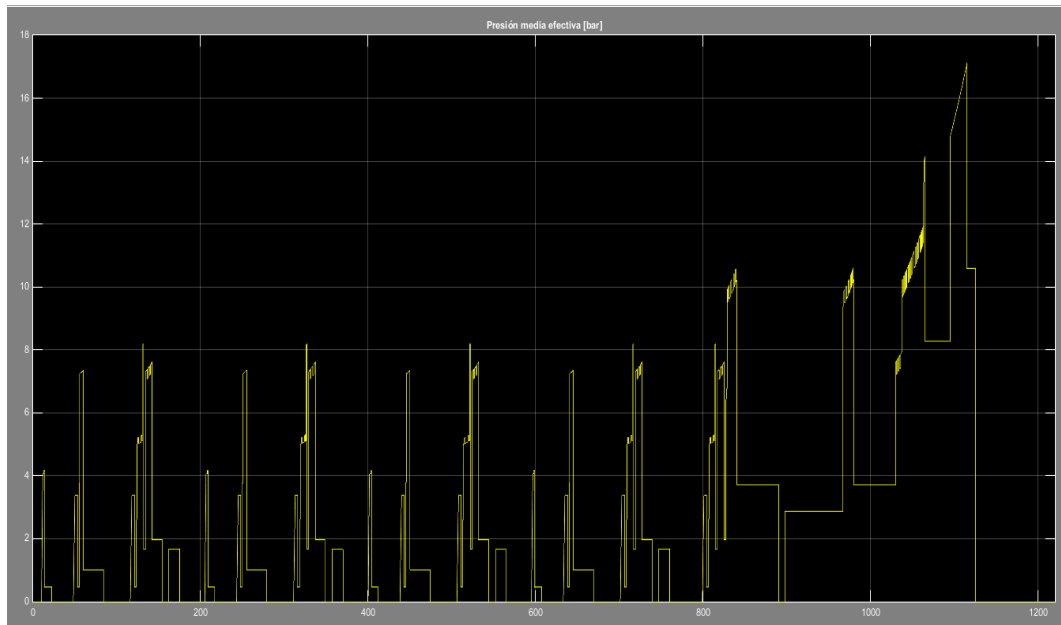


Ilustración 37: Presión media efectiva [bar]

#### 6.4. Consumo específico

Una vez conocida la presión media efectiva y las revoluciones a las que gira el motor, se puede obtener el consumo específico en cada punto. Para ello, como se ha explicado en el *Capítulo 2*, se obtiene el consumo específico de las curvas de Willans o curvas de isoconsumo. Para ello se deben de tener como entradas la presión media efectiva y el régimen de giro del motor. Estas curvas han sido convertidas en un Excel, y para poder escoger una salida (consumo específico), es necesario redondear las dos entradas. Para la elección de éstas, se ha usado el bloque “2-D Lookup Table” que mediante estas dos entradas encuentra el consumo específico.

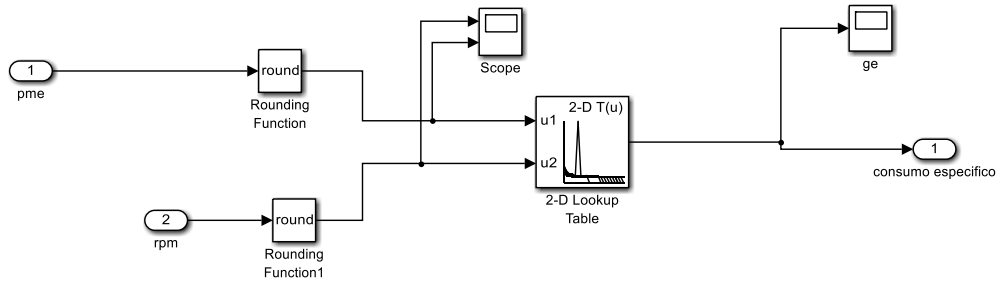


Ilustración 38: Subsistema Consumo Específico

El consumo específico que se obtiene para el Nissan Qashqai es:

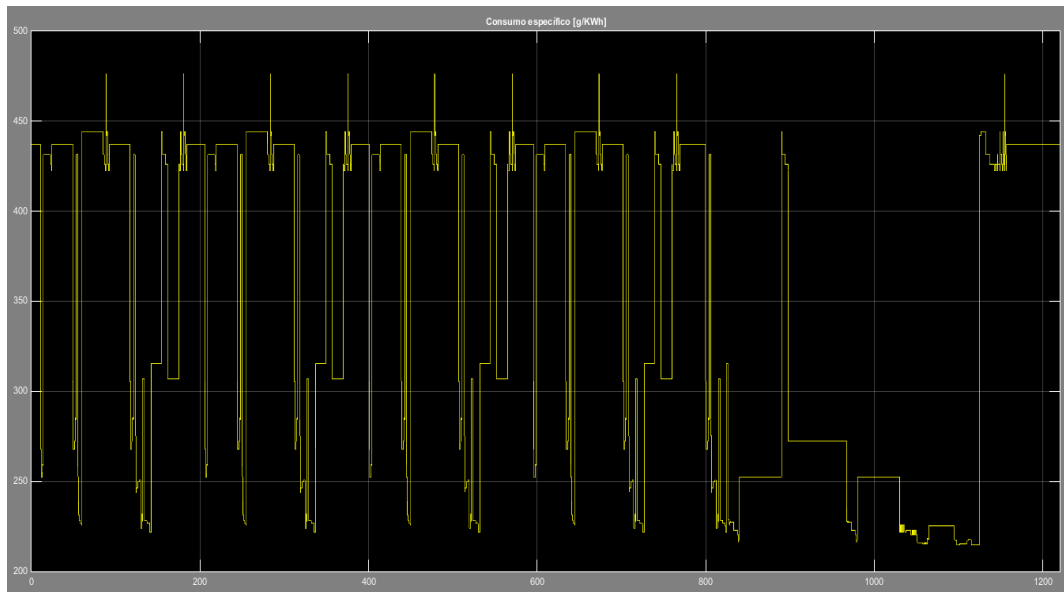


Ilustración 39: Consumo específico [g/kwh]



## 6.5. Consumo

El subsistema “Consumos” tiene como entradas la potencia entregada por el motor, la densidad del combustible (diésel), el consumo específico (obtenida en el apartado anterior) y la velocidad.

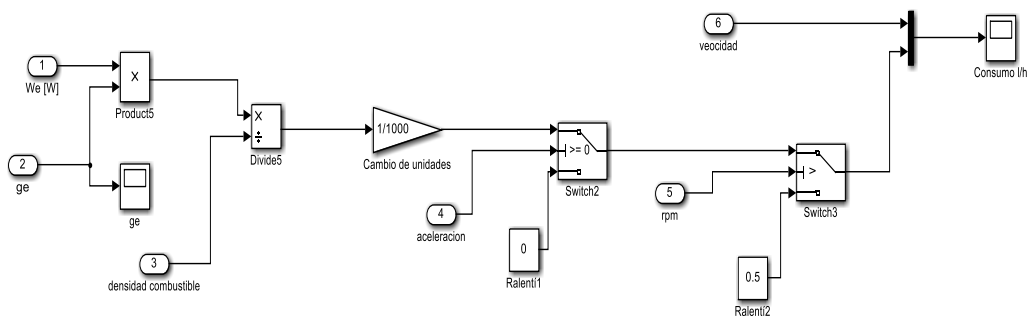


Ilustración 40: Subsistema Consumo

En dicho subsistema se lleva a cabo la siguiente operación:

$$C = \frac{g_e \cdot \dot{W}_e}{\rho_f \cdot v} \quad (20)$$

Para hallar el consumo se emplea el conocido bloque “Switch” que tiene como variable de control detectar el incremento en la aceleración. Si existe incremento de aceleración, se procederá a la entrada superior que corresponde con la operación de la ecuación del consumo mencionada anteriormente. En el caso de que la aceleración no se incremente, el consumo del vehículo sería 0.5 l/h y constante. El bloque “Saturation” hace que en las deceleraciones o aceleraciones cero el menor consumo sea 0.5 l/h en lugar de cero.

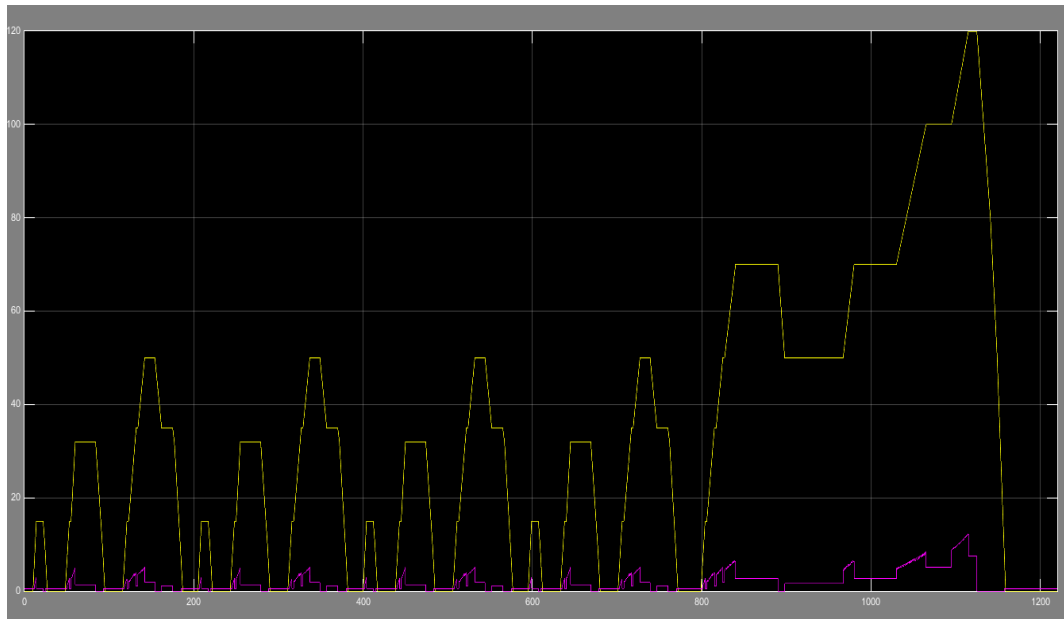


Ilustración 41: Velocidad [km/h] vs Consumo [l/h]

Se puede observar como el consumo es mucho mayor a altas revoluciones y como decrece tras el cambio de marcha.

## 6.6. Emisiones de CO<sub>2</sub>

Finalmente para el cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub>, se usa el subsistema “Emisiones de CO<sub>2</sub>”:

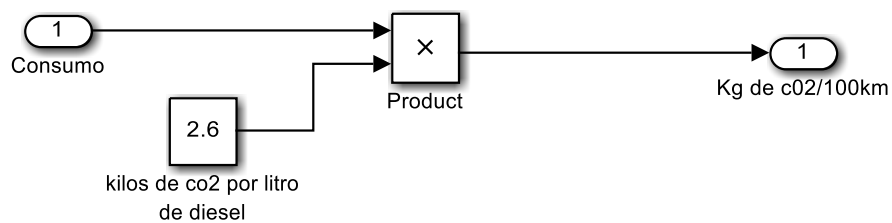


Ilustración 42: Subsistema emisiones de CO<sub>2</sub>



Las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera son directamente proporcionales al consumo del vehículo, es decir, los kilogramos de CO<sub>2</sub> emitidos a la atmósfera son de 2.6 por litro de diésel. Si multiplicamos este valor por el consumo en cada instante, obtenemos los kg de CO<sub>2</sub> cada 100 km.

Los resultados del motor térmico serían los siguientes:

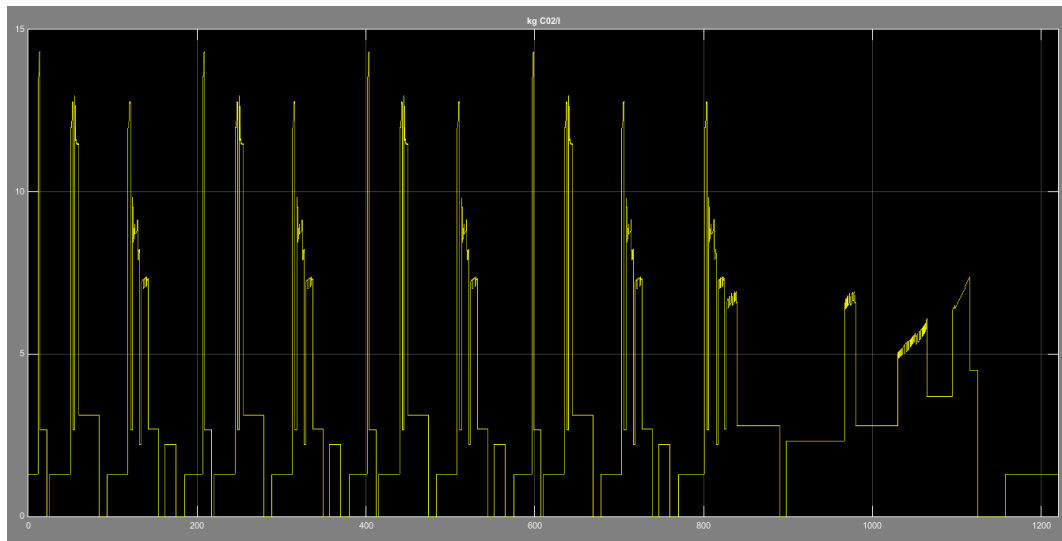


Ilustración 43: kg de CO<sub>2</sub> cada 100km





## Capítulo 7

### Elaboración del simulador: Motor híbrido

En este capítulo se procede a explicar la simulación de un vehículo que funciona mediante un motor de combustión interna y un motor eléctrico en casos específicos. Para ello, la energía disipada en forma de calor en los frenos es recogida y almacenada en unas baterías. De esta manera, se puede emplear posteriormente para alimentar un motor eléctrico.

La principal diferencia de este sistema con respecto al explicado en el *Capítulo 6* es la adición de un motor eléctrico y su correspondiente batería. Este motor eléctrico ha sido escogido de acorde con las especificaciones necesarias como son la potencia y vueltas del motor. En cuanto a la batería, se trata de una batería diseñada para cargas y descargas continuadas. Tienen una duración aproximadamente del doble con respecto a las baterías normales, son recargables y eficientes. Para la elaboración del simulador, se ha elegido una batería de la conocida marca *BOSCH*, una de las empresas líder en el sector desde 1887:



Ilustración 44: Batería Bosch elegida

Las características principales de esta son las siguientes:

<b>BATERÍA</b>	
<b>Marca</b>	<b>Bosch</b>
<b>Modelo</b>	S4-019
<b>Referencia</b>	0 092 S40 190
<b>Altura [mm]</b>	227
<b>Longitud [mm]</b>	187
<b>Anchura [mm]</b>	127
<b>Capacidad de batería [Ah]</b>	40
<b>Peso [kg]</b>	11.20
<b>Voltaje [V]</b>	12
<b>Corriente [A]</b>	330
<b>Polaridad</b>	Izquierda positivo
<b>Fijación</b>	B00
<b>Garantía [meses]</b>	24
<b>Precio</b>	<b>71.29 €</b>

*Tabla 3: Características batería BOSCH*

Las características principales de estas baterías son las siguientes:

- Larga vida útil gracias a su tecnología
- Mantener el 100% libre y sellado
- Funcionamiento excelente, incluso en condiciones adversas
- Fácil manejo e instalación
- Hecho respetando el medio ambiente



Para continuar, el motor elegido ha sido un motor trifásico de 30 KW y 1500 rpm de la marca *Siemens*. Es un motor con rotor de jaula de ardilla y las características son las siguientes:

<b>Motor eléctrico</b>	
<b>Marca</b>	<b>Siemens</b>
<b>Modelo</b>	1CV2205B
<b>Método de refrigeración</b>	Ventilación propia
<b>Grado de protección</b>	IP55
<b>Tipo de aislamiento</b>	155(F)
<b>Material carcasa</b>	Carcasa de fundición
<b>Eficiencia</b>	IE2
<b>Número de polos</b>	4
<b>Voltaje [V]</b>	400VD / 690VY
<b>Potencia [kw]</b>	30 (50Hz) / 34.5 (60Hz)
<b>Tamaño [l]</b>	200
<b>Posición caja de bornas</b>	Arriba
<b>Precio</b>	<b>1828.16€</b>

Tabla 4: Características motor eléctrico Siemens

Además, tiene las siguientes características:

- Extensos ciclos de vida
- Corriente muy baja al final de la carga
- Bajo consumo de agua
- Bajo mantenimiento
- Bornes con espárragos de acero inoxidable
- Electrolito líquido



*Ilustración 45: Motor Siemens elegido*

Finalmente, es necesario una unidad de control. Esta unidad es una caja electrónica encargada de dos funciones:

- Invertir y controlar la conmutación de la corriente entre las baterías y el motor-generador
- Supervisar el estado de las celdas de la batería

La eficiencia de las baterías se reduce cuando una de las celdas no funciona. Además, la celda puede recalentarse pudiendo provocar problemas de seguridad que han de evitarse.

Un ejemplo de unidad de control es la mostrada en la siguiente imagen:



*Ilustración 46: Unidad de control elegida*



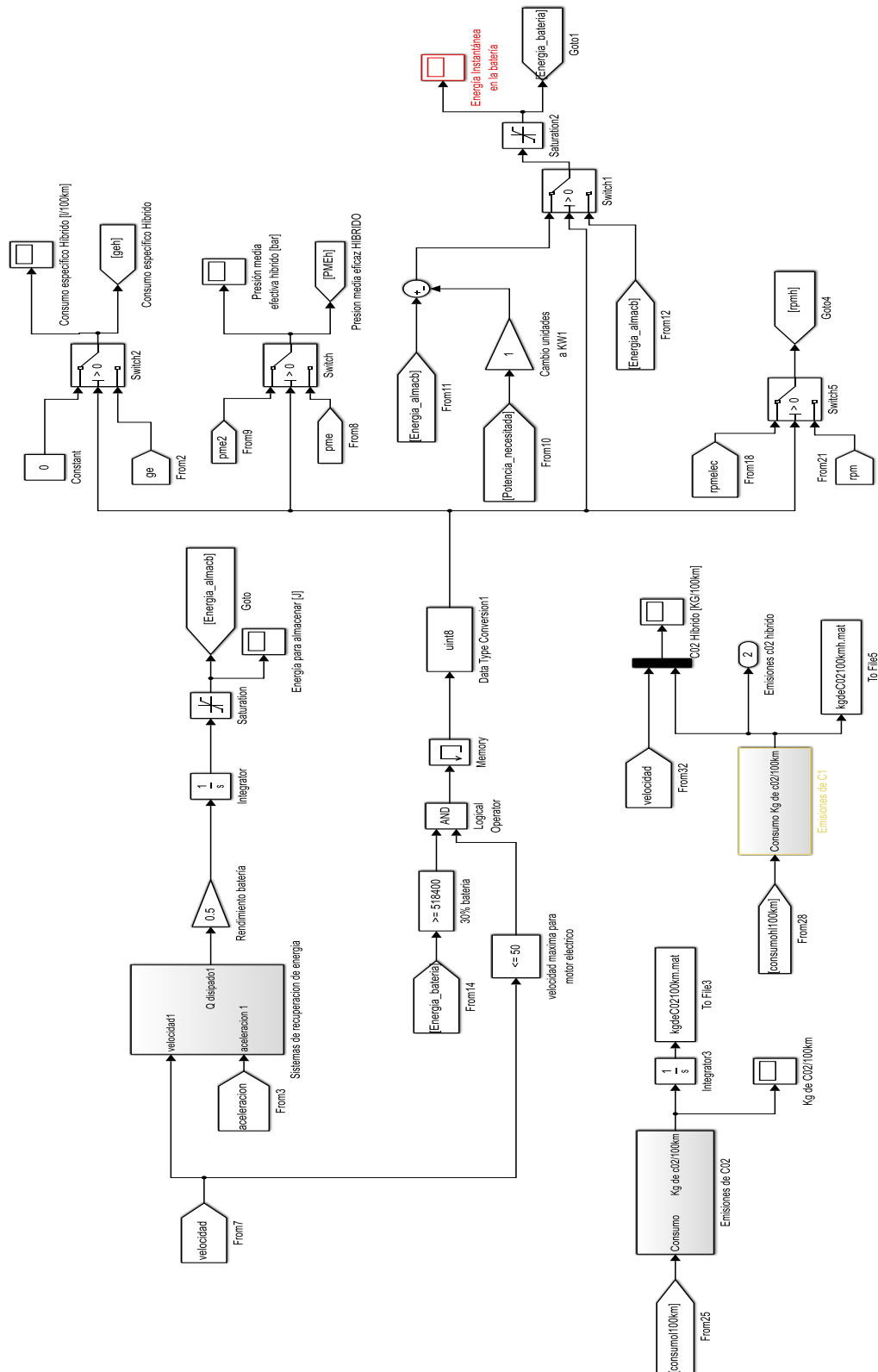


Ilustración 47: Visión general del motor eléctrico en Simulink

La simulación consiste en un motor térmico junto a uno eléctrico. Este último emplea la energía almacenada en la batería, energía que se ha obtenido mediante el uso de frenos regenerativos y que posteriormente había sido transformada en energía eléctrica para su almacenamiento. Para la simulación, se han considerado los siguientes criterios:

- La conversión de energía calorífica a energía eléctrica tiene un rendimiento del 50%.
- El motor eléctrico sólo funciona cuando la velocidad del vehículo es inferior a 50km/h.
- El motor eléctrico funciona siempre y cuando la carga de las baterías sea al menos 30% de su carga total.

Si no se dan estas tres condiciones, el motor eléctrico no funcionaría y por tanto el consumo y emisiones de CO<sub>2</sub> serían los mostrados en el capítulo anterior. En el caso de que estas tres condiciones se cumplieran, se procedería a usar el motor eléctrico con su consiguiente consumo de 0 l/h y 0 kg de CO<sub>2</sub>.

### 7.1. Conversión y almacenamiento de energía

Como se puede observar en la siguiente ilustración, con las entradas de velocidad y aceleración podemos obtener la energía que se recupera a través de los frenos regenerativos mediante el subsistema denominado "*Sistema de recuperación de energía*" que se explicará posteriormente.

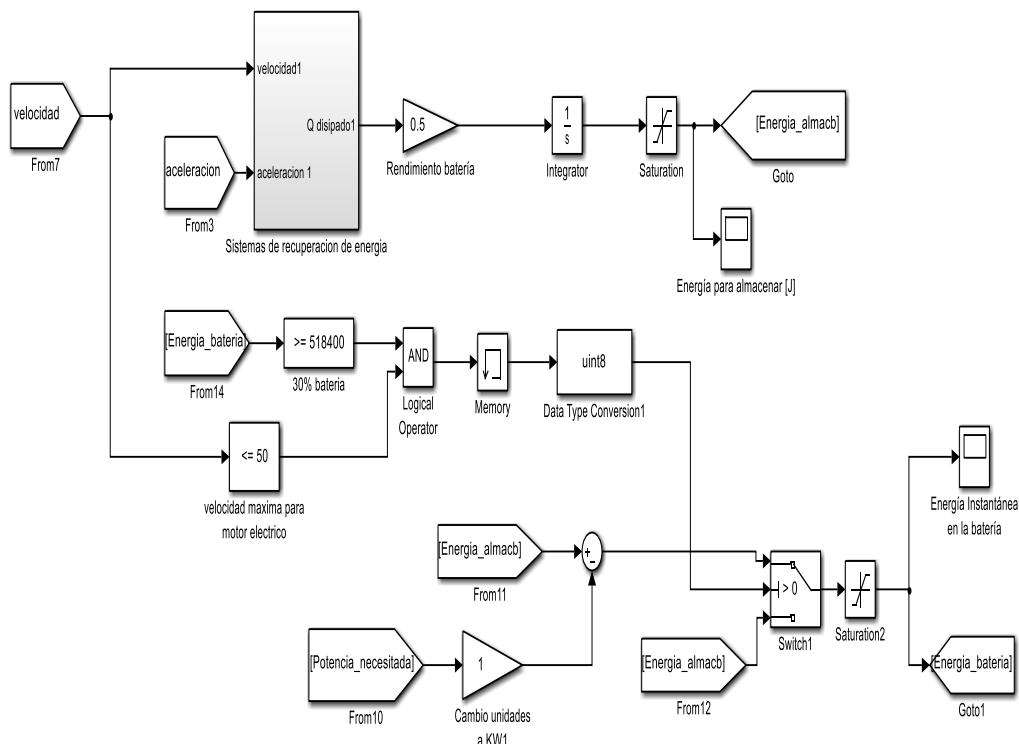


Ilustración 48: Conversión de energía y carga de batería

Como se ha descrito anteriormente, sólo el 50% de la energía que se podría recuperar en un caso ideal, puede pasar a almacenarse a la batería. Por ello, hemos multiplicado esta energía por un bloque de valor 0.5 y luego se le ha aplicado el bloque “Integrator” que suma todas las energías mediante una integral. De esta manera, se iría almacenando toda la energía. No obstante, las baterías no son ilimitadas, por lo que en el caso que hemos escogido de batería de 40 Ah y 12 V, la energía máxima almacenada posible sería 1728 KJ. Para ello se ha empleado el bloque “Saturation” con dicho valor como límite superior.

Conforme esta energía va siendo usada para mover el motor eléctrico, ha de irse descontando de la batería. Se puede observar en la ilustración que esta energía sólo será usada cuando la velocidad sea menor o igual de 50 km/h y cuando la batería esté al menos al 30 %. Para ello se ha empleado el bloque “AND” que ofrece un 1 si ambas condiciones son correctas y un 0 si son incorrectas.

Para descontar la energía usada se ha procedido a emplear un bloque denominado “Switch”, que tiene como condición para comparar, el “AND” explicado anteriormente. En el caso de que esta condición sea verdadera, se utilizará la línea superior, en la cual se resta a la energía almacenada en la batería la energía necesitada para mover el vehículo. Si esta condición no se cumple, entonces la energía almacenada no sufriría variaciones.

La siguiente imagen corresponde al subsistema mediante el cual simbolizamos los frenos regenerativos de donde obtenemos la energía cuando el vehículo frena:

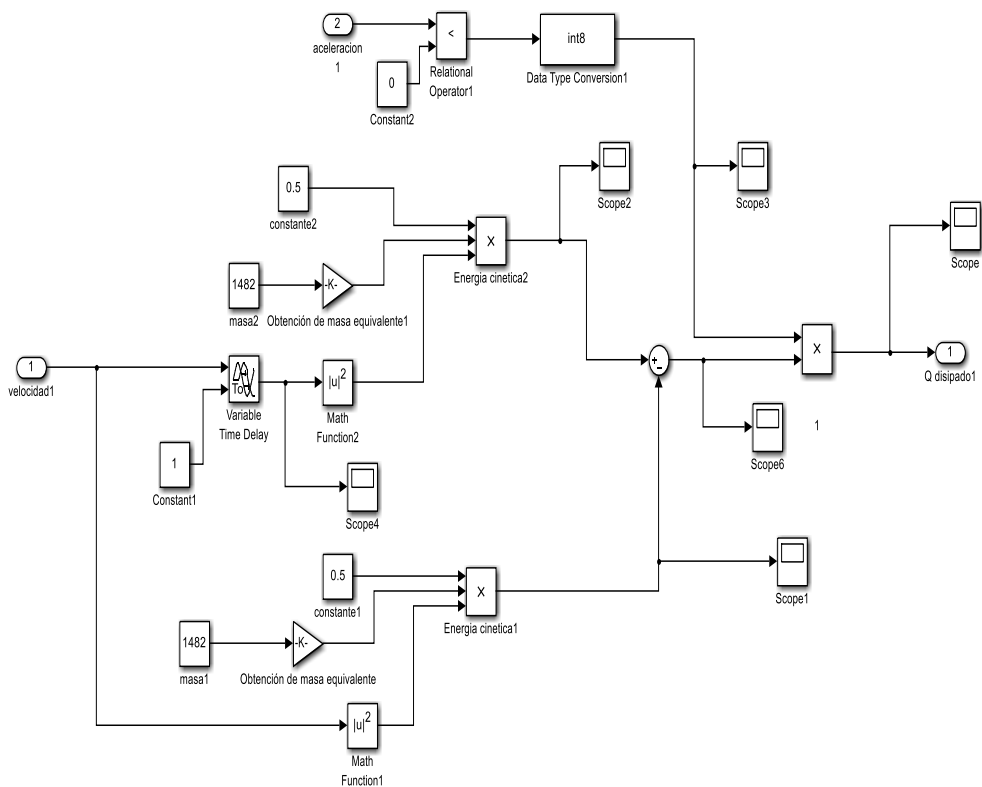


Ilustración 49: Subsistema “Sistema de recuperación de energía”

Para ello, se ha empleado un bloque denominado “Relational Operator” que ofrece un 1 si la aceleración es menor que cero. Si se cumple que el vehículo se encuentra frenando, aceleración menor que 0, entonces se procede a la diferencia de energía cinética del instante anterior menos la energía cinética en

ese instante. Para obtener la velocidad en un instante anterior se ha empleado el bloque “*Variable time delay*” y mediante la ecuación de la Energía cinética se ha obtenido el calor disipado:

$$Q = \frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_2^2 \quad (21)$$

## 7.2. Régimen de giro del motor eléctrico

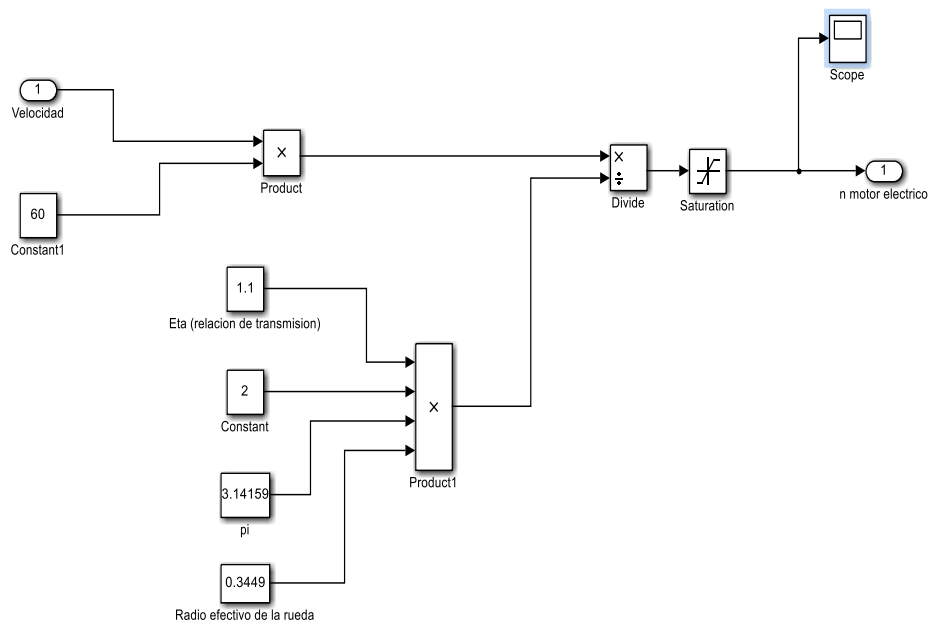


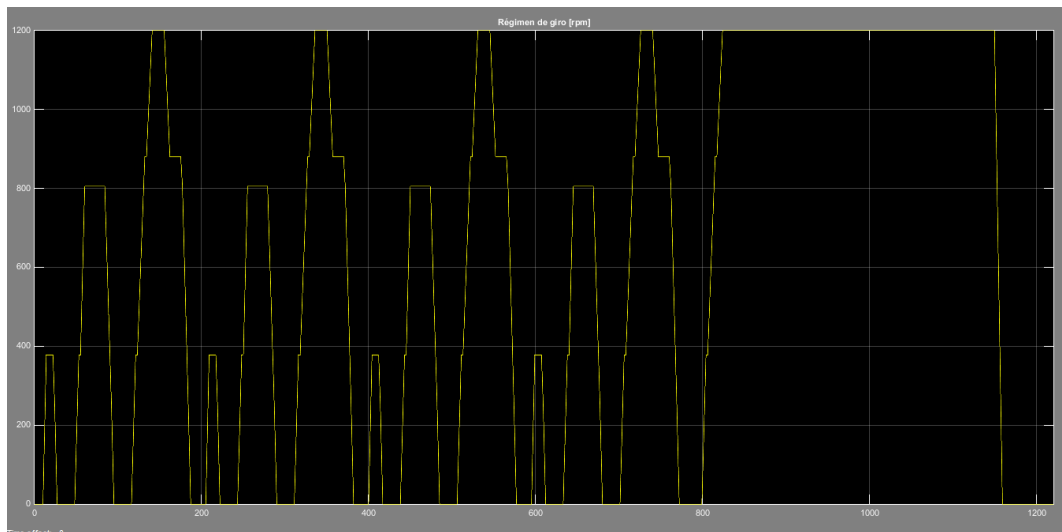
Ilustración 50: Cálculo de régimen de giro del motor eléctrico

Para el cálculo del régimen de giro lo hemos limitado a un máximo de 1200 rpm ya que la velocidad máxima a la cual este motor eléctrico puede funcionar es hasta 50 km/h. Para obtener el régimen de giro se ha empleado la siguiente ecuación:

$$n = \frac{60 * v}{2 * \pi * r_e * \zeta} \quad (22)$$

Donde  $r_e$  es el radio efectivo de la rueda,  $v$  la velocidad y  $\zeta$  la relación de transmisión.

El gráfico que obtenemos del régimen de giro es el siguiente, donde podemos observar cómo está limitado a 1200 rpm:



*Ilustración 51: Régimen de giro del motor eléctrico*

### 7.3. Consumo híbrido

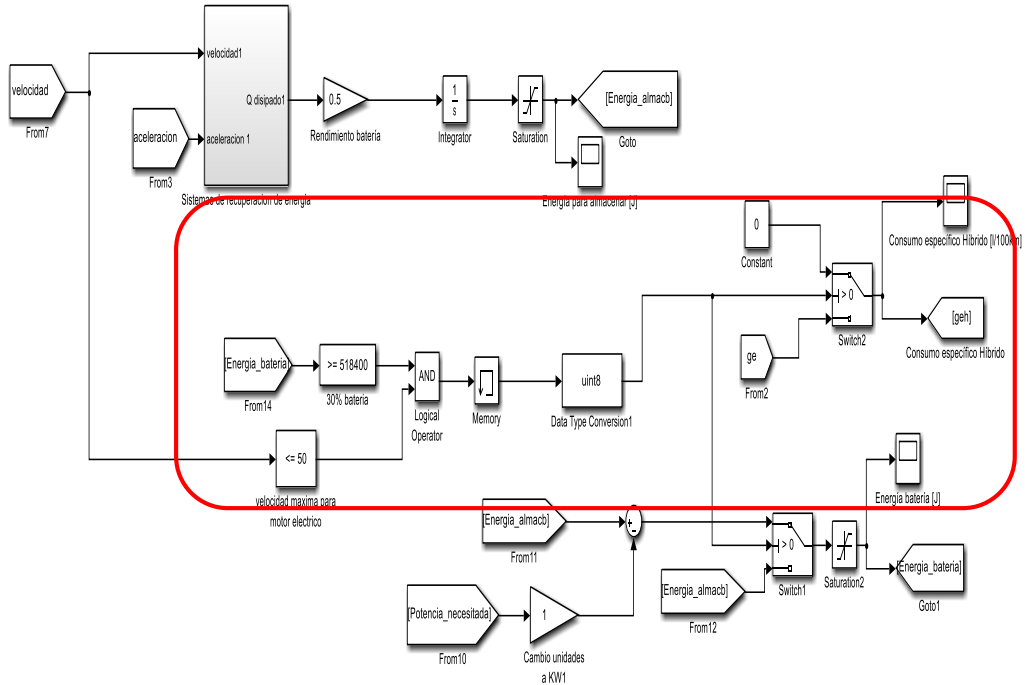


Ilustración 52: Sistema para obtener el Consumo específico del híbrido

Si la velocidad es menor o igual que 50 km/h y la energía almacenada en la batería es al menos del 30 % de su capacidad, entonces mediante el bloque “Switch” explicado anteriormente, el consumo específico será cero. Si no se cumple las dos o alguna de ellas, el consumo será el obtenido en el capítulo anterior (motor térmico).

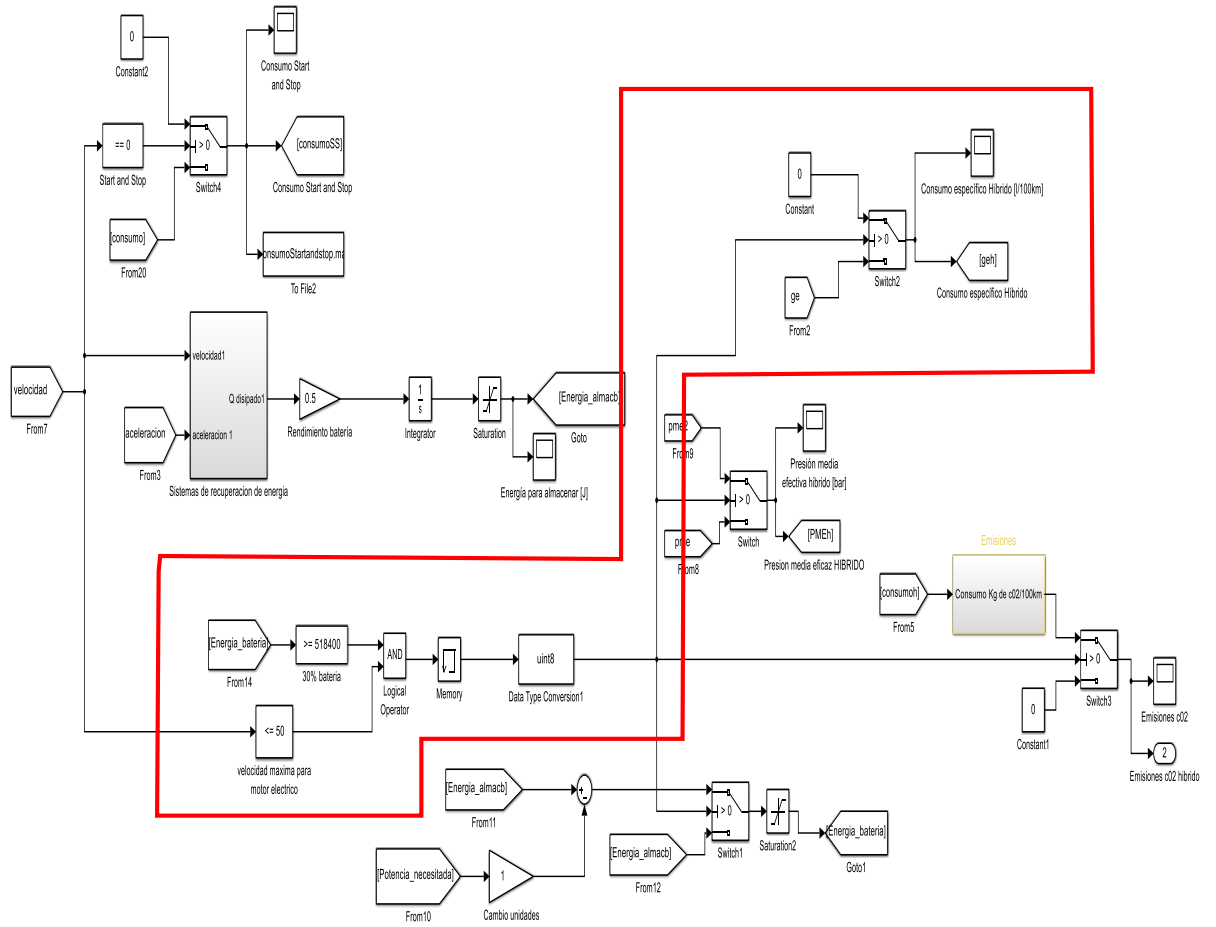


Ilustración 53: Consumo Híbrido

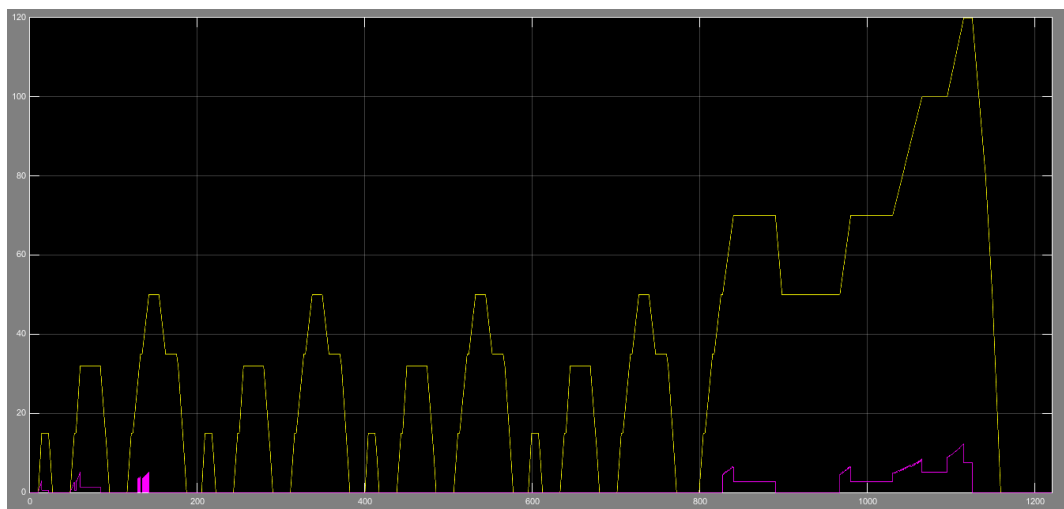


Ilustración 54: Consumo híbrido [l/h]





Esta imagen muestra cómo es la evolución del consumo a lo largo del ciclo de conducción en l/100km. Para poder evaluar el correcto funcionamiento de la simulación, es necesario calcular el consumo medio durante todo el ciclo de conducción. Para ello, se ha usado el siguiente bloque marcado con rojo en la imagen siguiente:

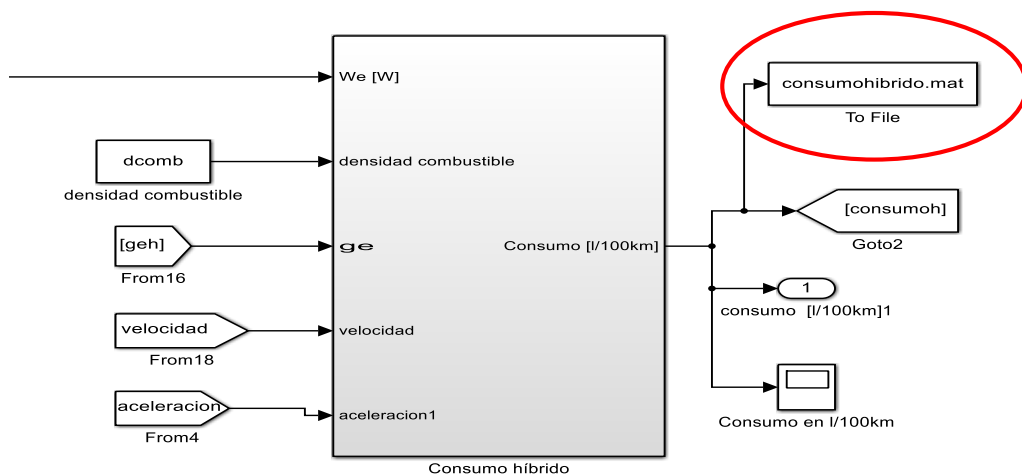


Ilustración 55: Cálculo del consumo medio de un vehículo híbrido

Este bloque “To file” manda los datos del consumo al “Workspace” de Matlab, donde posteriormente se hacen los cálculos para sacar el consumo medio.

#### 7.4. Emissiones de CO<sub>2</sub> de un híbrido

Para analizar las emisiones, ocurre la misma condición que con el consumo, es decir, si la velocidad es menor o igual que 50 km/h y la energía almacenada en la batería es al menos del 30 % de su capacidad, entonces mediante el bloque “Switch” explicado anteriormente, las emisiones de CO<sub>2</sub> serán cero. Si no se cumple las dos o alguna de ellas, las emisiones son las obtenidas en el capítulo anterior (motor térmico).

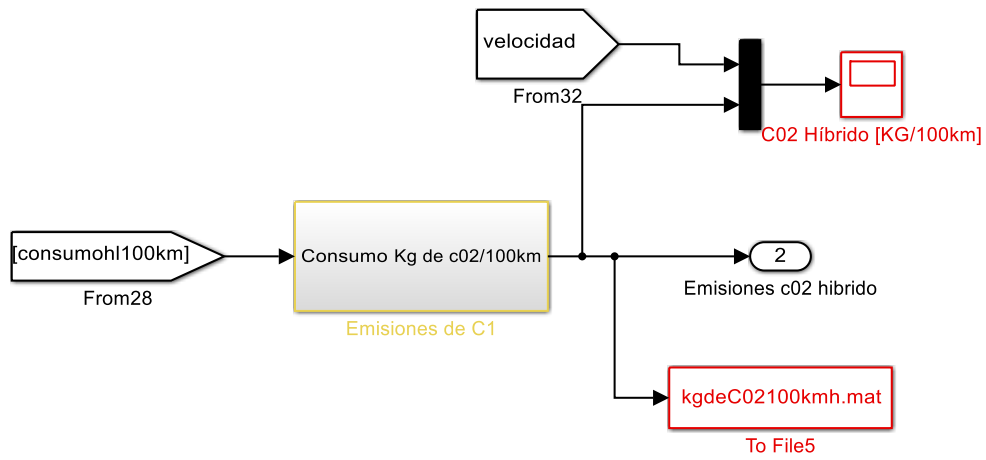


Ilustración 56: Emisiones CO2, híbrido.

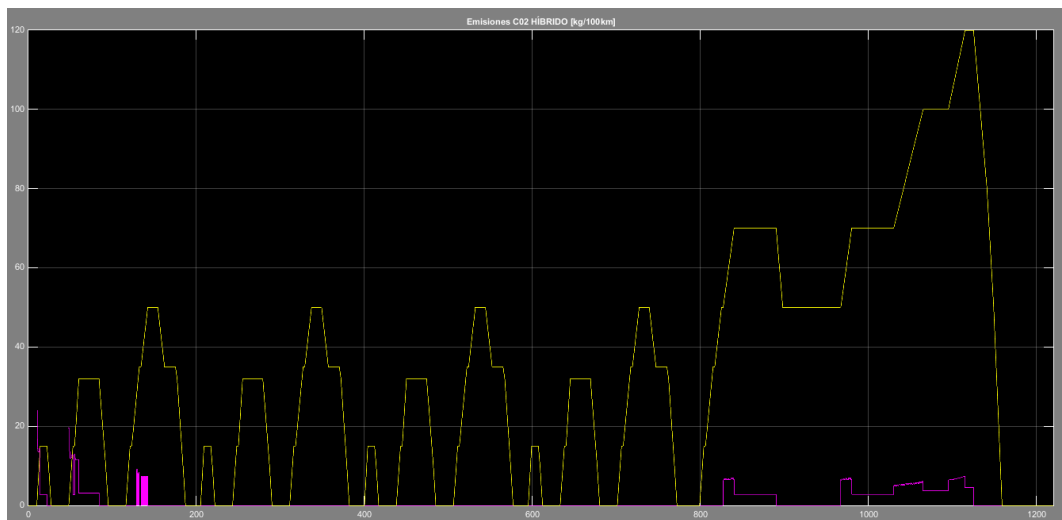


Ilustración 57: Emisiones CO2 [kg/100km] vs Velocidad [km/h]

En la imagen superior se muestran las emisiones de gases a la atmósfera y cómo varía la velocidad a lo largo del tiempo. Como se puede apreciar, las emisiones son nulas cuando la velocidad es menor de 50 km/h y siempre que las baterías estén cargadas hasta al menos el 30%. Cabe destacar que al comienzo, a pesar de ser la velocidad inferior a 50km/h existen emisiones. Esto es debido a que se parte de las baterías descargadas, por lo que el vehículo necesita producir una serie de frenadas para recargar las baterías, previamente a su uso.

## Capítulo 8

### Elaboración del simulador: Motor térmico con Start & Stop

En este capítulo se va a analizar un vehículo con sistema *Start&Stop*. Para ello, cuando la velocidad sea igual a cero, el consumo será nulo. Se ha empleado un bloque “*Switch*” mediante el cual el consumo es cero o el calculado para el motor térmico anteriormente, dependiendo del valor de la velocidad (entrada de control). Para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> es simplemente multiplicar el consumo por los 2.6 kg/l.

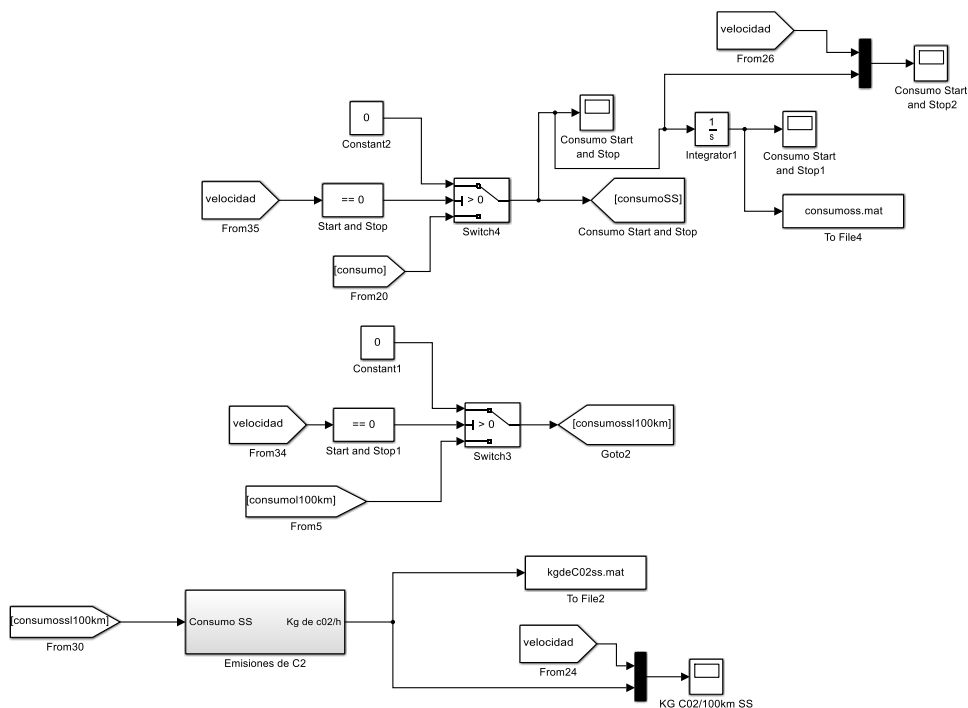


Ilustración 58: Vista general del sistema Start&Stop de Simulink

## 8.1. Consumo [l/h]

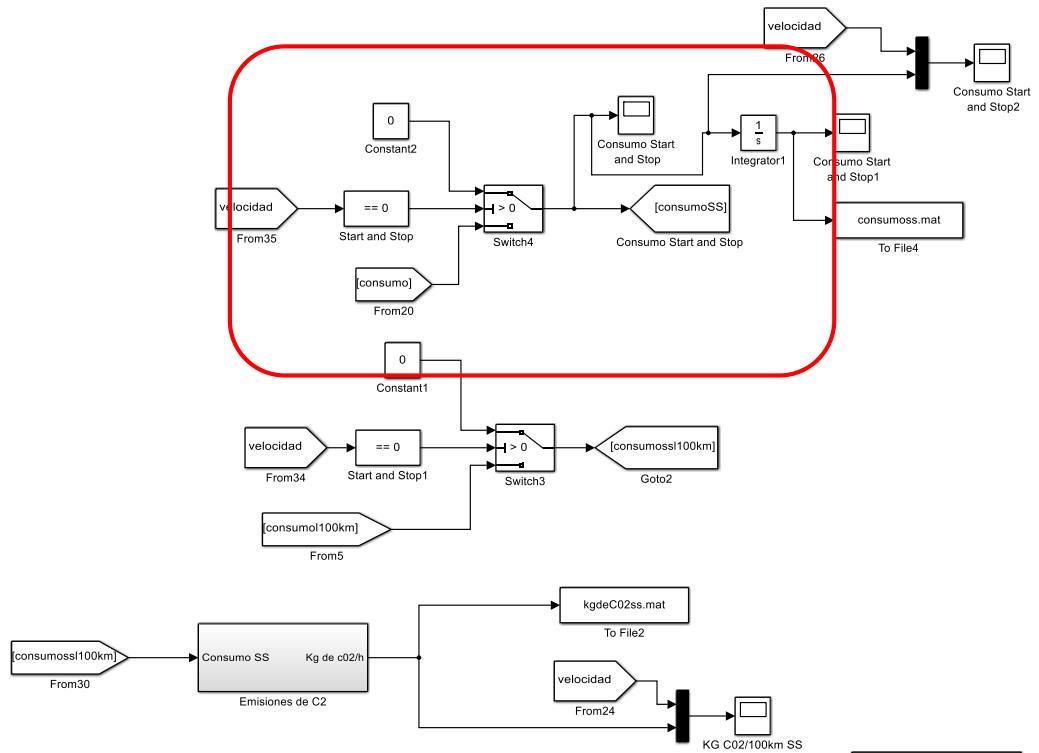


Ilustración 59: Consumo Start and Stop [l/h]

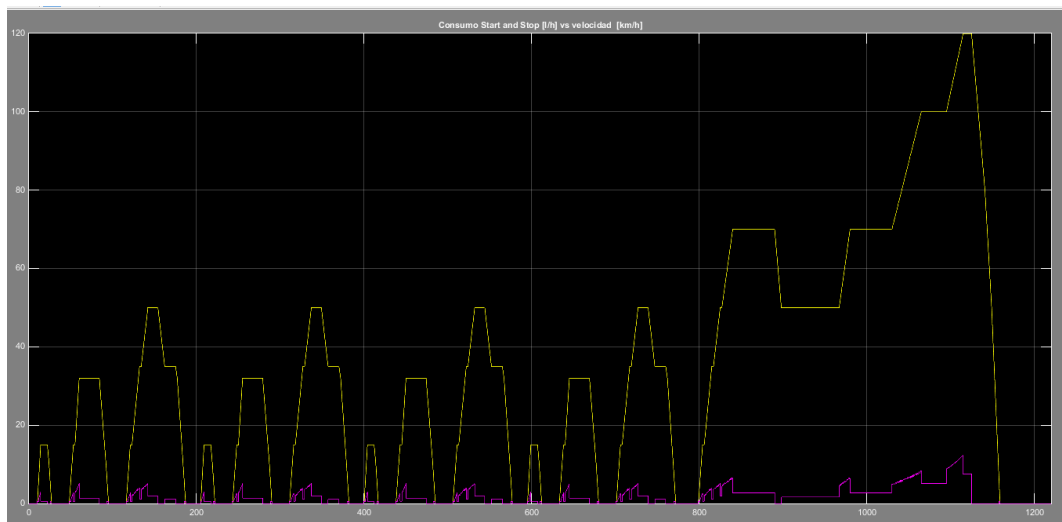


Ilustración 60: Consumo [l/h] vs velocidad [km/h] con sistema Start&Stop



Mediante la simulación del consumo con el sistema *Start&Stop* incorporado, se procede a analizar el consumo del vehículo medio con dicho sistema. Para ello, cuando el vehículo se encuentra parado (velocidad=0), el consumo será de 0 l/h. En el caso de que el vehículo esté en movimiento, será el motor térmico el que funcione con su respectivo consumo.

Si se realiza un zoom de la imagen anterior, se puede observar como efectivamente el consumo es 0 l/h en los momentos en los que el vehículo se encuentra parado:

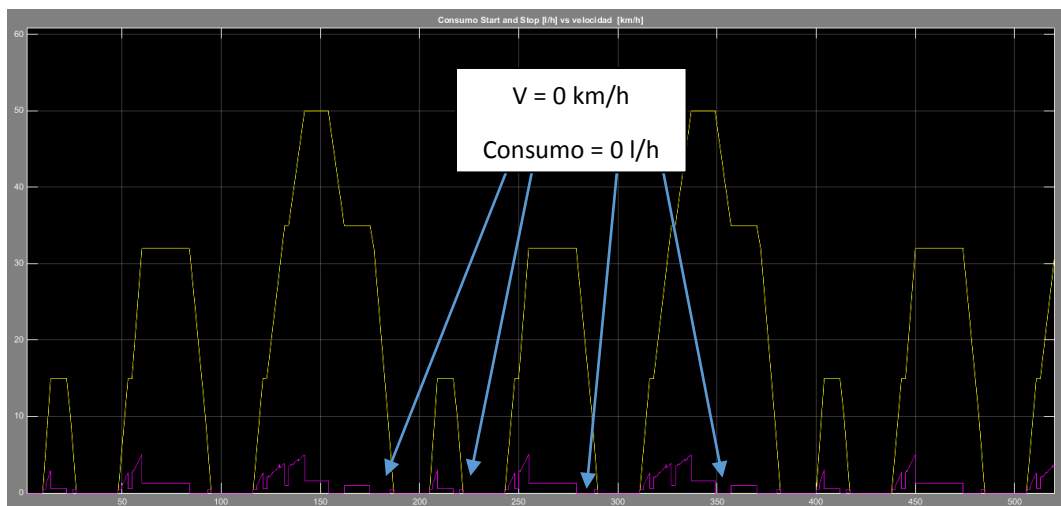


Ilustración 61: Zoom consumo [l/h] vs velocidad [km/h] con sistema *Start&Stop*

## 8.2. Emisiones de CO<sub>2</sub> [kg/100km]

En el caso de las emisiones de CO<sub>2</sub>, se procede al mismo razonamiento. Cuando el vehículo se encuentra parado, las emisiones de CO<sub>2</sub> son nulas ya que el motor se encuentra apagado. En el momento en el que el vehículo se encuentra en movimiento, las emisiones son las mismas que en la simulación del *Capítulo 6*, es decir, las del motor de combustión interna. Para conseguir esta lógica, se emplea un bloque explicado anteriormente denominado “*Switch*”, que tiene como salida una de las dos entradas según la condición, en este caso la velocidad igual a cero (entrada de control).

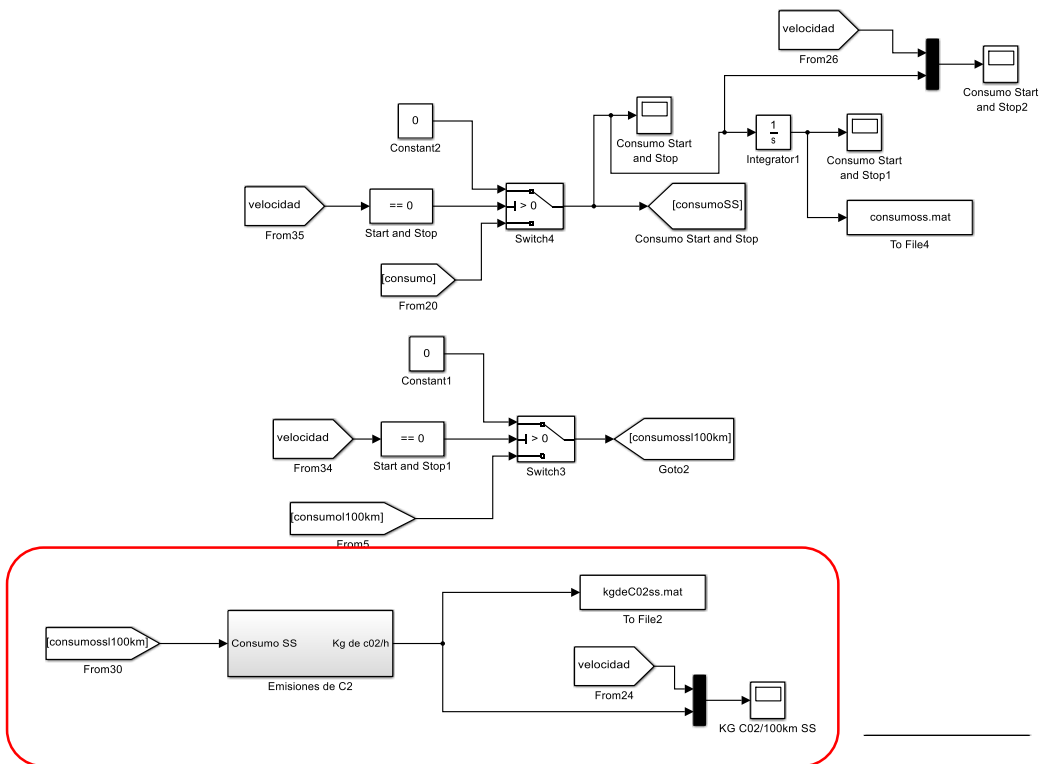


Ilustración 62: Emisiones de CO<sub>2</sub>, con sistema Start&Stop

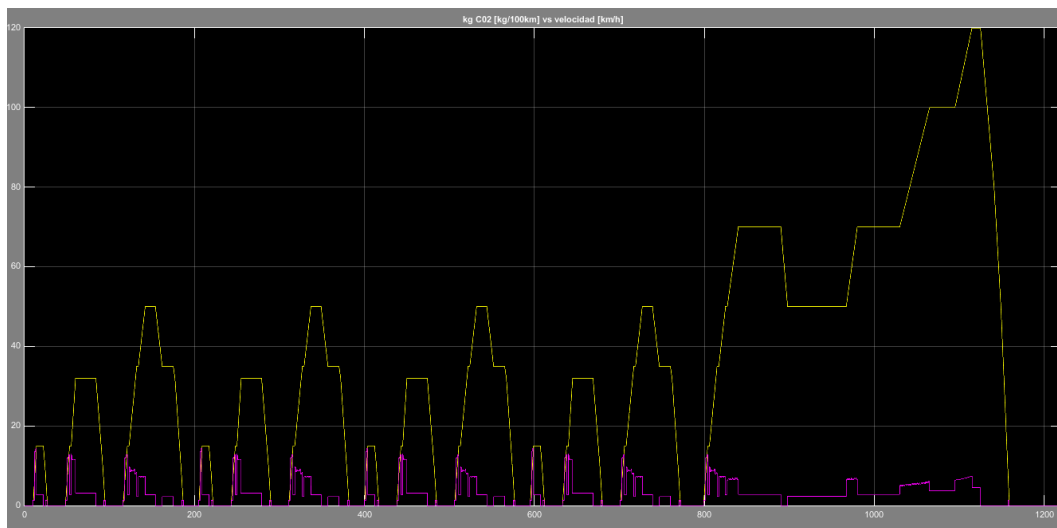


Ilustración 63: Emisiones CO<sub>2</sub> [kg/100km] vs Velocidad [km/h] con sistema Start&Stop



Un zoom del gráfico anterior donde se muestra que las emisiones son cero cuando la velocidad es cero es el siguiente:

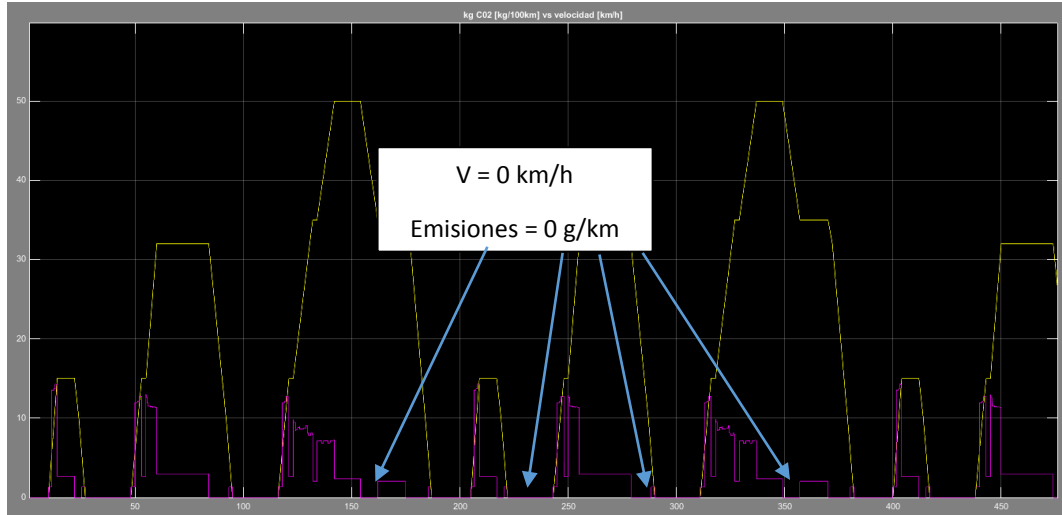


Ilustración 64: Zoom Emisiones CO2 [kg/100km] vs Velocidad [km/h] con sistema Start&Stop







## Capítulo 9

### Resultados

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos así como la conclusión sobre los objetivos establecidos. Se analizará para distintos vehículos el ahorro de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub> para un motor térmico, un híbrido y un vehículo con un sistema denominado Start&Stop. Para intentar que las condiciones sean lo más parecidas posibles, se ha comparado los consumos usando un mismo modelo de automóvil: un *Nissan Qashqai*.

En cuanto al consumo y las emisiones de CO<sub>2</sub>, nocivo para la atmósfera, los valores ofrecidos por el fabricante de acuerdo a la homologación según una serie de criterios específicos, no coinciden con los valores obtenidos en el simulador. No obstante son muy parecidos. Esto principalmente es debido a los distintos tipos de conducción de cada conductor y las condiciones de trazado: ascensos, descensos, giros...

Para poder realizar distintos ensayos, es necesario comprobar si los resultados obtenidos coinciden con los teóricos. Dichos valores teóricos son conocidos ya que son los valores ofrecidos por el fabricante en la documentación. Los datos que se ofrecen en la simulación son resultado de la combinación de un ciclo urbano y otro extraurbano.

El consumo medio obtenido ha sido de 5.15 l/100km frente a los 5 l/100km homologados por el fabricante. Por lo que se puede considerar el simulador muy fiable ya que el error es de un 3%. La pequeña variación se debe a las aproximaciones realizadas como el momento de inercia de los elementos rotativos del motor. No obstante, los consumos homologados por los fabricantes se establecen en condiciones favorables y sólo alcanzables en un laboratorio.

Uno de los aspectos prioritarios de la política europea es la mejora de la eficiencia energética. A raíz de ello, ha surgido la necesidad de reducir los consumos y las emisiones de CO<sub>2</sub> debido a su contribución al calentamiento global de la atmósfera. Europa en el Parlamento Europeo de 2009, llegó a un

acuerdo mediante el cual se comprometía a reducir las emisiones de los vehículos ligeros a un límite de 130 g/km desde 2012 a 2015.

Como solución a esta reducción, los fabricantes de vehículos han incorporado mejoras tecnológicas como son la reducción del tamaño de motor, reducción de peso, neumáticos de baja resistencia a la rodadura, mejoras aerodinámicas, recuperación de energía, etc. Todas ellas, encaminadas a la reducción del consumo y emisiones.

### 9.1. Consumo de un vehículo con motor térmico, híbrido y con sistema Start&Stop

La tabla siguiente recoge los resultados obtenidos en los distintos ensayos. En el caso del vehículo híbrido (motor de combustión interna y motor eléctrico) se le ha tenido en cuenta en el programa de *Simulink* la adición de masa del motor eléctrico y de la batería.

	<b>TÉRMICO</b>	<b>START&amp;STOP</b>	<b>HÍBRIDO</b>
<b>Consumo [l/100km]</b>	5.15	4.723	2.965
<b>Ahorro consumo [%]</b>	0	8.29	42.43

Tabla 5: Resumen de resultados de consumo

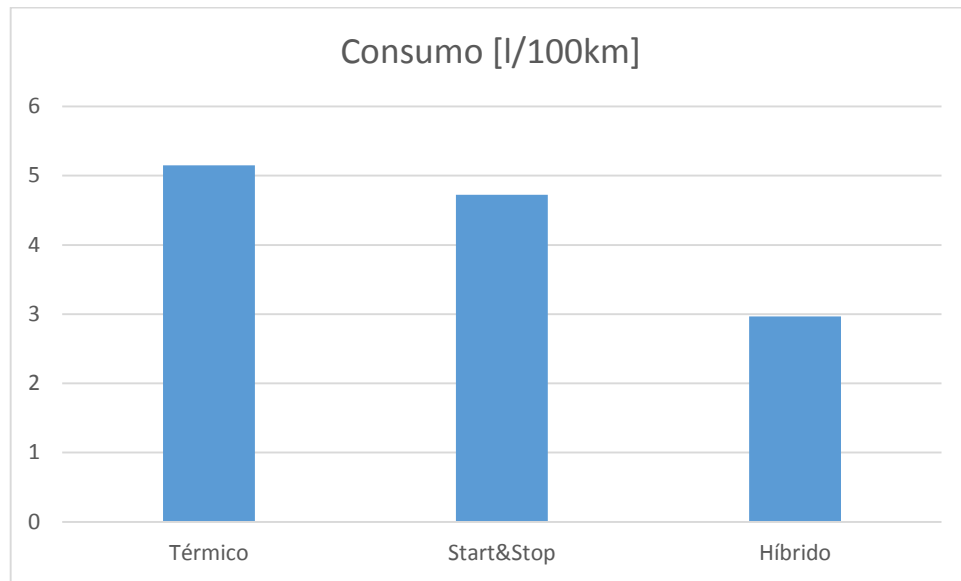


Ilustración 65: Gráfico de consumos con distintos sistemas

Como se puede observar en la tabla y gráfico superior, el sistema con mayor tasa de mejora es el híbrido, con un consumo del 42.43 % menor. No obstante, el sistema *Start&Stop* también ofrece una tasa de mejora en el consumo (8.29%). Este sistema ha sido implantado en numerosos vehículos debido al ahorro que supone, pero también debido a su bajo coste y simple implementación. Por esto, es por lo que su expansión en el mercado ha sido tan numerosa y rápida.

## 9.2. Emisiones de CO<sub>2</sub> de un vehículo con motor térmico, híbrido y con sistema Start&Stop

	<b>TÉRMICO</b>	<b>START&amp;STOP</b>	<b>HÍBRIDO</b>
<b>Emisiones [g/km]</b>	126.11	115.61	72.57
<b>Ahorro emisiones [%]</b>	0	8.33	42.46

Tabla 6: Resultado de emisiones de CO<sub>2</sub> para distintos sistemas

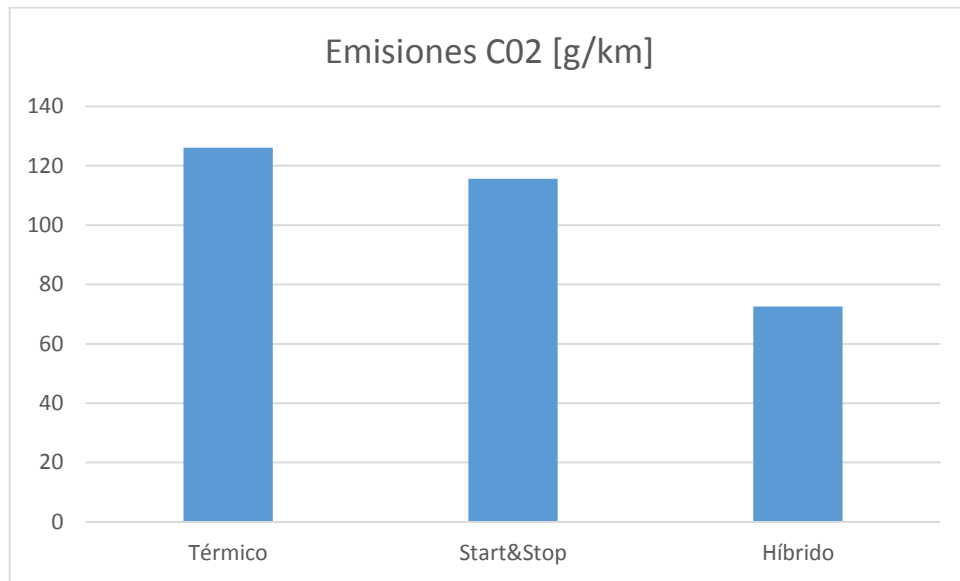


Ilustración 66: Gráfico de emisiones para distintos sistemas

Como se ha visto en capítulos anteriores, las emisiones están directamente relacionadas con el consumo de combustible del vehículo. Por ello, se puede observar como el sistema híbrido es el que menores emisiones a la atmósfera libera. La reducción de un sistema de recuperación de energía mediante frenos regenerativos supone una reducción del 42.46% de las emisiones, mientras que incluir un *Start&Stop* de 8.33%.

### 9.3 Consumo y emisiones de CO<sub>2</sub> para distintos vehículos

La simulación empleada en este proyecto, también ha sido usada para la evaluación de otros vehículos tales como *el Nissan Juke, Renault Clio y Renault Megane*. Como se dijo en capítulos anteriores, los diagramas de isoconsumos son curvas que los fabricantes de vehículos protegen muy bien de la competencia y difíciles de encontrar. Para la simulación del *Nissan Qashqai*, se ha empleado las curvas de un *Renault 1.5 DCI* que equipa también otros vehículos tales como los mencionados anteriormente.



	TÉRMICO		START&STOP		KERS (HÍBRIDO)	
	Consumo	Emisiones	Consumo	Emisiones	Consumo	Emisiones
<b>Nissan Qashqai</b>	5.15	126.11	4.72	115.61	2.97	72.57
Ahorro %	0	0	8.35	8.33	42.33	42.45
<b>Nissan Juke</b>	4.90	120	4.47	109.50	2.47	60.50
Ahorro %	0	0	8.78	8.75	49.59	49.58
<b>Renault Clio</b>	3.958	96.87	3.53	86.38	2.19	53.50
Ahorro %	0	0	10.81	10.83	44.67	44.77
<b>Renault Megane</b>	4.63	113.52	4.21	103.03	2.64	64.69
Ahorro %	0	0	9.07	9.24	42.98	43.01

Tabla 7: Tabla comparativa de consumos y emisiones de CO<sub>2</sub> para distintos vehículos

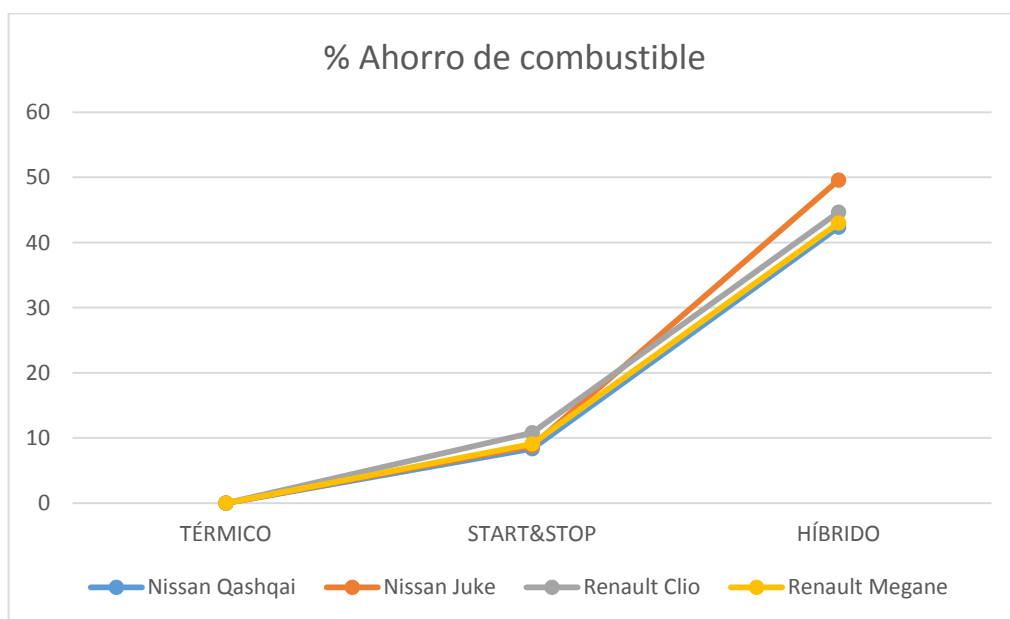


Ilustración 67: Ahorro combustible con sistema de recuperación de energía en distintos vehículos

El mayor ahorro de combustible se da para el *Nissan Juke* y para el vehículo para el que menos se nota la adición del sistema de recuperación es para el *Nissan Qashqai*. En el caso del sistema *Start&Stop* ocurre lo mismo, la mayor disminución de emisiones se da para el *Nissan Juke* y la menor para el *Nissan Qashqai*.

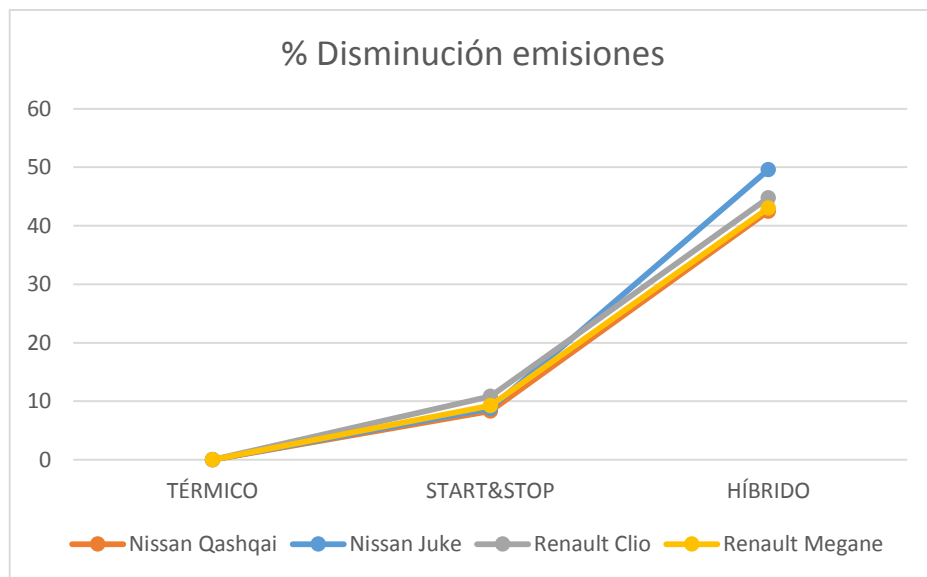


Ilustración 68: Disminución de emisiones de CO<sub>2</sub> para distintos vehículos.

#### 9.4 Reducción de peso del sistema de recuperación de energía al 25% y 50%

En la siguiente simulación, se ha procedido a variar el peso del sistema de recuperación de energía mediante materiales de menor peso tanto en las baterías como en el motor eléctrico. Los resultados han sido los siguientes:



Reducción de peso			
	0%	25%	50%
<b>Consumo [l/100km]</b>	2.965	2.875	2.8063
<b>Ahorro consumo</b>	42.43 %	44.18 %	45.51 %
<b>Emisiones [g/km]</b>	72.57	70.37	68.69
<b>Reducción emisiones</b>	42.46 %	44.2 %	45.54 %

Tabla 8: Comparación de consumo y emisiones mediante una reducción de peso

Como se puede observar en la tabla, con una reducción de peso del sistema de recuperación de energía, se reduce tanto el consumo como las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Reduciendo a la mitad el peso del sistema recuperador de energía conseguimos ahorrar casi la mitad de combustible que con un motor térmico a la vez que disminuir también cerca de la mitad las emisiones de CO<sub>2</sub>.

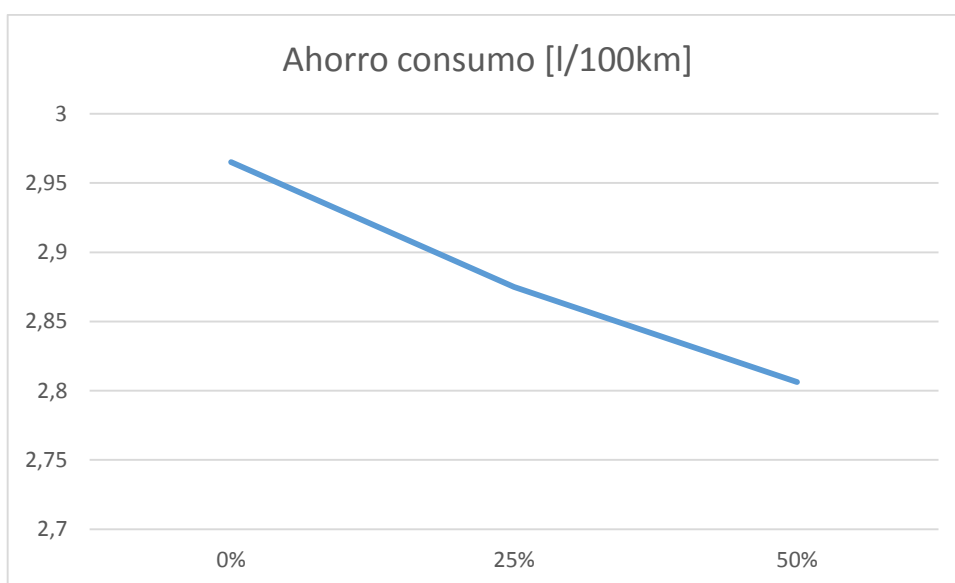


Ilustración 69: Consumos con distintas reducciones de peso del sistema recuperador de energía

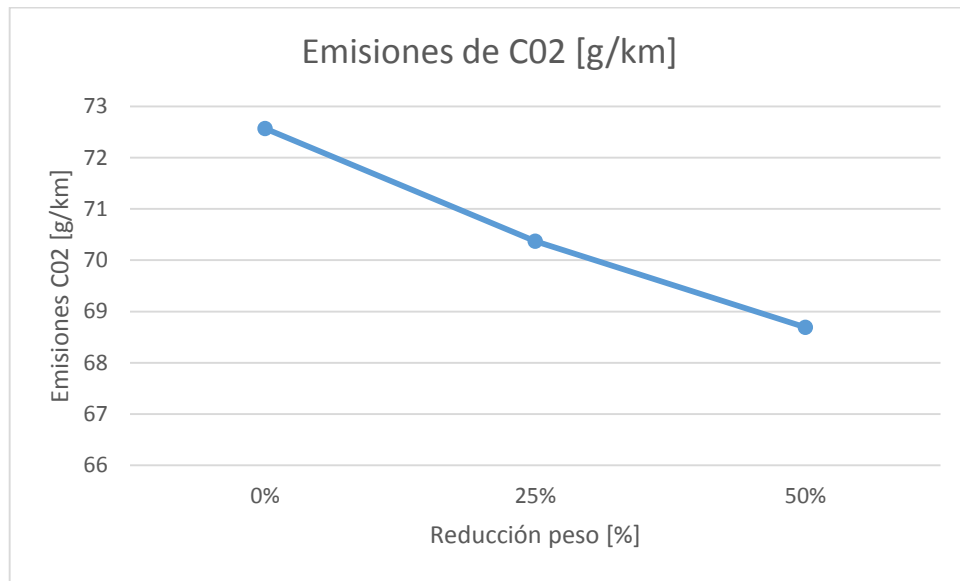


Ilustración 70: Emisiones con distintas reducciones de peso del sistema de recuperador de energía

## 9.5. Balance económico

Para poder comparar el ahorro que supone incluir los sistemas descritos anteriormente (frenos regenerativos y sistema *Start&Stop*) se procede a realizar un balance económico de cada uno. Se ha empleado el precio del combustible diésel ofrecido por la empresa Repsol en Madrid que es de 1.176 €/l el 9 de marzo de 2015. La simulación realizada en este proyecto consta de 20 minutos por lo que el coste del combustible en ese periodo de tiempo viene reflejado en la siguiente tabla:

	CONSUMO [L/100KM]	€/L	DISTANCIA RECORRIDA [KM]	€
<b>TÉRMICO</b>	5,15	1,176	11.007	0.66
<b>START&amp;STOP</b>	4,72	1,176	11.007	0.61
<b>HÍBRIDO</b>	2,97	1,176	11.007	0.38

Tabla 9: Coste de combustible durante 20 min





Como se puede observar en la tabla, el ahorro de combustible es muy significativo en el caso del sistema híbrido. El consumo de éste es de un 42.43 % inferior, casi la mitad, a si sólo se empleara un combustible térmico. En cuanto al sistema *Start&Stop*, la reducción del precio del combustible es de 7.58%.

Para la simulación, se ha considerado la adición de peso de 249.20 kg al vehículo en el caso de tratarse de un vehículo híbrido que recupera la energía disipada en la frenada. Este peso adicional es el formado por la batería y el motor eléctrico.

En cuanto al balance económico que supone incluir el sistema de recuperación de energía, el presupuesto de incluir el motor eléctrico, la batería y unidad de control viene reflejado en la tabla inferior, teniendo en cuenta los costes por investigación y creación del simulador por unidad:

<b>SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA</b>		
<b>Tipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>
Motor eléctrico	1	1828.16 €
Batería	1	71.29 €
<b>Coste de añadir este sistema</b>	<b>1899.45 €</b>	
Coste investigación y simulación [€/unidad]	7.8457 €* 1907.2957 €	
Coste antes de margen e impuestos	1907.2957 €	
Margen (10%)	190.73 €	
IVA (21%)	400.532 €	
<b>Coste total después de impuestos</b>	<b>2498.56 €</b>	

Tabla 10: Coste sistema de recuperación de energía

\*El valor obtenido ha sido obtenido en el Capítulo 12 y dividido entre en número de unidades previstas de vender, que son 1000 unidades. No obstante, si después de realizar un estudio de mercado la cantidad de unidades fuera mayor, el coste de investigación disminuiría, por lo que el coste global disminuye a su vez.





## Capítulo 10

### Conclusiones

En este capítulo se obtendrán conclusiones sobre los distintos sistemas expuestos en este proyecto de cara a la evaluación de la eficiencia, costes y emisiones de CO<sub>2</sub>. En cuanto a la eficiencia, se considera que ésta es la relación entre la energía útil, o energía obtenida y la energía consumida. Por lo tanto, un vehículo es más eficiente cuanto menos energía consume para realizar el mismo trabajo. Por ello, se ha analizado en este proyecto los consumos para un vehículo (*Nissan Qashqai*) con motor térmico, un vehículo con sistemas de recuperación de energía de la frenada (híbrido) y finalmente implementando un sistema denominado *Start&Stop*. Para la evaluación de esta eficiencia y tras los resultados arrojados por los modelos matemáticos y simulaciones, se han arrojado las siguientes conclusiones.

Como se dijo en la introducción de este proyecto, el consumo es una de las características más consideradas por los conductores cuando compran un automóvil. Se trata de uno de los campos en los que más trabajan los fabricantes de coches, razón por la cual, los consumos han ido descendiendo de forma vertiginosa en los últimos años.

## 10.1 Consumo según el trazado de la carretera

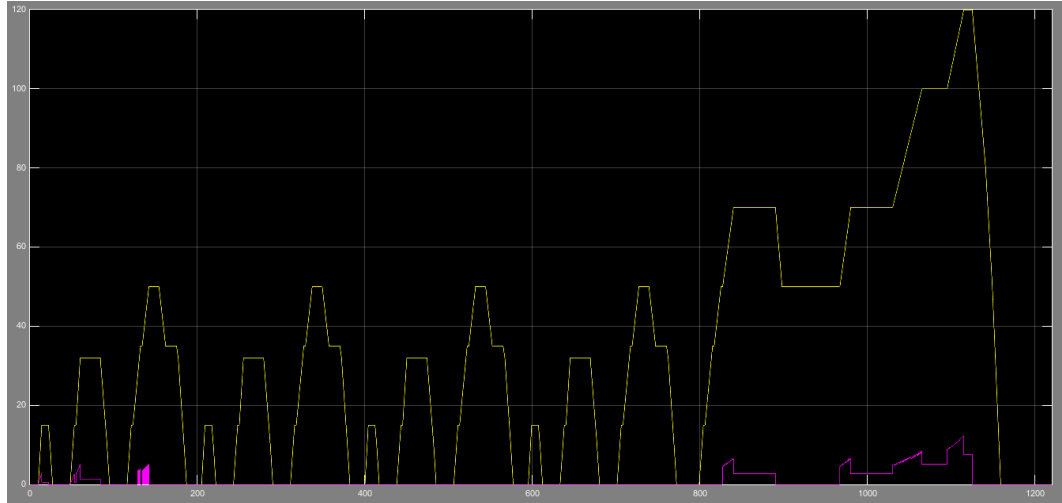


Ilustración 71: Consumo híbrido [l/h] vs la velocidad [km/h]

Tras la simulación, se ha observado que dónde más ahorro se produce es en zona urbana y el menor ahorro se produce en etapas de alta velocidad, como es el caso de las autopistas. Esto es debido a que las baterías se descargan antes de poder volver a ser cargadas otra vez (30% de carga mínima de la batería). Además, a esto se le añade la restricción que se impuso mediante la cual el motor eléctrico sólo podía funcionar cuando la velocidad fuera menor de 50 km/h. En el momento en el que las baterías se descargan, se reactiva el motor térmico. De la imagen superior, se puede concluir que los vehículos híbridos son capaces de aprovechar mejor el combustible que en un modelo convencional, ya que utiliza la energía eléctrica que se perdería en rozamientos o calor.

## 10.2 Conclusiones sobre la mejora del consumo

La introducción del sistema KERS en los vehículos de calle y el sistema *Start&Stop* han influido de manera significativa en el consumo del vehículo.

Como se puede apreciar en el gráfico 60, los resultados de la implementación de estos sistemas producen un ahorro de combustible en torno al 42.43% en el caso de usar un sistema con frenos regenerativos y de 8.29% en el caso de usar



un sistema *Start&Stop*, lo cual supone un resultado muy convincente que respalda los objetivos de este proyecto: todos los vehículos de calle deberían de incorporar un KERS, o al menos un sistema *Start&Stop*.

No obstante, tras analizar el coste económico que supone la implementación de un KERS, de valor elevado, lo ideal sería implementar este sistema en vehículos de nuevo diseño, donde los costes se imputen como costes de desarrollo tecnológico de un nuevo modelo. No obstante, también es posible transformar un coche mediante la adición de estas baterías y motor eléctrico.

### 10.3 Conclusiones sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>

En cuanto a las emisiones, se puede apreciar una ventaja destacable de emplear conjuntamente un motor eléctrico y un motor de combustión interna. Principalmente porque se reducen las emisiones casi a la mitad, ya que el motor eléctrico no emite CO<sub>2</sub>, gas nocivo para la atmósfera.

La disminución de emisiones a la atmosfera también se refleja en un abaratamiento del impuesto de matriculación, que se encuentra expuesto tanto al tipo de vehículos como a las emisiones de CO<sub>2</sub> que este genere. La ley de Calidad del Aire, encargada de determinar el valor del impuesto aplica un porcentaje sobre el precio de venta del vehículo:

- Vehículos con emisiones menores o iguales a 120 g/km de CO<sub>2</sub>:  
0%
- Vehículos con emisiones entre 120 g/km y 160 g/km de CO<sub>2</sub>:  
4.75%

Por lo tanto, se concluye tras las simulaciones realizadas en *Simulink*, que el sistema de recuperación de energía mediante frenos regenerativos y el *Start&Stop* demuestran una eficacia energética y medio ambiental.

## 10.4 Conclusiones sobre el KERS y Sistema Start&Stop en distintos vehículos

En este apartado se obtienen conclusiones sobre cómo afectan estos dos sistemas al consumo y emisiones de CO<sub>2</sub> del vehículo. Para comenzar, tras analizar los gráficos, es más que evidente el beneficio de incluir cualquiera de estos dos sistemas en un vehículo convencional.

Si se analizan las ventajas y desventajas de añadir un sistema de recuperación de energía como el KERS con unas baterías, obtendríamos lo siguiente:

- DESVENTAJAS
  - Precio elevado de adquisición
  - Mayor peso que en un vehículo convencional, por lo tanto mayor potencia para poder desplazarse
  - Toxicidad de las baterías
  - La vida útil de las baterías es inferior a la del vehículo
  
- VENTAJAS
  - Eficiencia mayor con su disminución consiguiente del consumo
  - Reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>
  - Producen menos ruido cuando usan la energía de las baterías
  - Menor consumo debido a los frenos regenerativos
  - Mayor autonomía que un motor eléctrico
  - Descuentos en el seguro debido a un grado de siniestralidad menor

Tras este análisis, pesan más las ventajas que las desventajas. Los sistemas híbridos son más económicos de mantener, ya que si los comparamos a los vehículos de motor de combustión interna prescinden de algunos elementos tales como el motor de arranque, correa de distribución, alternador... Además, los sistemas de frenos regenerativos conllevan un desgaste menor de los discos o pastillas de freno. Por ello, todos los vehículos deberían de emplear un sistema de recuperación de energía como el analizado en este proyecto (KERS). Desde el punto de vista económico y medioambiental, el ahorro es sustancial.



## 10.5 Conclusiones sobre el coste económico

Tras obtener el coste económico que supone la implantación de un sistema de recuperación de energía en un vehículos convencional, se da por evidente el beneficio que supone a estos vehículos incluir este sistema. El coste por unidad es de 2498.56 €. A pesar de su elevado precio, compensa incluir un motor eléctrico.

Si se asume que el coche recorre por ejemplo 20 000 km en un año, valor que por lo general usan las garantías, el consumo del combustible es de 1.176 €/l:

- Motor térmico:  $20\ 000\ [\text{km}] \cdot 1.176\ [\text{€/l}] \cdot 5.15\ [\text{l}/100\text{km}] / 100 =$   
**1211.28 €**
- Motor térmico + motor eléctrico:  $20\ 000\ [\text{km}] \cdot 1.176\ [\text{€/l}] \cdot 2.97$   
 $[\text{l}/100\text{km}] / 100 =$  **698.54 €**

El ahorro al año es de  $1211.28\ € - 698.54\ € =$  **512,74€**

Por lo tanto, como el coste estimado ha sido de 2498,56 €/unidad, en 4 años aproximadamente, se habría amortizado el incremento de costes y a partir de entonces comenzar a ahorrar combustible.

Por lo tanto, si el conductor realiza muchos km al año es conveniente incluir este sistema en su vehículo, puesto que el sistema quedará amortizado antes de los 4 años.

## 10.6 Cumplimiento de los objetivos

Mediante todas las conclusiones obtenidas anteriormente, se da por finalizado este proyecto habiéndose cumplido los objetivos fijados en el mismo de manera satisfactoria. Se ha elaborado un simulador que posee la exactitud que se estableció en los objetivos y que sirve como herramienta para las conclusiones obtenidas.

Para finalizar, la mejora y perfeccionamiento del simulador se deja para futuras ampliaciones de mejora de este proyecto y futuros avances técnicos.





# Capítulo 11

## Futuros desarrollos

En este capítulo se expone las líneas de desarrollo futuras que se podrían llevar a cabo para la mejora de este proyecto. Existen dos líneas principales que podrían desarrollarse. Por una parte, el empleo de la simulación realizada en *Simulink* para analizar el vehículo con objetivos distintos a los usados en este proyecto o bien, desarrollar este simulador para mejorar el rendimiento de este y asemejarlo lo más real posible para extender el uso de vehículos con sistemas de recuperación de energía en vehículos de calle.

### 11.1 Desarrollo del *Software* con otras aplicaciones

Para comenzar, las mejoras que se establecen en este apartado, parten siempre de la base del simulador realizado aquí, ya que este tiene sus datos de partida del estado dinámico del vehículo. La razón principal del empleo de un *Software* para la evaluación de eficiencia y emisiones de gases a la atmósfera es observar y analizar el comportamiento de un vehículo de manera matemática, objetiva y rápida en lugar de la determinación empírica de estos en bancos de ensayo, de mayor coste que los primeros.

Una de las mejoras principales y básicas para el estudio exhaustivo que se puede realizar en el simulador es el incremento de la precisión. En esta simulación se han utilizado aproximaciones y redondeos puesto que muchos valores del vehículo suelen no estar disponibles, ya que el fabricante los protege. Un ejemplo claro sería la ampliación de los datos de la matriz de isoconsumos. A pesar de que el simulador pueda obtener un resultado óptimo mediante un algoritmo partiendo de esta matriz, el desarrollo de esta matriz para mayores valores de entrada y salida supondría una gran mejora en la precisión. Por lo tanto, este simulador podría ser usado por los propios fabricantes para poder evaluar la implantación de los sistemas de recuperación de energía sobre toda su flota de vehículos.

Para continuar, para una mayor precisión del vehículo también se podrían incluir mejoras que se han realizado sobre el vehículo en los últimos años. El consumo de combustible se ha convertido en el principal objetivo de todos los fabricantes de automóviles, por lo que la evolución técnica ha sido enorme. Un ejemplo claro sería el empleado en este proyecto, un sistema de recuperación de energía en la frenada o un sistema *Start&Stop*, aunque también existen otras para reducir el consumo como podrían ser las citadas a continuación.

Existen dos tipos de mejoras, físicas como son la mejora de la aerodinámica, neumáticos de baja resistencia a la rodadura, ahorro de peso, etc y por otra parte, una mejora en la gestión térmica como son las mejoras en los cambios automáticos, reducción de cilindrada o la sobrealimentación.

Además los vehículos cada vez emplean más electrónica, por lo que el consumo eléctrico está aumentando de manera clara y el desarrollo de baterías es más que necesario. Todos estos cambios, no están incluidos en el simulador por lo que el fabricante podría incluirlos y ver cómo afecta al consumo mediante el empleo del simulador ya existente de base.

El simulador existente incluye tanto el análisis de un motor térmico, como el análisis de uno eléctrico por lo que se pueden realizar variedad de ensayos y cambios y observar cuál es más eficiente en cada punto.

La simulación muestra un motor de combustión interna que es sustituido por uno eléctrico en puntos previamente estipulados. Se podría analizar la eficiencia variando las dos entradas para que el motor eléctrico comience a usarse como son que el motor eléctrico sólo puede funcionar cuando la velocidad sea menor de 50 km/h y las baterías estén al menos al 30%. Se pueden analizar otros híbridos variando la simulación como son los híbridos en serie, donde un motor de combustión interna gira un generador eléctrico que carga las baterías. Estas baterías a su vez alimentarían un motor eléctrico que gira las ruedas.

Para continuar, también se podría desarrollar mediante este simulador los vehículos eléctricos puros y compararlo con el mismo vehículo pero con motor de combustión interna y de esta manera obtener comparaciones sobre la eficiencia de estos dos y posteriormente realizar y comparar los presupuestos de ambos.



Finalmente, mediante el simulador es posible también variar los modos de conducción del conductor y variar los ciclos de conducción. En el caso del simulador de este proyecto, se ha empleado un ciclo NEDC pero podría cambiarse a otro. Uno de los cambios posibles podría ser la reducción del número de repeticiones del mismo ciclo en zona urbana y aumentar el ciclo interurbano y autopista mediante un pequeño cambio.

## 11.2 Ampliaciones sobre los sistemas de recuperación de energía

En este proyecto se ha hecho especial hincapié en los vehículos híbridos que obtienen la energía a partir de la recuperación de esta en las frenadas. De esta manera, las emisiones y consumo descienden a la vez que se mantiene un buen rendimiento del vehículo. No obstante, existen investigaciones orientadas a las siguientes mejoras para la mayor eficiencia del vehículo y una de las cosas más importantes para los usuarios, el precio.

Los vehículos híbridos pesan más que los convencionales, ya que además de un motor de combustión interna, incluyen un motor eléctrico y las baterías. Por lo que es más eficiente en el uso de la energía, pero gasta más por el peso extra de estos últimos. Una de las principales líneas de investigación debería de ser esta, el desarrollo de baterías y motores eléctricos de menor peso.

En cuanto a las baterías, estos vehículos híbridos usan unas baterías tóxicas. Esto parece ser contradictorio, puesto que se trata de un vehículo ecológico, pero las baterías contaminan. De esta manera también, investigación en nuevos materiales necesita ser realizada de manera que se mantenga o se supere la capacidad de almacenamiento disminuyendo la toxicidad de las baterías.





## Capítulo 12

### Estudio económico

Este capítulo realiza un presupuesto del simulador en base a las horas dedicadas a este proyecto. Para ello, se presentan todas las tareas llevadas a cabo, así como las horas empleadas en cada una.

#### 12.1 Tareas previas al proyecto

La siguiente tabla recoge las tareas y horas dedicadas previamente al desarrollo del proyecto como son la recopilación de información previa, su lectura y planificación del trabajo:

Tareas		Horas dedicadas
<b>Recopilación de información</b>	Comportamiento de los motores de combustión interna	3
	Comportamiento de los vehículos híbridos	3
	Sistemas de recuperación de energía	5
	Manual de MATLAB Y Simulink	5
<b>Lectura de la información</b>	Lectura comportamiento de los motores de combustión interna	5
	Lectura comportamiento de los vehículos híbridos	5
	Lectura sistemas de recuperación de energía	13
	Lectura manual de MATLAB Y Simulink	4
<b>Elaboración de Anexo A y Plan de trabajo</b>		8
<b>Total de horas</b>		<b>51</b>

Tabla 11: Reparto horas correspondientes a las tareas previas al proyecto

## 12.2 Elaboración del Simulador mediante Simulink

El siguiente apartado recoge las horas dedicadas a la creación del simulador y a su posterior calibración:

<b>Tareas</b>		<b>Horas dedicadas</b>
<b>Elaboración de la simulación</b>	Elección del vehículo	2
	Recopilación de datos del vehículo	4
	Recopilación de datos para baterías y motor eléctrico	5
	Recopilación de datos para la simulación	3
	Elaboración de la simulación	190
	Corrección de errores	20
<b>Calibración de la simulación</b>	Corrección de errores	30
	Comprobación de funcionamiento	20
<b>Total de horas</b>		<b>274</b>

*Tabla 12: Reparto horas correspondientes a las tareas para la elaboración del simulador*

Como se puede observar en la tabla, la mayor carga de horas deriva de la “Elaboración de la simulación” ya que en muchas ocasiones se trabaja mediante prueba y error, dando por inválido lo realizado anteriormente, lo cual implica muchas horas de trabajo.



### 12.3 Simulación, análisis de resultados y conclusiones

En este apartado se recoge las horas dedicadas a la simulación, el análisis de los resultados mediante comparaciones a través de gráficos y porcentajes y finalmente la obtención de conclusiones y elaboración del documento.

<b>Tareas</b>		<b>Horas dedicadas</b>
<b>Simulaciones realizadas</b>	Simulaciones productivas	15
	Simulaciones desechadas	5
<b>Recopilación de resultados</b>		10
<b>Análisis de resultados</b>		8
<b>Elaboración de la memoria</b>		50
<b>Total de horas</b>		<b>88</b>

*Tabla 13: Reparto de horas correspondiente a la simulación, recopilación de resultados y conclusiones*

### 12.4 Resumen y presupuesto

En este apartado se recoge un resumen de horas de las tablas de los apartados anteriores. Se incluye la retribución asignada para cada hora de trabajo, gastos acometidos para la elaboración, el margen de ganancia y finalmente se han tenido en cuenta los impuestos.

Para la realización de este presupuesto final, se ha realizado la tabla mostrada en la siguiente página.

<b>Tareas</b>	<b>Horas dedicadas</b>	<b>Importe</b>
<b>Tareas previas al proyecto</b>	51	
<b>Elaboración del simulador</b>	274	
<b>Simulación, Análisis de resultados y Conclusiones</b>	88	
<b>Total de horas</b>	413	
<b>Retribución asignada</b>		15 €/h
<b>Coste de elaboración</b>		6195 €
<b>Gastos acometidos en la elaboración</b>		40 €
<b>Margen (5%)</b>		309.75 €
<b>IVA (21%)</b>		1300.95 €
<b>Coste total</b>		<b>7845.7 €</b>

*Tabla 14: Presupuesto en función de horas de trabajo y retribución asignada*





## **Bibliografía**

- [1] Universidad Pontificia de Comillas. *Apuntes de Motores de Combustión Interna Alternativos*, 2009 [UPCO]
- [2] White, Frank M. *Fluid Mechanics*. New York: Mc Graw-Hill, 1998 [WHIT98]
- [3] Mehrdad Ehsani; Yimin Gao; Ali Emadi. *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehucles. Fundamentals, Theory and Design*. Second Edition. CRC Press. Taylor & Francis Group, 2010 [MEHR10]
- [4] Iqbal Husain. *Electric and Hybrid Vehicles*. Second Edition. CRC Press, 2010 [HUSA10]
- [5] [www.motorpasion.com](http://www.motorpasion.com)
- [6] [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)
- [7] [www.nissan.com](http://www.nissan.com)
- [8] [www.renault.com](http://www.renault.com)
- [9] [www.arpem.com](http://www.arpem.com)
- [10] Gillespie, T. D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1992 [WARR92]
- [11] Arias-Paz, Manuel. *Manual De Automóviles* Ed. 55. Madrid. Editorial Dossat, 2004 [ARIA04]
- [12] MathWorks. *Matlab & Simulink Getting Started Guide* 10th edition, 2013
- [13] Ros Martín, Joan Antoni; Barrera Doblado, Óscar. *Sistemas eléctricos y de seguridad y confortabilidad*. Ediciones Paraninfo, 2011 [ROSM11]
- [14] Arias-Paz, Manuel. *Manual De Automóviles* Ed. 55. Madrid. Editorial Dossat, 2004. [ARIA04].





# **Anexo I: MANUAL DE USUARIO**





En esta segunda parte, se explica brevemente el funcionamiento del simulador diseñado. Para ello, se explican los distintos pasos a seguir para el empleo de este.

Para comenzar, la simulación se ha realizado en *Simulink*, una interfaz del conocido programa *MATLAB*. Esta interfaz permite la simulación de sistemas dinámicos. Para el correcto funcionamiento de esta simulación es necesario disponer del software *MATLAB* con sus respectivas librerías de *Simulink*. No obstante, esta simulación ha sido realizada mediante la versión *MATLAB R2014b*, por lo que deberá ser usado en una versión equivalente o superior.

En primer lugar, se abre el software de *Matlab* y se selecciona la carpeta en la que está guardado todos los archivos tales como los datos de la simulación, curvas de isoconsumos, ciclo de conducción... Es decir, todos los archivos que *MATLAB* necesita para la simulación. En el caso de este proyecto la carpeta se denomina *PROYECTO* por lo que abrimos ésta en el directorio:

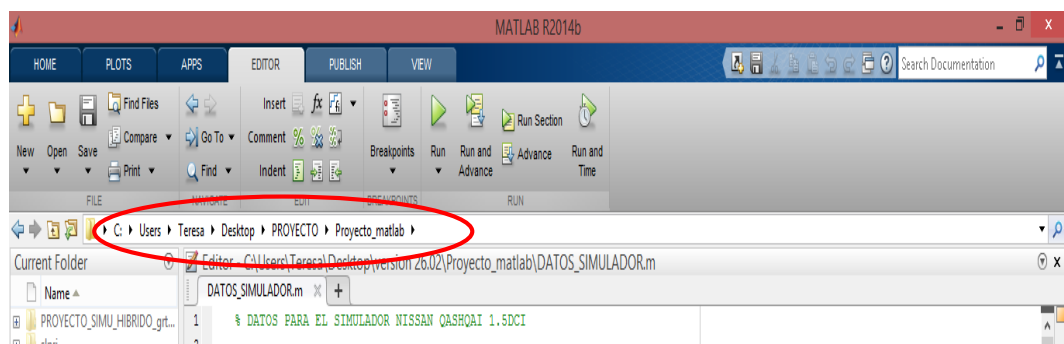


Ilustración 72: Interfaz MATLAB para la selección de la carpeta

Para continuar, en el recuadro izquierdo denominado como “Current Folder” se selecciona *DATOS\_SIMULADOR.m* donde se abre el fichero que contiene todos los datos sobre el vehículo en cuestión. Mediante la variación de estos parámetros, es posible simular distintos vehículos.

La siguiente ilustración muestra el fichero abierto:

```
DATOS_SIMULADOR.m x +
7
8 % DATOS PARA EL SIMULADOR NISSAN QASHQAI 1.5DCI
9
10 tiempo=xlsread('NEDC_valores.xls',1,'A48:A1227')-41;
11 velocidades=xlsread('NEDC_valores.xls',1,'S48:S1227');
12
13 %Características vehiculo
14 c=1461*10^-6; %cilindrada [m^3]
15 m=1482; %masa [kg]
16 l=4.330; %longitud [m]
17 an=1.780-0.80; %anchura [m]-80cm ruedas
18 al=1.615-0.15; %altura [m]-hueco inferior
19 Afront=al*an; %Área funcional, [m^2]
20 alpha=0; %pendiente [grados]
21 Cx=0.32; %coeficiente de penetracion aerodinámico
22 fr=0.015; %coeficiente de resistencia a la rodadura (fr=f0+fv)
23 km=1.15; %factor de masa, coeficiente de inercia
24
25 %densidades
26 densidad_aire=1.1917; %densidad aire[kg/m^3]
27 dcomb=810; %densidad del combustible [kg/m^3]
28 g=9.80665; %Gravedad [m/s]
29
30
31
32
```

```
DATOS_SIMULADOR.m x +
31
32
33 %Constantes
34 Ca=0.5*densidad_aire*Cx*Afront; %Constante Aerodinámica
35 Cp=m*g*sin(alpha*pi/180); %Constante de pendiente (Fuerza de la pendiente)
36 Cz=fr*m*g*cos(0); %Constante de resistencia a la rodadura
37
38 %Desarrollos
39 D1=8.2; %Primera [km/h /1000rpm]
40 D2=15.7; %Segunda [km/h /1000rpm]
41 D3=25; %Tercera [km/h /1000rpm]
42 D4=36.5; %Cuarta [km/h /1000rpm]
43 D5=46.9; %Quinta [km/h /1000rpm]
44 D6=54.8; %Sexta [km/h /1000rpm]
45 DR=8.3; %Marcha atrás [km/h /1000rpm]
46
47
48 %Matriz de isoconsumos Nissan Qashqai
49 consumos=xlsread('consumos.xls',1);
50 pme=consumos(2:end-1,2:end);
51 isoconsumos=consumos(2:end-1,2:end);
52
53
54
55
56
```

Ilustración 73: Vista del fichero DATOS\_CONSUMO.m

Las primeras líneas del código son las encargadas de seleccionar el ciclo de velocidades que se va a emplear en la simulación. Para ello, mediante la función *xlsread*, se lee los valores de la velocidad que vienen en un archivo de *Microsoft Excel*. Las siguientes líneas corresponden a las características del vehículo como son la cilindrada, la masa, el factor de masa, coeficiente de rodadura, etc que son usados y leídos posteriormente por la interfaz *Simulink*. También se



incluyen las densidades como la de aire y la del combustible. En este caso la densidad del diésel ya que se trata de un *Nissan Qashqai* con un motor diésel.

Para continuar, se incluyen la constante aerodinámica, de la pendiente y de rodadura necesarias para el cálculo de los esfuerzos sobre el vehículo. Cabe destacar, que el ángulo de la pendiente tiene que estar en radianes.

A continuación se incluyen los desarrollos para las distintas marchas y la lectura de la matriz de isoconsumos, que también está guardada en formato *Excel*. Para modificar cualquier parámetro de este fichero es tan simple como borrar el anterior, escribir el nuevo y guardarlo. Previamente a la simulación, este fichero tiene que estar útil, para poder obtener los parámetros de él. Para ello se hace click sobre “Run” y se espera a que se carguen todos los valores.

Para la simulación, se abre el archivo PROYECTO\_SIMU.slx en el caso de querer abrir el motor de combustión interna sólo o PROYECTO\_SIMU\_HÍBRIDO.slx en el caso de querer abrir el motor térmico con el sistema de recuperación de energía y el sistema *Start&Stop*. Una vez abierto el fichero, aparece una ventana donde se puede ejecutar la simulación o cambiar cualquier bloque o características de funcionamiento.

Para la ejecución de la simulación hay que hacer *click* sobre el icono “Run”. El icono se muestra en la siguiente imagen:

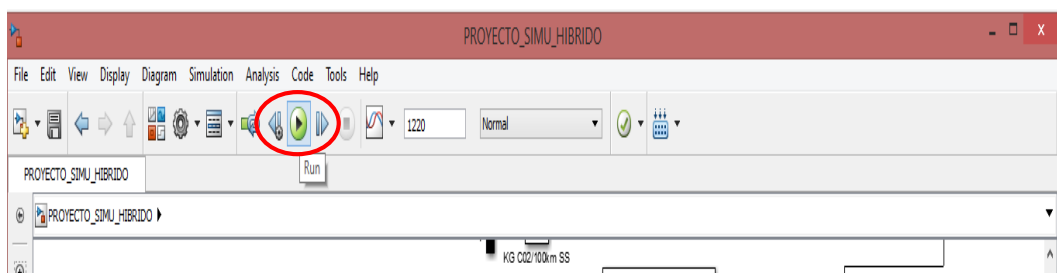


Ilustración 74: Vista de la simulación e icono “Run”

Finalmente, tras esperar el tiempo de simulación, se pincha en el “Scope” que queremos observar su evolución.







# **Anexo II:**

# **FICHAS**

# **TÉCNICAS**

# **VEHÍCULOS**





<b>NISSAN QASHQAI</b>	
<b>Cilindrada</b>	1461 cm <sup>2</sup>
<b>Masa</b>	1482 kg
<b>Cx (Coeficiente aerodinámico)</b>	0.32
<b>fr (Coeficiente a la resistencia a la rodadura)</b>	0.015
<b>Km (Factor de masa)</b>	1.15
<b>Dimensiones</b>	
<b>Longitud</b>	4330 mm
<b>Anchura</b>	1780 mm
<b>Altura</b>	1615 mm
<b>Densidades</b>	
<b>Aire</b>	1.1917 kg/m <sup>3</sup>
<b>Combustible</b>	810 kg/m <sup>3</sup>
<b>Desarrollos</b>	
<b>1</b>	8.2 km/h/(1000km)
<b>2</b>	15.7 km/h/(1000km)
<b>3</b>	25 km/h/(1000km)
<b>4</b>	36.5 km/h/(1000km)
<b>5</b>	46.9 km/h/(1000km)
<b>6</b>	54.8 km/h/(1000km)
<b>R</b>	8.3 km/h/(1000km)

<b>NISSAN JUKE</b>	
<b>Cilindrada</b>	1461 cm <sup>2</sup>
<b>Masa</b>	1380 kg
<b>Cx (Coeficiente aerodinámico)</b>	0.32
<b>fr (Coeficiente a la resistencia a la rodadura)</b>	0.015
<b>Km (Factor de masa)</b>	1.15
<b>Dimensiones</b>	
<b>Longitud</b>	4135 mm
<b>Anchura</b>	1765 mm
<b>Altura</b>	1565 mm
<b>Densidades</b>	
<b>Aire</b>	1.1917 kg/m <sup>3</sup>
<b>Combustible</b>	810 kg/m <sup>3</sup>
<b>Desarrollos</b>	
<b>1</b>	7.8 km/h/(1000km)
<b>2</b>	14.9 km/h/(1000km)
<b>3</b>	23.7 km/h/(1000km)
<b>4</b>	34.6 km/h/(1000km)
<b>5</b>	44.5 km/h/(1000km)
<b>6</b>	51.8 km/h/(1000km)
<b>R</b>	7.9 km/h/(1000km)



<b>RENAULT CLIO</b>	
<b>Cilindrada</b>	1461 cm <sup>2</sup>
<b>Masa</b>	980 kg
<b>Cx (Coeficiente aerodinámico)</b>	0.32
<b>fr (Coeficiente a la resistencia a la rodadura)</b>	0.015
<b>Km (Factor de masa)</b>	1.15
<b>Dimensiones</b>	
<b>Longitud</b>	3812 mm
<b>Anchura</b>	1639 mm
<b>Altura</b>	1417 mm
<b>Densidades</b>	
<b>Aire</b>	1.1917 kg/m <sup>3</sup>
<b>Combustible</b>	810 kg/m <sup>3</sup>
<b>Desarrollos</b>	
<b>1</b>	8.7 km/h/(1000km)
<b>2</b>	15.8 km/h/(1000km)
<b>3</b>	24.5 km/h/(1000km)
<b>4</b>	33.3 km/h/(1000km)
<b>5</b>	42.8 km/h/(1000km)

<b>RENAULT MEGANE</b>	
<b>Cilindrada</b>	1461 cm <sup>2</sup>
<b>Masa</b>	1280 kg
<b>Cx (Coeficiente aerodinámico)</b>	0.32
<b>fr (Coeficiente a la resistencia a la rodadura)</b>	0.015
<b>Km (Factor de masa)</b>	1.15
<b>Dimensiones</b>	
<b>Longitud</b>	4209 mm
<b>Anchura</b>	1777 mm
<b>Altura</b>	1457 mm
<b>Densidades</b>	
<b>Aire</b>	1.1917 kg/m <sup>3</sup>
<b>Combustible</b>	810 kg/m <sup>3</sup>
<b>Desarrollos</b>	
<b>1</b>	8.3 km/h/(1000km)
<b>2</b>	16 km/h/(1000km)
<b>3</b>	23.5 km/h/(1000km)
<b>4</b>	31.9 km/h/(1000km)
<b>5</b>	40.7 km/h/(1000km)
<b>6</b>	48.7 km/h/(1000km)



# **Anexo III: CATÁLOGO DEL MOTOR ELÉCTRICO**







# SIEMENS

## Hoja de datos de motores de jaula de ardilla trifásicos

Data sheet for three-phase Squirrel-Cage-Motors



Datos de pedido: **1LE1501-2AB53-4AA4**

Ordering data:

Tipo de motor:

**1CV2205B**

Número de pedido del cliente / Client order

Nº. de item / Item no.:

Nº. de pedido Siemens / Order no.:

Número de envío / Consignment no.:

Número de oferta / Offer no.:

Proyecto / Project:

Nota / Remarks:

U [V]	Δ / Y	f [Hz]	P [kW]	P [hp]	I [A]	n [1/min]	M [Nm]	NOM. EFF at ... load [%]			Power factor at ... load			I <sub>Δ</sub> /I <sub>Y</sub>	M <sub>Δ</sub> /M <sub>Y</sub>	M <sub>Δ</sub> /M <sub>N</sub>	IE-CL
								4/4	3/4	2/4	4/4	3/4	2/4				
400	Δ	50	30,00	- / -	56,00	1470	195,0	92,3	92,8	92,6	0,84	0,80	0,72	6,7	2,5	3,3	IE2
690	Y	50	30,00	- / -	32,50	1470	195,0	92,3	92,8	92,6	0,84	0,80	0,72	6,7	2,5	3,3	IE2
460	Δ	60	34,50	- / -	55,00	1770	186,0	93,0	93,4	93,1	0,85	0,82	0,73	7,2	2,7	3,2	IE2
IM B3 / IM 1001		FS 200 L		230 kg		IP55		IEC/EN 60034		IEC, DIN, ISO, VDE, EN							

Datos mecánicos / Mechanical data		Caja de bornes / Terminal box	
Nivel de presión sonora (LpA) 50 Hz/60Hz	70 db(A) / 72 db(A)	Posición de la caja de bornes	arriba / top
Momento de inercia / Moment of inertia	0,20 kg m²	Material de la caja de bornes / Material of terminal box	Fundición gris / cast iron
Rodamiento LA   LCA / Bearing DE   NDE	6212 ZC3 / 6212 ZC3	Tipo / Type of terminal box	TB1 L01
Vida útil de rodamiento / Bearing lifetime	40000 h	Rosca del tornillo de contacto / Contact screw thread	M6
Lubricante / Lubricants	Esso Unirex N3	Sección de conductor, máx. / Max. cross-sectional area	25,0 mm²
Dispositivo de relubricación / Regreasing device	No	Diámetro de cable de... a... / Cable diameter from ... to ...	27,0 mm - 35,0 mm
Boquilla de engrase / Grease nipple	- / -	Entrada de cable / Cable entry	2xM50x1,5
Tipo de rodamientos / Type of bearing	Rodamiento fijo en LCA/NDE / Locating bearing NDE	Pasacables / Cable gland	2 tapones / 2 plugs
Agujeros drenaje de condensado / Condensate drainage holes	Sí (estándar) / Yes (standard)	Condiciones ambientales / Environmental conditions	
Borne de tierra externo / External earthing terminal	Sí (estándar) / Yes (standard)	Temperatura ambiente / Ambient temperature	-20 °C - +40 °C
Clase vibratoria / Vibration class	A	Altitud sobre nivel del mar / Altitude above sea level	1000 m
Aislamiento / Insulation	155(F) a 130(B) / 155(F) to 130(B)	Versiones especiales / Special design	
Tipo de servicio / Duty type	S1		
Sentido de giro / Direction of rotation	ambas direcciones / bidirectional		
Material de la carcasa / Frame material	fundición gris / cast iron		
Datos del tiempo de parada del calentador / Data of anti condensation heating	- / -		
Pintura / Coating	Pintura normal / Standard paint finish		
Color	RAL7030		
Protección del motor / Motor protection	(A) sin (estándar) / (A) without (Standard)		
Método de refrigeración / Method of cooling	IC411 - ventilación propia, refrigeración superficial / IC411 - self ventilated, surface cooled		