



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

---

*TRABAJO FINAL DEL*

*REALIZADO POR*

*TUTORIZADO POR*

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



## Resumen

En este trabajo se ha realizado una comparativa entre un motor asíncrono de inducción y uno síncrono de imanes permanentes implementados sobre un coche eléctrico utilitario tipo.

Para ello se ha utilizado el software Simulink Matlab en el que se han generado dos modelos en los que el motor debe seguir una velocidad de referencia que viene dada por el ciclo de homologación WLTP Clase 3 y a su vez vencer el par de carga que supone el vehículo eléctrico.

Dichos modelos incorporan el ciclo de velocidad WLTP, un subconjunto de potencia compuesto por el motor eléctrico, el inversor trifásico y una batería de ion-litio. También se añade un control vectorial FOC o uno escalar en bucle cerrado según el motor eléctrico del modelo. Por último, se ha generado un subconjunto mecánico que representa la transmisión del par electromagnético del motor a las ruedas de coche y la dinámica propia de un vehículo de cuatro ruedas.

Los elementos críticos de las simulaciones han sido la batería y el tipo de control empleado para generar las señales de disparo de los IGBTs del inversor trifásico.

El fin último de este proyecto de investigación ha sido justificar la implementación de uno u otro motor según el consumo energético obtenido y la calidad del seguimiento de la velocidad de referencia.

Se ha obtenido que el motor de imanes permanentes tiene un menor consumo energético y un seguimiento de velocidad correcto, mientras que el motor de inducción presenta un error de "offset" en el seguimiento de la velocidad.

Este resultado refleja fielmente el estado del arte sobre los motores eléctricos de tracción los cuales tienden a ser síncronos de imanes permanentes junto a los emergentes de reluctancia variable.

**Palabras clave:** motor eléctrico, batería, motor de inducción, motor de imanes permanentes, control, velocidad, consumo energético.



## Resum

En aquest treball s'ha realitzat una comparativa entre un motor asíncron d'inducció i un síncron d'imants permanents implementats sobre un cotxe elèctric utilitari tipus.

Per a això s'ha utilitzat el programari Simulink Matlab en el qual s'han generat dos models en els quals el motor ha de seguir una velocitat de referència que ve donada pel cicle d'homologació WLTP Classe 3 i al seu torn véncer el parell de càrrega que suposa el vehicle elèctric.

Aquests models incorporen el cicle de velocitat WLTP, un subconjunt de potència compost pel motor elèctric, l'inversor trifàsic i una bateria d'ió-liti. També s'afeg un control vectorial FOC o un escalar en bucle tancat segons el motor elèctric del model. Finalment, s'ha generat un subconjunt mecànic que representa la transmissió del parell electromagnètic del motor a les rodes de cotxe i la dinàmica pròpia d'un vehicle de quatre rodes.

Els elements crítics de les simulacions han sigut la bateria i el tipus de control emprat per a generar els senyals de tret dels IGBTs de l'inversor trifàsic.

La fi última d'aquest projecte d'investigació ha sigut justificar la implementació de l'un o l'altre motor segons el consum energètic obtingut i la qualitat del seguiment de la velocitat de referència.

S'ha obtingut que el motor d'imants permanents té un menor consum energètic i un seguiment de velocitat correcte, mentre que el motor d'inducció presenta un error de "offset" en el seguiment de la velocitat.

Aquest resultat reflecteix fidelment l'estat de l'art sobre els motors elèctrics de tracció els quals tendeixen a ser síncrons d'imants permanents al costat dels emergents de reluctancia variable.

**Paraules clau:** motor elèctric, bateria, motor d'inducció, motor d'imants permanents, control, velocitat, consum energètic.



## Abstract

In this work, a comparison between an asynchronous induction motor and a permanent magnet synchronous motor implemented on a typical electric utility car has been carried out.

For this purpose, Simulink Matlab software has been used to generate two models in which the motor must follow a reference speed given by the WLTP Class 3 standard cycle and, at the same time, overcome the load torque of the electric vehicle.

These models incorporate the WLTP speed cycle, a power subassembly consisting of the electric motor, the three-phase inverter, and a lithium-ion battery. A FOC vector control or a closed-loop scalar one is also added depending on the electric motor of the model. Finally, a mechanical subset has been generated to represent the transmission of the electromagnetic torque from the motor to the wheels and the dynamics of a four-wheeled vehicle.

The critical elements of the simulations have been the battery and the type of control used to generate the trigger signals of the IGBTs of the three-phase inverter.

The goal of this research project has been to justify the implementation of one or the other motor according to the energy consumption obtained and the quality of the reference speed tracking.

It has been obtained that the permanent magnet motor has a lower energy consumption and a correct speed tracking, while the induction motor presents an "offset" error in the speed tracking.

This result accurately reflects the state of the art on traction electric motors which tend to be permanent magnet synchronous together with the emerging switching reluctance ones.

**Keywords:** electric motor, battery, induction motor, permanent magnet motor, control, speed, energy consumption.



## DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFM

<b>MEMORIA.....</b>	<b>1</b>
<b>1. Objeto .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Estudio de necesidades, limitaciones y condicionantes .....</b>	<b>3</b>
2.1. Motor eléctrico frente a motor de combustión .....	3
2.2. Tipo de motor y tracción en vehículo eléctrico .....	5
2.3. Resumen de las necesidades de los modelos implementados .....	7
<b>3. Planteamiento de alternativas y solución adoptada.....</b>	<b>9</b>
3.1. Software de simulación .....	10
3.2. Motor.....	11
3.2.1. Motores asíncronos o de inducción.....	12
3.2.2. Motor síncrono de imanes permanentes .....	13
3.2.3. Motor síncrono de reluctancia variable .....	14
3.2.4. Motores seleccionados .....	15
3.3. Batería .....	15
3.4. Control .....	17
3.4.1. Control escalar.....	18
3.4.2. Control en bucle cerrado.....	20
3.4.3. Control vectorial FOC .....	23
3.4.4. Control DTC.....	28
3.4.5. Control elegido .....	31
3.5. Transmisión .....	32
3.5.1. Elección del tipo de transmisión .....	34
<b>4. Descripción de la solución adoptada.....</b>	<b>35</b>
4.1. Modelo con motor de imanes permanentes.....	35
4.1.1. Ciclo de homologación WLTP .....	36

4.1.2. Bloque “Longitudinal Driver” .....	39
4.1.3. Motor de imanes permanentes .....	41
4.1.4. Inversor trifásico .....	44
4.1.5. Batería .....	45
4.1.6. Control FOC.....	47
4.1.7. Transmisión mecánica .....	50
4.2. Modelo con motor de inducción .....	58
4.2.1. Motor de inducción .....	59
4.2.2. Batería .....	62
4.2.3. Control en bucle cerrado.....	63
<b>5. Justificación detallada de la solución adoptada .....</b>	<b>67</b>
5.1. Fuerza de resistencia aerodinámica .....	67
5.2. Resistencia debida a la pendiente .....	68
5.3. Resistencia a la rodadura .....	69
5.4. Fuerza de inercia .....	69
5.5. Potencia necesaria para vencer las fuerzas resistivas.....	70
5.6 Selección del acoplamiento .....	72
<b>6. Resultados obtenidos .....</b>	<b>75</b>
6.1. Respuesta dinámica .....	75
6.2. Consumo energético .....	83
<b>7. Conclusiones .....</b>	<b>89</b>
<b>8. Bibliografía .....</b>	<b>91</b>
<b><i>PRESUPUESTO.....</i></b>	<b><i>95</i></b>
1. Introducción .....	97
2. Recursos materiales .....	97

---

2.1. Material amortizable .....	97
3. Recursos humanos.....	98
3.1 Otros costes.....	98
3.2 Coste total .....	98
<b>PLANOS .....</b>	<b>99</b>
1. P1. Modelo con motor de imanes permanentes.....	99
2. P2. Modelo con motor de inducción.....	101



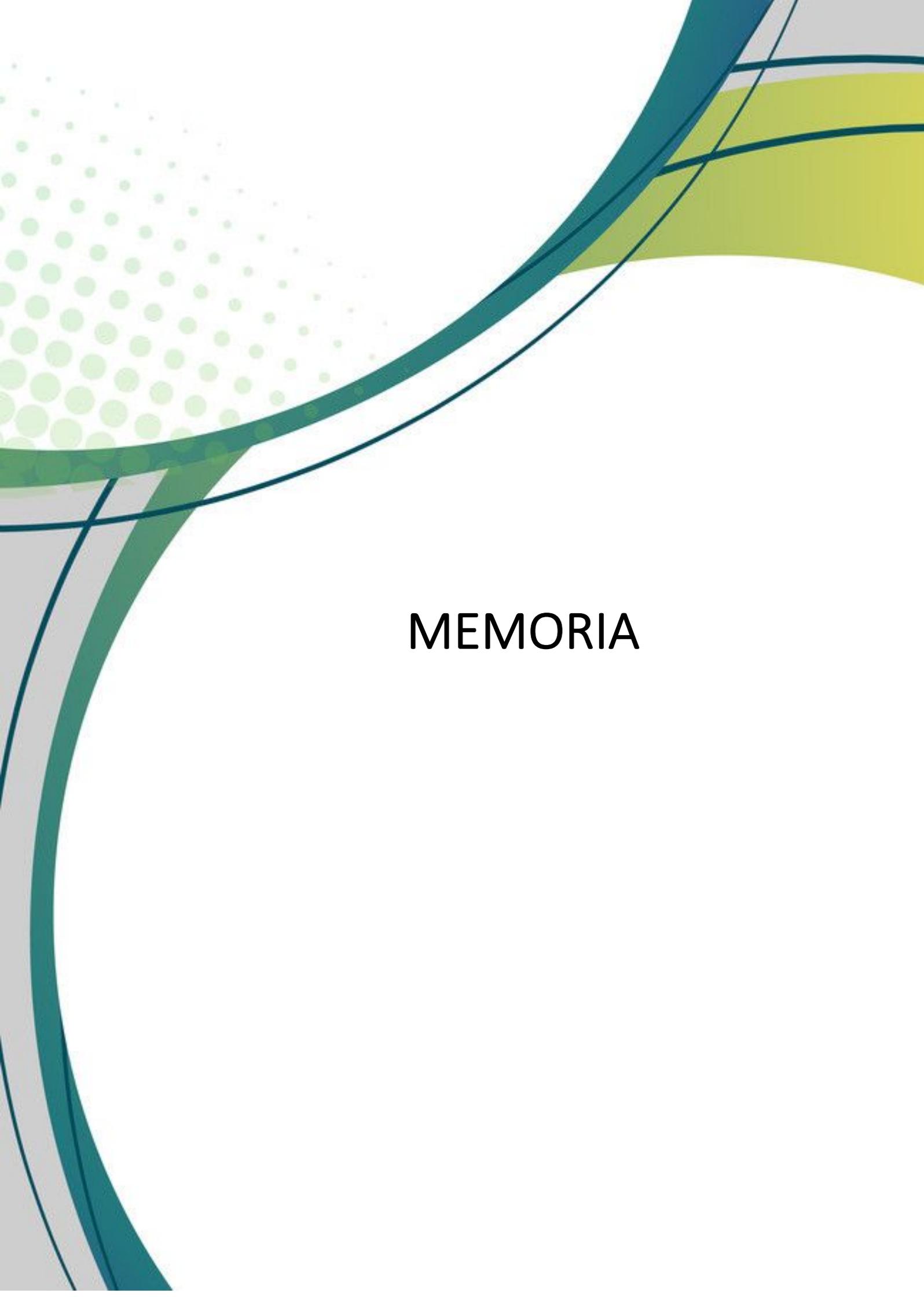
## Índice de Figuras

Figura 1 - Motor eléctrico (izda) frente a motor de combustión (dcha).....	4
Figura 2 - Comparativa de modelos Nissan según su tipo de motor. ....	4
Figura 3 - Motor eléctrico acoplado sobre eje trasero. ....	6
Figura 4 - Motores acoplados sobre las ruedas. ....	7
Figura 5 - Elementos de un coche eléctrico. ....	7
Figura 6 - Elementos principales de un coche eléctrico tipo. ....	9
Figura 7 - Bobinado del estator.....	12
Figura 8 - Rotor del motor de inducción. ....	12
Figura 9 - Posición de los imanes en el rotor del motor. ....	13
Figura 10 - Motor SRM de tracción.....	14
Figura 11 - Batería de coche eléctrico tipo de Níquel-Hidruro metálico. ....	16
Figura 12 - Etapas de potencia de un VSD. ....	18
Figura 13 - Par frente a frecuencia de alimentación.....	19
Figura 14 - Zonas de trabajo de la máquina eléctrica según su velocidad de giro.....	20
Figura 15 - Sistema en bucle cerrado.....	21
Figura 16 - Diagrama de bloques de las tres acciones de control.....	22
Figura 17 - Esquema general del control FOC.....	23
Figura 18 - Diagrama de bloques de control FOC directo. ....	24
Figura 19 - Transformadas de Clarke y Park. ....	25
Figura 20 - Modelo general del control FOC. ....	26
Figura 21 - Comparativa entre SVPWM y SPWM.....	26
Figura 22 - Vector de espacio tipo. ....	27
Figura 23 - Transformaciones del control FOC.....	28
Figura 24 - Flujo de estator y rotor. ....	29
Figura 25 - Vectores de tensión de control.....	29
Figura 26 - Diagrama de bloques de control DTC. ....	30
Figura 27 - Mecanismo diferencial.....	33
Figura 28 - Sistema diferencial de doble corona.....	33

Figura 29 - Variables en "script" de los modelos implementados. ....	36
Figura 30 - Comparativa de ciclos WLTP y NEDC. ....	37
Figura 31 - Bloque de Simulink del ciclo WLPT. ....	38
Figura 32 - Ciclo WLTP empleado en la simulación.....	39
Figura 33 - Bloque "Longitudinal Driver". ....	39
Figura 34 - Parámetros de configuración del bloque "Longitudinal Driver". ....	40
Figura 35 - Etapa de potencia del modelo con PMSM.....	41
Figura 36 - Bloque PMSM. ....	42
Figura 37 - Inversor trifásico. ....	44
Figura 38 - Batería implementada en modelo PMSM.....	45
Figura 39 - Cuadrantes de trabajo de motor AC. ....	46
Figura 40 - Parámetros del bloque de batería. ....	46
Figura 41 - Diagrama del control FOC. ....	48
Figura 42 - Bloque FOC del control de PMSM.....	49
Figura 43 - Subsistema mecánico del modelo PMSM.....	50
Figura 44 - Subconjuntos mecánicos del modelo de PMSM.....	51
Figura 45 - Diferencial y reductora. ....	51
Figura 46 - Subconjunto de las ruedas.....	52
Figura 47 - Bloque "Two-Way Connection". ....	53
Figura 48 - Funcionamiento del bloque "Two-Way Connection". ....	53
Figura 49 - Configuración del bloque de las ruedas.....	54
Figura 50 - Parámetros usados por el modelado Magic Formula. ....	55
Figura 51 - Esquema de las partes principales de un freno de disco. ....	55
Figura 52 - Subconjunto de la dinámica del vehículo. ....	56
Figura 53 - Parámetros del bloque de la dinámica del coche eléctrico. ....	57
Figura 54 - Bloque de potencia del modelo IM.....	59
Figura 55 - Función que regula el par de carga del modelo IM.....	59
Figura 56 - Bloque del motor de inducción.....	60
Figura 57 - Parámetros de la batería de IM. ....	62
Figura 58 - Subconjunto del control del IM. ....	63

Figura 59 - Esquema del control del motor de inducción .....	64
Figura 60 - Señales de referencia de tensión del control de IM. ....	65
Figura 61 - Dinámica longitudinal del vehículo. ....	67
Figura 62 - Scopes de los resultados de la simulación PMSM.....	75
Figura 63 - Scopes de los resultados de la simulación IM.....	75
Figura 64 - Comparativa de las velocidades lineales en modelo PMSM.....	76
Figura 65 -Comparativa de las velocidades lineales en modelo IM. ....	76
Figura 66 - Resultado del control de velocidad del modelo de PMSM.....	78
Figura 67 - Resultado del control de velocidad del modelo de IM. ....	78
Figura 68 - Detalle del error de posición de la velocidad del motor de inducción. ....	79
Figura 69 – Par electromagnético del motor de imanes permanentes. ....	80
Figura 70 - Señal de aceleración del PMSM.....	81
Figura 71 - Par electromagnético del motor de inducción. ....	82
Figura 72 - Señales del control del par de carga del motor de inducción.....	82
Figura 73 - Estado de carga de la batería en el modelo PMSM. ....	84
Figura 74 - Estado de carga de la batería en el modelo IM.....	84
Figura 75 - Detalle del SOC de la batería del modelo PMSM.....	85
Figura 76 - Detalle del SOC de la batería del modelo IM. ....	86





MEMORIA



# 1. Objeto

Este trabajo ha sido realizado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño (ETSID) en la Universitat Politècnica de València (UPV) y está directamente relacionado con el Departamento de Ingeniería Eléctrica. Esto se debe a que su desarrollo ha permitido ampliar los conocimientos sobre la asignatura de “Modelado y Control de Máquinas Eléctricas” y sobretodo, de “Accionamientos Electromecánicos”.

Se ha decidido enfocar el proyecto al estudio de los diferentes motores eléctricos implementados sobre un coche eléctrico. En particular, se eligió investigar con qué tipo de motor eléctrico (de imanes permanentes y de inducción) se consigue una mejor respuesta dinámica en un control de velocidad. Y de manera secundaria, cuál obtiene un menor consumo energético, consiguiendo la mayor autonomía para la batería. También se han definido los diferentes elementos electrónicos que complementan al motor para poder realizar una simulación lo más acorde a la realidad.

Por otro lado, se consideró de interés la recarga de la batería, en particular, de manera inductiva, pero la idea se desechó al ofrecer principalmente contenido teórico.

Por tanto, este proyecto tiene el objetivo principal de comparar diferentes tipos de motores eléctricos como son el motor asíncrono de inducción y el síncrono de imanes permanentes implementados sobre un vehículo eléctrico. Esta comparativa se ha realizado desde el punto de vista del control de la máquina eléctrica, del consumo energético de la batería y de la capacidad del seguimiento de una velocidad de referencia que viene dada por el ciclo de homologación europeo WLTP.

El propósito final será, por tanto, justificar el estado del arte en este sector industrial basándose en los resultados obtenidos. Además, también resulta interesante conocer de qué manera se consigue un menor consumo eléctrico, o lo que es lo mismo, mayor autonomía de batería.

Para el caso que nos ocupa, se ha decidido estudiar la tecnología que forma parte del coche eléctrico para elegir las prestaciones óptimas con el fin de conseguir una simulación lo más fiel posible a la realidad.

Antes de comenzar con las particularidades del coche eléctrico, de manera genérica se pueden definir las características que debe tener nuestro vehículo:

- Vehículo tipo BEV (“*Battery Electric Vehicle*”), es decir, Vehículo Eléctrico de Batería o vehículo 100% eléctrico. Esto supone que la energía eléctrica almacenada en su batería recargable y enchufable es su única forma de propulsión.
- Categoría M1: Vehículos de ocho plazas como máximo (excluida la del conductor) diseñados y fabricados para el transporte de pasajeros. Establecida en el Real Decreto

2028/1986 y actualizada en el Real Decreto 750/2010, de 4 de junio, con respecto a la homologación de vehículos y definida en la Directiva 2007/46/CE. (Galbarro, 2021)

La constitución de un coche eléctrico consta de numerosos elementos eléctricos, mecánicos y electrónicos. Todos estos ámbitos se aúnan a lo largo del proceso de investigación, desarrollo, diseño y construcción del vehículo.

Además, cada parte independiente que lo forman puede llegar a constituir un campo de estudio en sí mismo, como la electrónica de potencia (inversor) o el desarrollo de transmisiones (engranajes). Por ello es necesario delimitar de una manera clara con qué profundidad se va a analizar cada faceta de este trabajo.

De esta manera, se pretende conocer la mejor configuración posible de los elementos que forman un coche eléctrico, poniendo al motor eléctrico como principal objetivo a comparar, con el fin de conseguir un buen control de velocidad y el mínimo consumo energético, lo que se traduce en mayor autonomía de la batería.

Para ello, se procederá a la simulación mediante el software *Simulink* en el entorno Matlab de dos modelos en los que variará el tipo de motor eléctrico y su correspondiente control, que se trasladará de manera directa a la mecánica de un coche eléctrico tipo.

Se busca también contrastar las ventajas y desventajas de las diferentes posibilidades analizadas como el tipo de control empleado para la máquina eléctrica.

Como propósitos más livianos se pretende la divulgación del funcionamiento de los coches eléctricos, su estado actual de desarrollo, las últimas tecnologías implementadas y sus perspectivas de futuro.

Como resumen de los objetivos secundarios encontramos:

- Conocer los principales componentes de un vehículo eléctrico.
- Evaluar el estado de la tecnología actual implementada en los coches eléctricos.
- Comparar los resultados obtenidos mediante simulación con respecto al control de los diferentes motores sometidos a estudio.

No se entrará en detalle sobre el proceso por el cual la energía entra en el sistema, se almacena en la batería, se transforma en el motor y finalmente se convierte en movimiento.

Tampoco será objeto de este trabajo el diseño de la batería del vehículo ni se profundizará en la disposición de los diferentes elementos del tren de potencia dentro del chasis.

Por último, y con respecto a la faceta energética y ambiental, no se analizarán las emisiones del coche eléctrico, ya sean directas o indirectas.

## 2. Estudio de necesidades, limitaciones y condicionantes

El vehículo eléctrico va ganando interés e imponiéndose poco a poco en nuestro mercado automovilístico, sobretodo en forma de coche híbrido, principalmente por solventar las limitaciones de autonomía y recarga que presenta el vehículo 100% eléctrico.

Sin embargo, la tendencia es muy clara y para entender la magnitud de la influencia de este tipo de vehículo, es necesario conocer que una de las últimas novedades respecto a estos es que el Gobierno de España ha propuesto establecer por ley que a partir del año 2040 no se permita la matriculación y venta de turismos y vehículos comerciales ligeros con emisiones directas de CO<sub>2</sub> (entre ellos todos los de diésel y de gasolina). Esto supone que la intención, tanto española como europea, es que en 19 años el 100% de los vehículos que se vendan sean completamente eléctricos. (Ladera, 2021)

Como consecuencia de esto, también se prevé que para el año 2050 la circulación de todos los turismos que emitan de forma directa CO<sub>2</sub> esté prohibida.

En conclusión, la intención de las entidades gubernamentales es que, en 30 años vista, aproximadamente, solamente haya en circulación vehículos eléctricos.

Esta información está recogida en el borrador de la Ley de Cambio Climático y Transición Energética planeada por la administración.

### 2.1. Motor eléctrico frente a motor de combustión

En general, los motores eléctricos son mucho más sencillos que los de combustión interna pues se reducen notablemente los elementos mecánicos que lo componen: ausencia de pistones, cilindros, turbo, sistema de escape... En la Figura 1 se observa la diferencia en cuanto a la cantidad de componentes entre ambos motores.

Esto supone que el mantenimiento del motor eléctrico sea mucho menor, de hecho, prácticamente nulo, lo que conlleva una alta fiabilidad, mientras que en los motores de combustión son comunes las reparaciones.

Además, son mucho más eficientes, pues de media, en los motores eléctricos se aprovecha el 90% de la energía consumida, mientras que, en uno de combustión, la eficiencia ronda el 25%. (H. M. R. Bargalló)

Por otro lado, el rendimiento mecánico es considerablemente mejor en los motores eléctricos. Con respecto a esto, se muestra en la Figura 2 una comparativa de par y potencia de dos modelos de Nissan de similares prestaciones, uno cien por cien eléctrico (rojo) y otro con motor de combustión (morado).

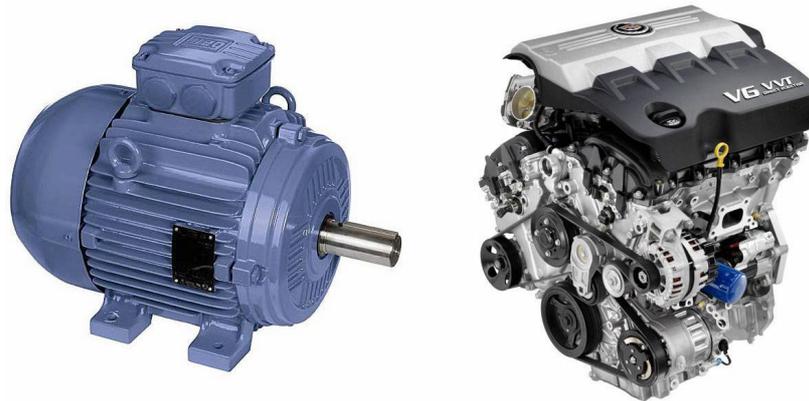


Figura 1 - Motor eléctrico (izda) frente a motor de combustión (dcha).

Lo primero que destaca es el mayor rango de velocidad del motor eléctrico, que alcanza más de 10000 rpm. Además, el par del motor eléctrico es máximo desde su arranque hasta alcanzar su velocidad nominal, momento a partir del cual va disminuyendo pese a que la potencia se mantiene constante y máxima. Otra ventaja que se puede apreciar es que el motor eléctrico sí puede estar parado cuando el vehículo se encuentra detenido, al contrario que un motor de combustión interna.

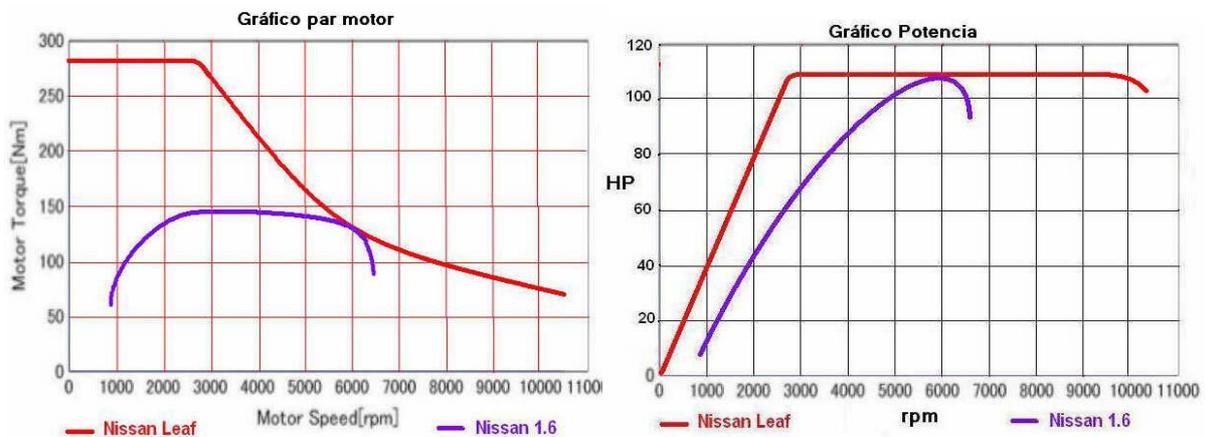


Figura 2 - Comparativa de modelos Nissan según su tipo de motor.

Sin embargo, tras todas estas ventajas que presenta el motor eléctrico, todavía hoy en día acusa las limitaciones alrededor del almacenamiento de la energía eléctrica. Este es el cuello de botella que provoca que, pese a la gran eficiencia energética del motor, la autonomía sea considerablemente menor que la de un coche de combustión.

Se puede ver muy claramente si se compara el potencial energético de la gasolina y una batería tipo. Mientras que la gasolina ofrece 12200 Wh/kg, una batería puede rondar los 140

Wh/kg. Esto se traduce en que una batería de 50 kWh de capacidad pesa alrededor de 350 kg, que es equivalente energéticamente a unos 4 litros de gasolina.

Con esta comparación se pone de manifiesto el gran problema actual del vehículo eléctrico. (Baeza, 2012)

En adición, el coste del vehículo eléctrico es proporcional a la capacidad de la batería que lo compone.

## 2.2. Tipo de motor y tracción en vehículo eléctrico

Con respecto a la flota de vehículos eléctricos vendidos en 2018, el 93% contaban con un tren de potencia movido por motores síncronos de imanes permanentes los cuales se componen de materiales poco comunes como el disprosio, el gadolinio o el neodimio (información de *EV Motor Power and Motor Metals Tracker* de *Adamas Intelligence*). La causa principal de esto es el menor tamaño y mayor eficiencia que presentaban estos frente a los motores asíncronos de inducción. (Fuentes, 2019)

Sin embargo, al contener estos motores materiales difíciles de conseguir, por su escasez y porque su procedencia está limitada a pocos países, los encarecen. Aún así, presentan la ventaja de no necesitar excitación externa para generar el campo magnético en el rotor ni escobillas (menor mantenimiento). Esto supone que sean más compactos y sencillos, con la ventaja añadida de que, al ser más eficientes, el tamaño de la batería puede ser menor manteniendo la autonomía.

También resulta interesante el caso de Tesla, que en 2017 empezó a utilizar motores de imanes permanentes junto con los de inducción. Sin embargo, recientemente, ha introducido también los síncronos de reluctancia variable en su modelo "Model 3".

Uno de los diseñadores de la marca, Konstantinos Laskarism, explicaba en una entrevista que cada tipo de motor presentaba diferentes ventajas como que los motores de imanes permanentes eran algo más eficientes, pero en los de inducción se puede regular perfectamente el flujo, lo que hace a ambos motores idóneos para el tren potencia de un vehículo de una única marcha. Además, justifica el cambio del tipo de motor alegando que conseguían minimizar costes, lo que supone un equilibrio entre coste del motor, coste de la batería y autonomía.

Con respecto a la posición que ocupa el motor o motores con respecto a los ejes del coche, tenemos diferentes configuraciones: tracción delantera, tracción trasera y tracción total. Esto es igual que en un vehículo de combustión, con la salvedad de que, en el caso de los coches eléctricos, el motor se encontrará sobre el eje que asuma la función de la tracción. Esto se

debe principalmente a que los motores eléctricos apenas ocupan espacio y son muy ligeros, en comparación con los de combustión.

Por lo tanto, si se quiere tener un coche de tracción trasera, se puede colocar el motor bajo el maletero (Figura 2), sin robar espacio al habitáculo y ahorrándose el árbol de transmisión si el motor se encontrase en el extremo opuesto.

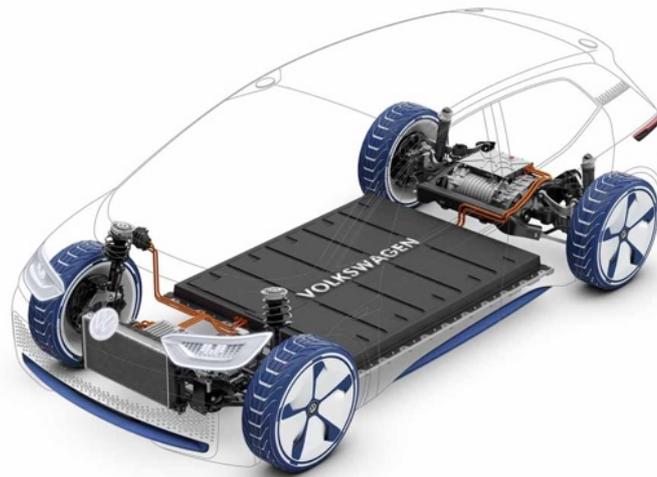


Figura 3 - Motor eléctrico acoplado sobre eje trasero.

Por otro lado, en el caso de los coches de tracción delantera, se podría hacer el morro del coche más corto, e incluso crear un segundo maletero bajo el capó.

De manera similar se procede en el caso de la tracción total, basándose precisamente, en esta facilidad para instalar motores eléctricos sin que roben espacio. Pese a esto, la tracción total no está demasiado estandarizada entre los coches eléctricos más asequibles (por su coste). Debido a esto, en la actualidad, lo más fácil será encontrar vehículos con tracción delantera si se trata de utilitarios sin un corte deportivo que quieran destacar por la comodidad y la suavidad de conducción. Por el contrario, la tracción trasera se emplea en vehículos con un carácter algo más deportivo o de mayor potencia, con el que se consiguen más sensaciones durante el manejo del coche. (García, 2020)

Con esto, la tendencia actual es que la tracción trasera se acabe afianzando como la habitual, con la excepción de los de tracción delantera para vehículos de prestaciones más limitadas y reservando la tracción total para los vehículos de alta gama. (Callejo, 2018)

Por otro lado, también se podría disponer de más de un motor, dando lugar a las siguientes combinaciones posibles entre motor y eje: un único motor acoplado a un solo eje o a ambos, un motor para cada eje, un motor para cada rueda. Esta última configuración se muestra en la Figura 4.

Esta nueva tecnología permitirá una mejor capacidad de giro y, al mismo tiempo, una reducción del peso, aumentando en última instancia la eficiencia del coche eléctrico consiguiendo una mayor autonomía.

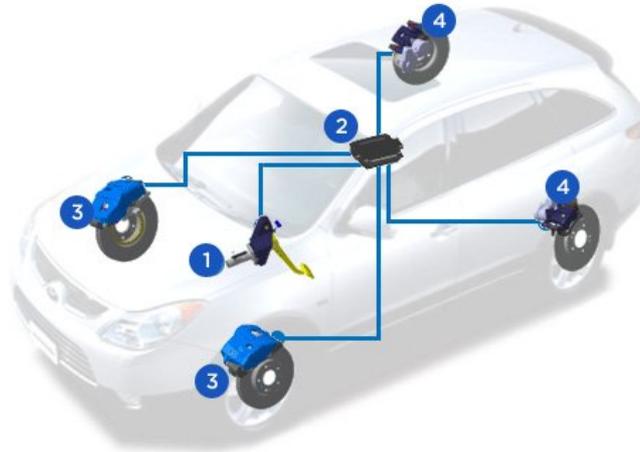


Figura 4 - Motores acoplados sobre las ruedas.

### 2.3. Resumen de las necesidades de los modelos implementados

A modo resumen de los componentes necesarios para implementar un coche eléctrico, se presenta en la Figura 5 la anatomía general de un vehículo tipo.

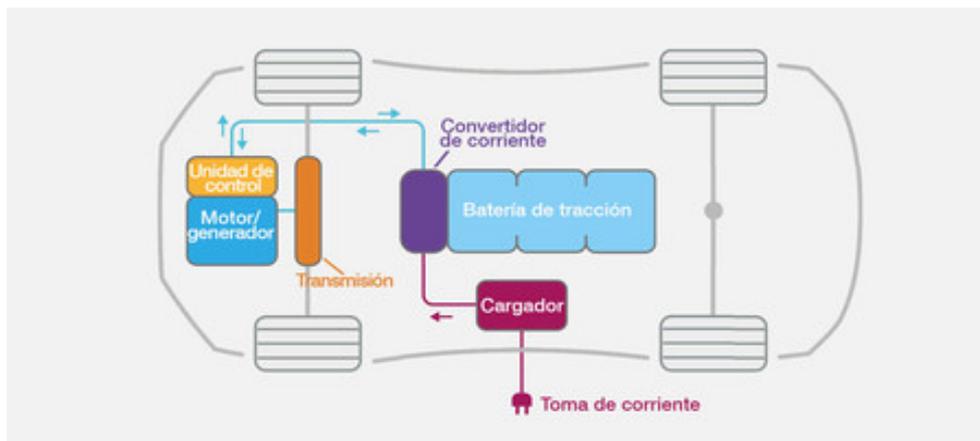


Figura 5 - Elementos de un coche eléctrico.

Por tanto, para modelar en un programa de simulación un coche eléctrico va a ser necesario que este aúne múltiples disciplinas de la ingeniería como son la electrónica de potencia para modelar batería, inversor y motor eléctrico, electrónica de control para el control de velocidad

del accionamiento eléctrico y mecánica, para modelar la transmisión de par y velocidad al eje motriz y la dinámica del vehículo.

Desde el punto de vista físico, se necesita que los motores eléctricos dispongan de unas prestaciones específicas de cara a la aplicación en la que se implementan. Es decir, deben ser motores dedicados a tracción y de una potencia y par lo suficientemente altos como para cumplir con los requerimientos que supone un coche eléctrico.

Además, el control implementado para cada motor debe estar muy bien ajustado para asegurar una alta precisión en el seguimiento de la velocidad de referencia. Esta velocidad viene dada por el ciclo de homologación europeo WLTP, que consta de una duración de treinta minutos.

También se va a observar a lo largo de este documento que la recarga de la batería ha supuesto unas limitaciones y condicionantes importantes para cada modelo implementado.

### 3. Planteamiento de alternativas y solución adoptada

En este apartado se va a analizar la distribución de los diferentes elementos que componen la estructura del vehículo eléctrico, sin entrar en componentes mecánicos como el chasis o la suspensión. Se han definido las posibles soluciones a implementar y se ha tomado la decisión de manera justificada de la elección de una de ellas para cada elemento del vehículo eléctrico sometido a estudio.

Como punto de partida se debe destacar la ausencia de cigüeñales, cilindros, pistones o sistema de escape pues al sustituir el motor de combustión por uno eléctrico, éstos ya no forman parte de la constitución del vehículo.

Conocido esto, las partes que caracterizan a un vehículo impulsado por un motor eléctrico son principalmente aquellas necesarias para transformar la energía eléctrica almacenada en las baterías en movimiento en las ruedas. A modo esquemático, la Figura 6 representa los elementos principales. (M., 2019)

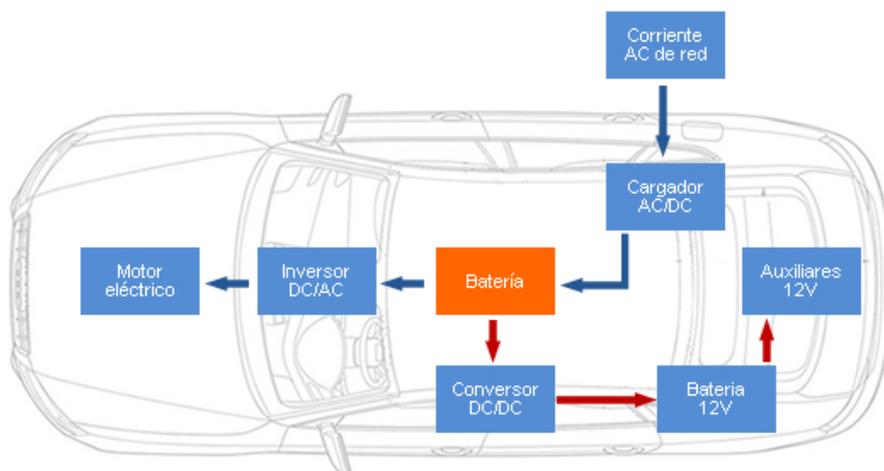


Figura 6 - Elementos principales de un coche eléctrico tipo.

Resulta importante conocer el comportamiento y las características de los elementos que se van a exponer a continuación para justificar la elección que se ha hecho de ellos para el modelo de simulación.

### 3.1. Software de simulación

En primer lugar, y como aspecto más importante, ha sido elegir el entorno software en el que desarrollar los modelos de coche eléctrico con motor de imanes permanentes y de inducción.

El programa a utilizar debía ser capaz de introducir bloques de electrónica de potencia, bloques de electrónica de control y bloques mecánicos. Además de aunar estos tres campos, también debía ofrecer un alto nivel de personalización para poder configurar los diferentes elementos de manera correcta.

Uno de los candidatos más conocidos es PSIM, que es un programa de simulación de circuito electrónico, diseñado específicamente para su uso en electrónica de potencia y simulaciones de motores. Con él se satisfacían las necesidades de la electrónica de potencia y control, siendo muy aconsejable para la aplicación de motores eléctricos como es el caso. Además, se trata de un programa sencillo y muy extendido, con el que se ha trabajado en otros proyectos. Sin embargo, está totalmente enfocado a parámetros eléctricos como tensiones, corrientes, etc., sin poder implementar un acople entre la parte eléctrica y la mecánica, la cual tampoco es modelable en este programa. Por ello, y puesto que tampoco se pretende profundizar en los parámetros eléctricos de los motores, se ha descartado su uso para la elaboración de este trabajo.

Otra alternativa era el software SimulationX, que se trata de un programa dedicado a modelar, simular y analizar sistemas mecánicos, hidráulicos, neumáticos, eléctricos y combinados. No deja de ser una aplicación de software de ingeniería asistida por ordenador (CAE) que permite la simulación física de sistemas mixtos como un vehículo eléctrico. Pero, presenta una importante desventaja y es que este programa está completamente enfocado a sistemas técnicos desarrollados y vendidos por la empresa alemana ESI Group. Debido a esto, se ha descartado su uso.

Por otro lado, encontramos Altair Activate, que se trata de un sistema de simulación multidisciplinar. Este programa es una plataforma de integración abierta y flexible para la simulación integral de sistemas y está basado en un entorno de modelado de diagrama de bloques híbrido para bloques de señales, componentes físicos orientados a objetos y sistemas eléctricos y electrónicos.

De manera similar a Altair Activate, se encuentran los softwares OpenModelica y Scilab Xcos.

Por un lado, OpenModelica es un entorno de modelado y simulación de código abierto y destinado al uso industrial y académico.

Por otro lado, Scilab Xcos es un editor gráfico para diseñar modelos de sistemas dinámicos híbridos en dominios de tiempo discreto y continuo. Puede constituir una solución eficiente

ya que proporciona funcionalidades para el modelado de sistemas mecánicos (automoción) y sistemas de control.

Por último, encontramos el programa Simulink de Matlab, que es un software de diagramas de bloques orientado al diseño basado en modelos. Simulink permite diseñar sistemas con modelos multidisciplinares y simularlos antes de aplicarlos al hardware (sin necesidad de escribir código). Entre sus aplicaciones se pueden encontrar la electrónica de potencia y los sistemas de control.

De entre todos los programas mencionados, se ha decidido utilizar Simulink, debido a que se trata del programa más extendido de los propuestos y se puede encontrar una gran cantidad de información para resolver problemas y dudas que han surgido al implementar los modelos. Otra ventaja añadida es la experiencia de uso con este programa sobre los demás, cuyo entorno resulta completamente desconocido.

### 3.2. Motor

El motor es, junto con la batería, la parte más importante de los componentes necesarios para el funcionamiento de un coche eléctrico puesto que de ambos dependen la autonomía y coste del vehículo.

Una vez obtenida la energía eléctrica con las especificaciones deseadas para alimentar correctamente el motor, éste es el encargado de transformar esta energía eléctrica en energía mecánica.

Los motores eléctricos se componen, a grandes rasgos, de la parte fija o estator en la que se inducen los campos magnéticos para dar impulso de giro a la parte móvil o rotor, donde se crea la potencia motriz y se transmite a las ruedas. Además, el motor puede invertir su trabajo, es decir, funcionar como generador y generar energía eléctrica cuando el automóvil frena.

La principal clasificación para los motores eléctricos se hace según qué tipo de corriente los alimenta. De esta manera, se clasifican en motores de corriente continua (DC) y en motores de corriente alterna (AC). En el caso de los vehículos eléctricos son los motores AC trifásicos los usados comúnmente, los cuales se pueden dividir en dos categorías: máquinas síncronas y asíncronas. En las máquinas síncronas, el rotor gira a la velocidad de sincronismo, mientras que, en las asíncronas, el rotor gira a velocidades cercanas, pero diferentes, a la de sincronismo. (Marti, 2012)

### 3.2.1. Motores asíncronos o de inducción

La característica principal de los motores asíncronos o de inducción es que el giro del rotor no corresponde a la velocidad de giro del campo magnético producido por el estator y todos estos componentes están dentro de la correspondiente carcasa, que tiene como misión protegerlos y contenerlos.

Este motor tiene las bobinas (trifásicas) situadas en el estator o carcasa, cada una desfasada  $120^\circ$ , como se muestra en la Figura 7.

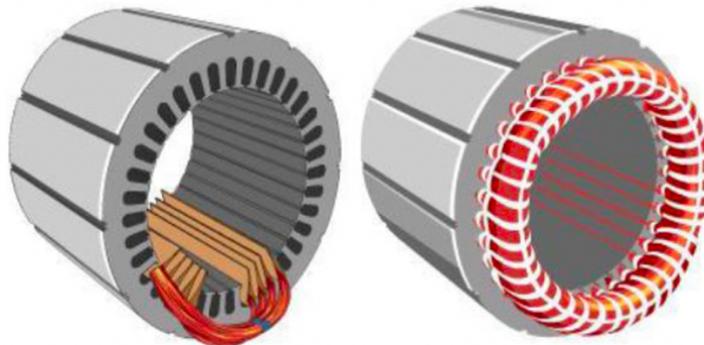


Figura 7 - Bobinado del estator.

Por otro lado, el rotor del motor de inducción (Figura 8) puede ser de tipo jaula de ardilla o bobinado, y presenta una alta eficiencia, un bajo coste y una gran fiabilidad.



Figura 8 - Rotor del motor de inducción.

Su funcionamiento se basa en el principio de inducción mutua de Faraday, el cual consiste en que al aplicar corriente alterna trifásica a las bobinas inductoras (en el estator), se produce un campo magnético giratorio de una frecuencia igual a la de la corriente alterna de alimentación. Este campo empieza a girar (a velocidad de sincronismo) alrededor del rotor cuando éste se encuentra parado (en reposo) lo que inducirá unas tensiones eléctricas que generarán unas corrientes en el rotor. Estas corrientes crearán a su vez un campo magnético que tiende a seguir el movimiento del campo magnético del estator, produciendo un par motor que hace que el rotor gire (principio de inducción mutua).

Con esta premisa, el término asíncrono se debe a que la inducción en el rotor sólo se produce si hay una diferencia en las velocidades relativas del campo del estator y del rotor, por lo que la velocidad del rotor nunca alcanza a la del campo del estator. El rotor nunca conseguirá alinearse completamente con el campo magnético generado por las bobinas, quedando permanentemente desfasado respecto a éstas (deslizamiento). (P., 2015)

De lo contrario, si ambas velocidades fuesen iguales, no habría inducción y el rotor no produciría par.

El uso de la jaula de ardilla, que normalmente está fabricada en aluminio, permite eliminar el uso de imanes permanentes, los cuales son costosos y de acceso complicado por el reducido número de países que disponen de los materiales para fabricarlos.

Entre las ventajas encontramos la alta eficiencia, bajo coste, fiabilidad, bajo ruido y par constante.

Por otro lado, también tienen una densidad de potencia baja, es decir, para el tamaño que tiene, su potencia es limitada en comparación con otros tipos de motores y par de arranque bajo.

### 3.2.2. Motor síncrono de imanes permanentes

El motor síncrono de imanes permanentes puede ser de dos tipos: de flujo radial (más extendidos) o de flujo axial, dependiendo de la posición del campo magnético, que puede ser perpendicular o paralelo al eje de giro del rotor, respectivamente.

Aunque menos usados, los de flujo axial permiten ser integrados directamente en la rueda del vehículo, optimizando el espacio y simplificando los acoplamientos mecánicos entre motor y rueda.

Este tipo de motor utiliza imanes permanentes (normalmente neodimio) incrustados en el rotor, bien en la parte interior o en la parte exterior de este, para crear un campo magnético constante (y flujo constante), como se puede observar en la Figura 9.

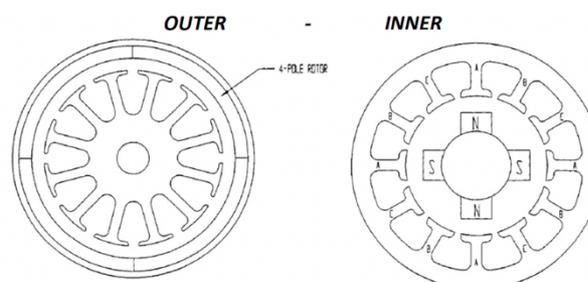


Figura 9 - Posición de los imanes en el rotor del motor.

El estator lleva devanados desfasados  $120^\circ$  conectados a una fuente de AC para producir un campo magnético rotatorio (como en un motor asíncrono). Cuando se alcanza la velocidad síncrona, los polos del rotor se bloquean en el campo magnético giratorio.

Por lo general, sustituyen a los motores de inducción si se requiere una mayor eficiencia, pues en estos no se da el fenómeno del deslizamiento.

Las ventajas de este tipo de motor son su alto rendimiento, pues no tiene pérdidas en el rotor (como sí tienen los asíncronos y los DC). Tampoco tienen contactos deslizantes como escobillas o colector, por lo que su mantenimiento es casi nulo. Apenas hace ruido y la vibración es mínima. Gracias al reducido tamaño de su rotor, son poco pesados, reduciendo su inercia y permitiendo una respuesta dinámica rápida.

La principal desventaja es que su coste es mayor en comparación con otros tipos de motores. (García, 2020)

### 3.2.3. Motor síncrono de reluctancia variable

Se define la reluctancia como la resistencia que un campo magnético debe enfrentar, por lo que el camino natural que seguirá el flujo magnético será el de menor reluctancia.

Se trata de un motor eléctrico (conocido por las siglas SRM, "Switching Reluctance Machine") cuyo rotor está hecho de un material magnético, pero sin llegar a ser imanes permanentes. Se puede ver en la Figura 10 y es similar a un motor de jaula de ardilla, excepto que el rotor presenta polos salientes (rotor dentado). El estator consiste en una serie de piezas polares conectadas a 3 fases.



Figura 10 - Motor SRM de tracción.

Cuando se alimenta el estator con una fuente AC, el motor se comporta como uno asíncrono de inducción, es decir, la corriente es conmutada entre las bobinas de cada fase del estator hasta crear un campo magnético que gira. Cuando el rotor alcanza una velocidad aproximadamente el 75% de la de sincronismo, se desconecta el devanado auxiliar del motor y se queda trabajando el devanado principal. Así, el motor sigue acelerando hasta casi alcanzar la velocidad de sincronismo, momento en el que aparece el par de reluctancia. El rotor se coloca en la posición de reluctancia mínima (los polos del rotor se alinean con los polos bobinados del estator), alcanzando la velocidad de sincronismo, momento en el que el par provocado por la inducción desaparece y domina el giro el par de reluctancia. (Felipe, 2014)

Este tipo de motor puede diseñarse para funcionar de manera más precisa que los motores de imanes permanentes y con un menor coste. Por otra parte, su rotor es de baja inercia, con lo que se mejora su respuesta dinámica, aunque tiene la desventaja de tener menor par motor que un motor eléctrico de imán permanente de similar tamaño.

#### 3.2.4. Motores seleccionados

En primer lugar, se han tomado los motores de corriente alterna frente a los de continua porque estos últimos son de potencia más comedida no apta para la presente aplicación.

De entre los diferentes motores de alterna, se ha decidido simular un modelo con motor síncrono de imanes permanentes y otro con un motor de inducción. La principal razón es que estos dos motores son los más implementados en la actualidad y la otra alternativa, el motor de reluctancia variable, está todavía en proceso de desarrollo de cara a introducirse en los coches eléctricos.

Cualquier otro tipo de motor se ha descartado por su escasa presencia en la industria automovilística actual.

### 3.3. Batería

Las baterías son elementos electroquímicos ya que la forma en que almacenan la energía eléctrica conlleva una reacción electroquímica entre el ánodo y cátodo. Este hecho provoca que se trate de un elemento crítico y la elección del tipo idóneo para un coche eléctrico es crucial, teniendo en cuentas las consecuencias en caso de accidente.

El flujo de electrones de ánodo a cátodo es la corriente eléctrica con la que se alimentará el motor tras las adaptaciones necesarias. Por supuesto, este flujo es reversible, produciendo la carga de la batería. (Litoral, 2014)

Se suele encontrar bajo el habitáculo distribuida uniformemente en forma rectangular. Su tamaño (peso y volumen) dependerá de la capacidad de ésta, aumentando considerablemente si se pretende que la autonomía sea elevada.

Además, también debe ser capaz de estar continuamente cargándose y descargándose, acusando una degradación mínima. (Martin, 2019)

Las características principales de estas baterías son (Cubero, 2014):

- De plomo y ácido. En estas baterías, el ánodo es plomo, el cátodo es un dióxido de plomo y el electrolito, ácido sulfúrico disuelto en agua.  
Se trata de la típica batería que podemos encontrar en el vehículo de combustión, pero lleva formando parte de los vehículos a motor desde el siglo XIX.
- Níquel - Cadmio. En estas baterías, el ánodo es un hidróxido de níquel y el cátodo es cadmio. Destacan por tener una larga vida útil.
- Níquel - Hidruro Metálico. Análoga a la anterior, pero sustituyendo el material del cátodo, es decir, cambian el cadmio por una aleación de hidruro metálico no contaminante. Este tipo de batería se observa en la Figura 11.  
Se empeoran mínimamente las prestaciones, pero a cambio se deja de usar un elemento tóxico y contaminante.
- Ion - Litio. Estas baterías usan como electrolito una sal de litio y su ánodo y cátodo son variables, siendo común un elemento de base carbono para el ánodo.  
Son costosas, pero tienen una elevada capacidad energética y aguantan un elevado número de ciclos de recarga.  
Se usan extendidamente en dispositivos electrónicos y en estos últimos veinte años, se han desarrollado (se han reducido costes de fabricación) hasta poder incorporarlas en los vehículos electrificados.



Figura 11 - Batería de coche eléctrico tipo de Níquel-Hidruro metálico.

Se han definido los diferentes tipos de batería por ser el componente que más controversia provoca en la actualidad y por la necesidad de elegir una para la simulación realizada.

Con estas premisas, las baterías de plomo-ácido son demasiado pesadas y de baja densidad energética, lo que la hace inviable como batería principal del vehículo eléctrico. La batería de níquel-cadmio no es una posibilidad en la actualidad por la alta toxicidad del cadmio. Su evolución a la batería de níquel-hidruro metálico sí se han incorporado en vehículos híbridos y eléctricos como es el Toyota Prius.

Por último, la batería de ion-litio se ha convertido en el estado del arte en la aplicación del coche eléctrico y, por tanto, es el tipo de batería elegido para componer el modelo de simulación. Se pueden encontrar en modelos de Nissan, General Motors, Tesla... (L. Jaime, 2011)

De manera análoga a la realidad, este elemento ha provocado ciertas limitaciones en la propia simulación que serán expuestas más adelante.

### 3.4. Control

Hoy en día, las máquinas eléctricas son los accionamientos eléctricos más extendidos en la industria, destacando el de imanes permanentes en los vehículos eléctricos. Debido a la necesidad de controlar estas máquinas, fueron surgiendo métodos de control que intentaban mejorar su comportamiento dinámico.

En primer lugar, surgieron los métodos escalares, los cuales eran relativamente sencillos pero pobres pues no se conseguía una respuesta adecuada. Para solventar esto, se desarrolló el control vectorial o de campo orientado (FOC, *Field-Oriented Control*, que se traduce como control de campo orientado), con el que sí se obtenían buenos resultados dinámicos. A medida que a este control se le exigían más variaciones de parámetros, su comportamiento empeoraba. No fue hasta los noventa cuando se desarrolló otro tipo de control denominado DTC (*Direct Torque Control*, que se traduce como "Control Directo de Par"). Este tipo de control es el más moderno en la actualidad y el más costoso, pero garantiza una buena respuesta dinámica frente a sistemas complejos.

En las máquinas asíncronas de inducción, la regulación de velocidad se caracteriza por la siguiente expresión:

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60 \cdot f_1}{p}(1 - s) \quad (1)$$

Dónde:

- $n$  es la velocidad de giro del motor [rpm].
- $n_1$  es la velocidad de sincronismo del motor [rpm].
- $s$  es el deslizamiento del motor [-].
- $f_1$  es la frecuencia de alimentación del motor [Hz].
- $p$ , es el número de pares de polos del motor.

Por tanto, para variar la velocidad, solamente podemos modificar 3 parámetros: el número de polos, el deslizamiento o la frecuencia de alimentación. La opción más viable y extendida por su sencillez es la de modificar la frecuencia de alimentación, haciendo uso de un variador de frecuencia (VSD).

El variador de frecuencia es un instrumento electrónico que alimenta eléctricamente un motor a una frecuencia variable por el usuario. Estos dispositivos se encuentran muy presentes en la industria y podemos diferenciar tres tipos: escalar, vectorial y de control directo de par.

Un VSD consta principalmente de la etapa rectificadora, la filtradora, inversora y de control como se puede ver en la Figura 12. Debido a la anatomía del vehículo eléctrico, el control se centrará en la etapa inversora y de control.

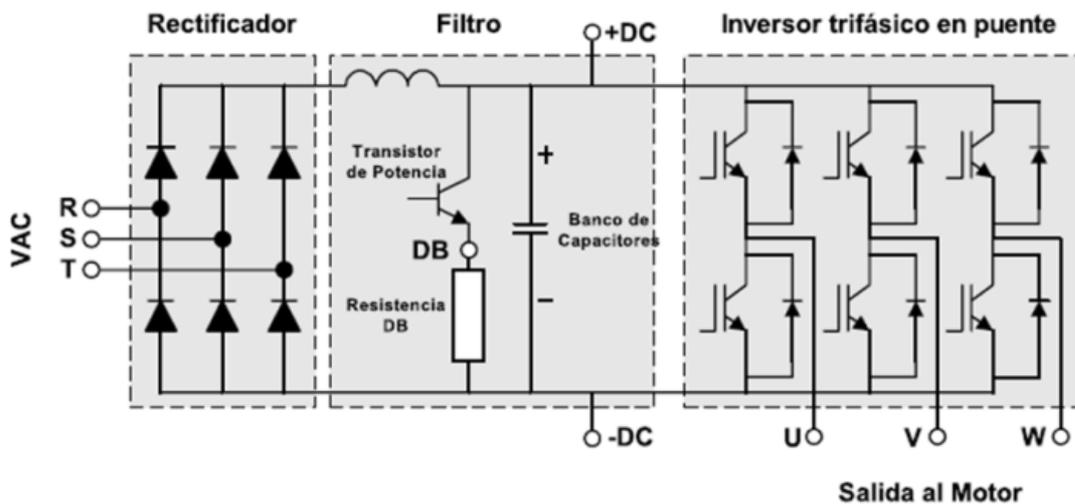


Figura 12 - Etapas de potencia de un VSD.

### 3.4.1. Control escalar

Se basa principalmente en mantener el flujo del entrehierro constante para controlar el par del motor para las velocidades por debajo de la de sincronismo. Entre los diferentes tipos de controles escalares, destaca el control de tensión de alimentación/frecuencia ( $V_s/f_s$ ), el cual se desarrolla con más detalle a continuación.

El Control Escalar  $V_s/f_s$  se basa en modificar la frecuencia de alimentación con la que se alimenta el estator de la máquina de inducción, ya que esta frecuencia modifica la velocidad de sincronismo del campo giratorio y por consiguiente la velocidad mecánica de giro cercana a la de sincronismo en función del deslizamiento.

$$E_s = 4.44 \cdot k_{ws} \cdot f_1 \cdot N_s \cdot \phi_m \quad (2)$$

Al despreciar las pérdidas en el estator, se puede aproximar  $E_s \sim U_1$ . De esta manera se obtiene que:

$$\phi_m = \frac{1}{4.44 \cdot k_{ws} \cdot N_s} \cdot \frac{E_s}{f_1} = k \frac{U_1}{f_1} \quad (3)$$

Para no saturar el núcleo magnético debido al aumento del flujo, se debe mantener el flujo constante, mediante la relación  $V_s/f_s$ . Por tanto, el par no depende de la frecuencia de alimentación, si no de la frecuencia del rotor, lo que supone que tanto el par máximo como la forma de onda de par frente a velocidad serán los mismos independientemente de la frecuencia de alimentación, como se refleja en la Figura 13.

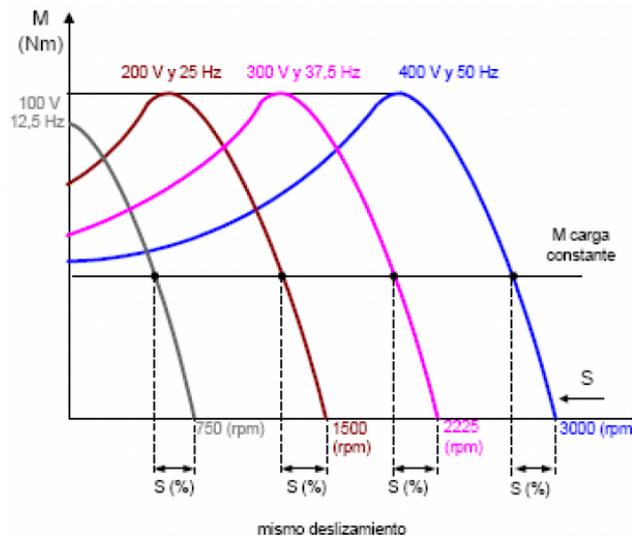


Figura 13 - Par frente a frecuencia de alimentación.

A medida que la frecuencia aumenta desde cero hasta la nominal, la tensión va incrementando hasta llegar a su valor asignado en la placa de características. Si se superan los valores nominales, el flujo no puede mantenerse constante, pues supondría superar la tensión máxima que marca el fabricante. En este caso, la frecuencia sí se puede seguir aumentando,

pero asumiendo que el flujo va a disminuir y provocando que la máquina trabaje en “campo debilitado”. En la Figura 14 se muestra el comportamiento descrito.

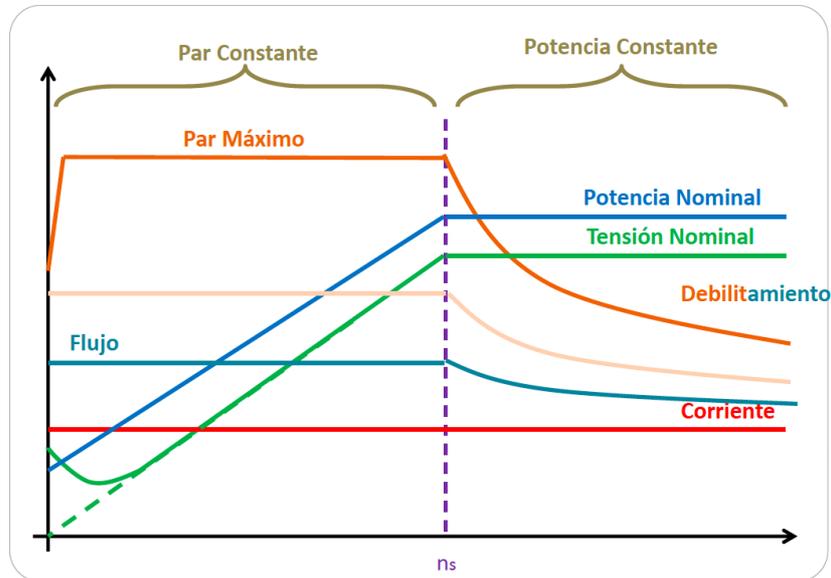


Figura 14 - Zonas de trabajo de la máquina eléctrica según su velocidad de giro.

Al superar la velocidad de sincronismo, el par se reduce en función de  $1/f$ , como se muestra en la anterior imagen, en la que se representan los diferentes parámetros del motor de inducción frente a la velocidad del rotor.

### 3.4.2. Control en bucle cerrado

Hasta ahora se ha visto un método de control en bucle abierto, muy sensible a perturbaciones y por tanto poco preciso. Por ello se desarrolla la regulación en bucle cerrado, que, pese a que sacrifica algo de estabilidad, solventa el problema de la precisión. De esta manera, se puede afirmar que las tres premisas básicas de control son la estabilidad, la velocidad de respuesta y la precisión.

En los sistemas regulados en bucle cerrado, el valor de la salida se compara con el de referencia, obteniendo una señal de error, que será la entrada del controlador. Este controlador genera a su salida la acción de control, que pretende disminuir el error y responder lo más rápido posible frente a perturbaciones. La Figura 15 muestra el diagrama de bloques correspondiente a un sistema en bucle cerrado.

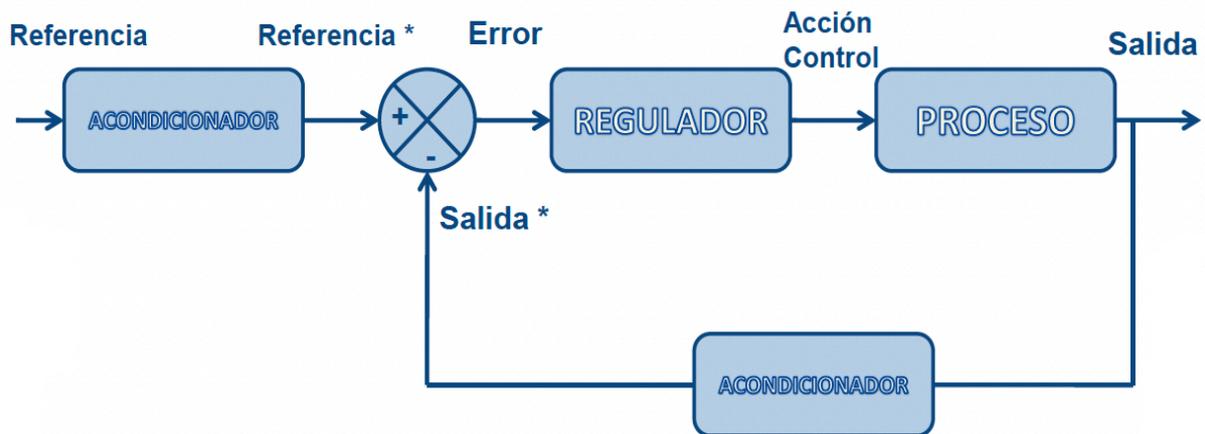


Figura 15 - Sistema en bucle cerrado.

El control puede ser: proporcional (P), integral (I), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD) y proporcional-integral-derivativo (PID). Cada uno aporta diferentes ventajas sobre la regulación del sistema, haciendo que, según la aplicación a controlar, un tipo sea más aconsejable que otro.

Así, en un control proporcional, la relación entre la acción de control (salida) y el error (entrada) es una ganancia denominada  $K_p$ . Al aplicar este tipo de control, se obtiene una señal de salida modificada en amplitud con respecto a la entrada, pero sin ninguna modificación en el tiempo.

Por otro lado, encontramos el control integral, en el que la salida es proporcional a la variación de la señal de error con respecto al tiempo, es decir, su integral. Cuando el valor del error es cero, la salida permanece constante. Su principal aplicación es corregir el error de "offset" existente en el control proporcional, pero puede provocar una respuesta más oscilante (aumenta la inestabilidad). Por ello, es muy común ver estos dos controles combinados en lo que se denomina control PI. En estos reguladores, la señal varía proporcional a la señal de entrada y a la integral con respecto al tiempo. Como se ha comentado, con este control se puede reducir el error en régimen permanente a cero pues mientras exista error, la acción integral va a tratar de eliminarlo. La acción integral se ajusta mediante el tiempo integral ( $T_i$ ) que es su parámetro identificativo.

También se puede combinar la acción proporcional con acción derivativa, dando lugar a un control PD. La acción diferencial del regulador PD es una acción de tipo anticipativo, ya que actúa según el valor instantáneo de la pendiente de la curva del error  $e(t)$ , detectando anticipadamente si va a existir una sobreoscilación excesiva y proporcionando una acción de control adecuada para evitarla antes que ésta tenga lugar. La acción derivativa se ajusta mediante el tiempo derivativo ( $T_d$ ) que es su parámetro identificativo.

Si se combinan las tres acciones de control se obtiene un control PID (Figura 16), aunando las ventajas que ofrecen cada una por separado. El regulador PID consigue la estabilidad de un PD con la ausencia del error en régimen permanente del control PI.

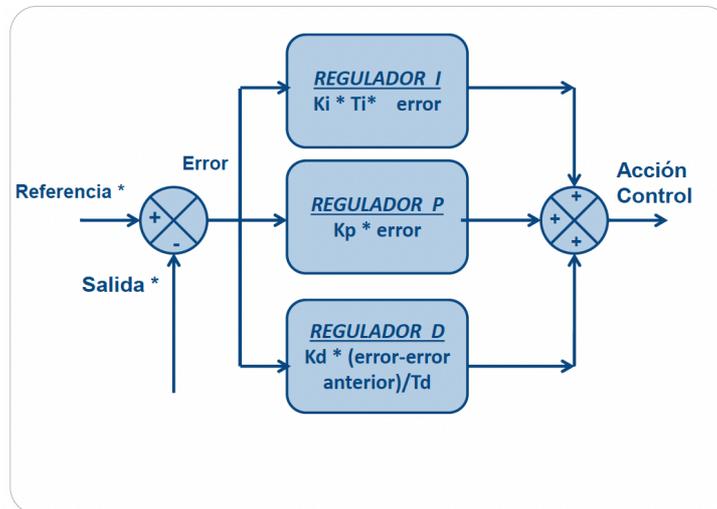


Figura 16 - Diagrama de bloques de las tres acciones de control.

En la siguiente tabla se muestran los diferentes controles en bucle cerrado expuestos junto con su acción de control tipo y la función de transferencia de la planta del regulador.

Control	Acción de control $u(t)$	Función de transferencia $U(s)/E(s)$
P	$K_p \cdot e(t)$	$K_p$
I	$\frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) dt$	$\frac{1}{T_i \cdot s}$
PI	$K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) dt$	$K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s}\right)$
PD	$K_p \cdot e(t) + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$	$K_p \cdot (1 + T_d \cdot s)$
PID	$K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) dt + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$	$K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s\right)$

### 3.4.3. Control vectorial FOC

El control de campo orientado (en “Field Oriented Control”, FOC) es un tipo de control vectorial en el que, a diferencia del control escalar, no sólo se tienen en cuenta las magnitudes y frecuencias, si no también la posición angular del rotor, que afecta al par electromagnético. Una característica común es que, en ambos métodos, escalar y vectorial, el flujo del rotor es constante.

El control vectorial se desarrolló de cara a mejorar el comportamiento dinámico del control escalar, de hecho, su objetivo en máquinas eléctricas es que el par interno del motor responda lo más rápido posible a la demanda de par para alcanzar la velocidad de referencia.

De esta manera, sus principales ventajas son:

- Rápida respuesta de par.
- Control preciso de velocidad.
- Par máximo incluso a velocidad nula.
- Relativamente sencillo.

Este control se basa en desacoplar la corriente del estator y el flujo del rotor para realizar el control de par. En la Figura 17 se muestra un esquema genérico en el que se incluye el bloque de control FOC y la regulación de velocidad se realiza de manera externa, aunque es común encontrarla incluida en el control FOC.

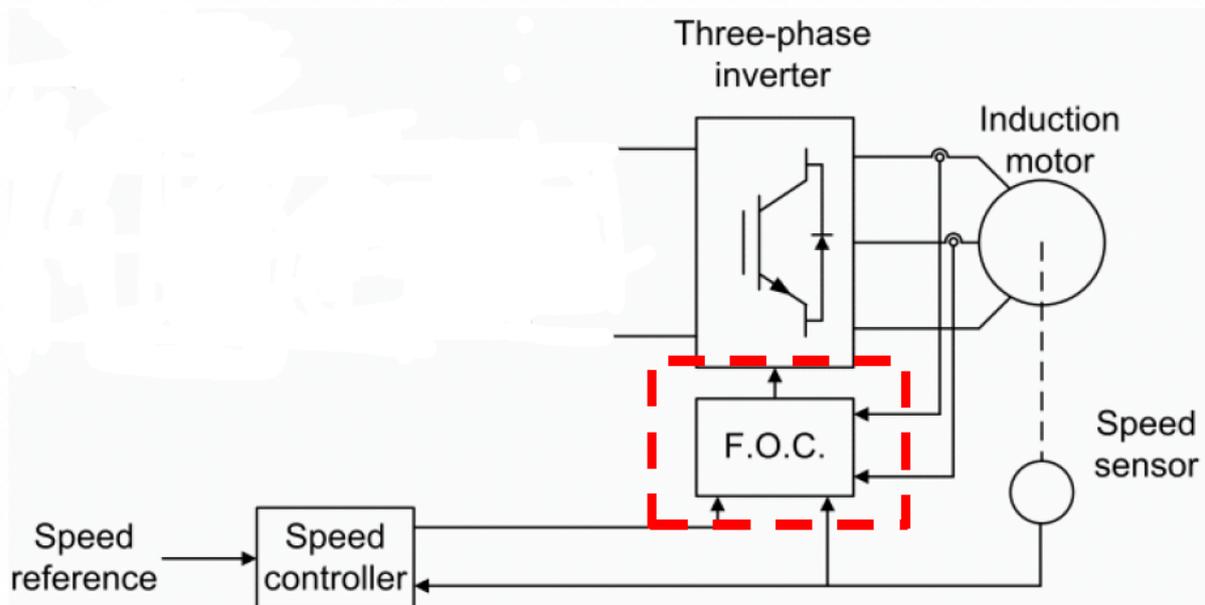


Figura 17 - Esquema general del control FOC.

Además, podemos distinguir dos métodos de control FOC, el directo e indirecto, cuya principal diferencia es la forma de determinar el ángulo del flujo del rotor.

En el método directo es necesario conocer el flujo del estator, del entrehierro o del rotor y estas magnitudes se pueden medir o estimar a partir de las corrientes del estator.

Por su parte, en el método indirecto se utiliza la medida de la velocidad del rotor y una estimación del deslizamiento en el caso de los motores asíncronos, para obtener la posición del rotor.

El esquema detallado del control FOC se muestra en la Figura 18, y en el que, las corrientes son medidas comúnmente con sensores de efecto Hall.

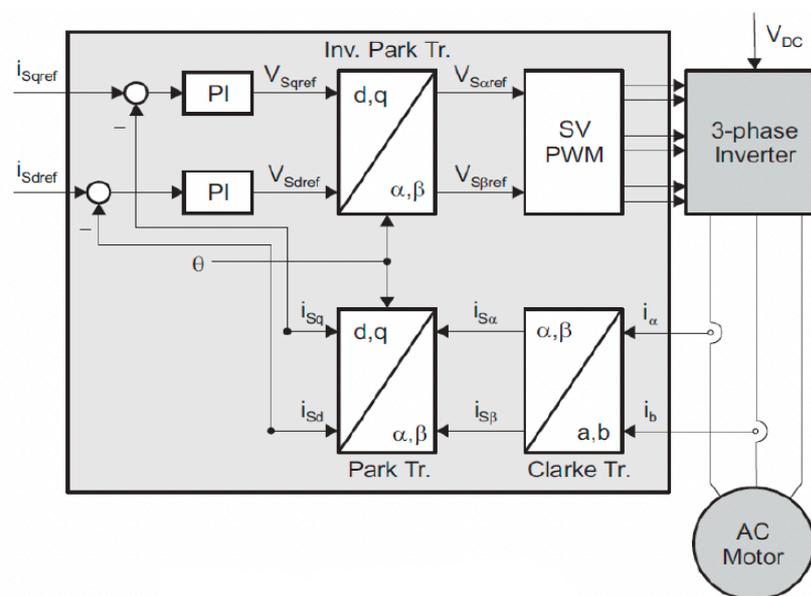


Figura 18 - Diagrama de bloques de control FOC directo.

Como se observa en la Figura 18, el primer paso del control vectorial es medir al menos dos corrientes de fase (la tercera se obtendría de manera directa al tratarse de un sistema balanceado). Esto supone partir de un sistema trifásico, el cual se convertirá en un sistema bifásico tras aplicar la transformación Clarke. En este momento se obtiene un sistema de coordenadas estacionario ( $\alpha$ ,  $\beta$ ), encontrándose el eje  $\beta$  adelantado  $90^\circ$  respecto al eje  $\alpha$ . Estas componentes,  $\alpha$  y  $\beta$ , son combinación de las corrientes de fase, tienen la referencia en el estator y dependen del tiempo y la velocidad.

Para obtener un sistema con referencia en el rotor es necesario realizar otra transformación, la de Park. Con ella, el sistema bifásico estacionario de corrientes se convierte en un sistema bifásico rotativo (d, q).

Al eje “d” se le denomina eje directo, mientras que al eje “q” se le conoce como eje de cuadratura. En régimen permanente, las componentes de la corriente  $I_s$  son constantes. En la Figura 19 se representan las transformaciones definidas.

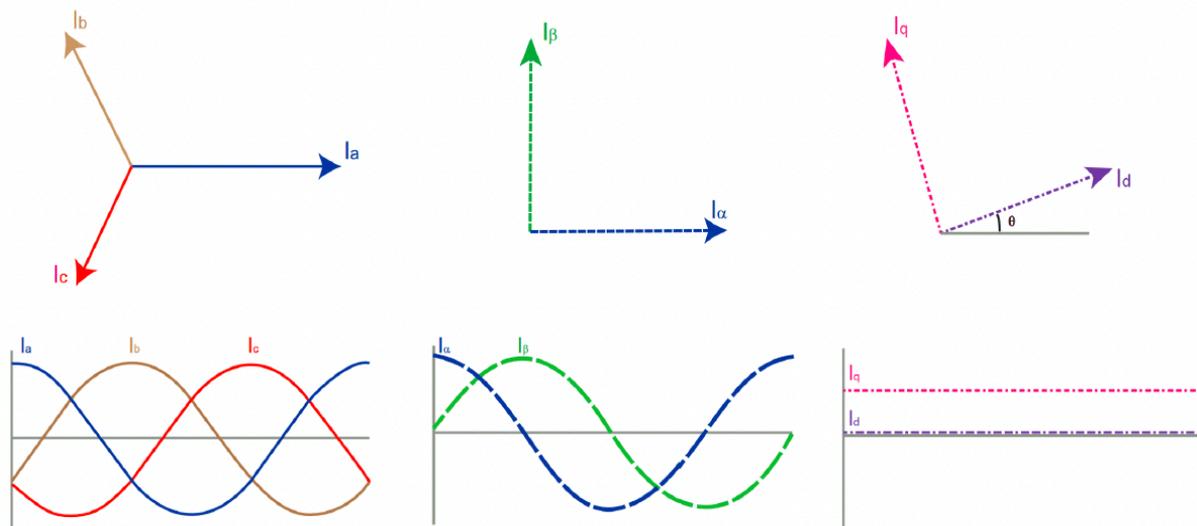


Figura 19 - Transformadas de Clarke y Park.

Para realizar estas transformaciones es necesario conocer la posición del flujo del rotor. En los PMSM este parámetro es igual a la velocidad del rotor por lo que se puede medir de forma directa. En los ACIM, al haber deslizamiento, es necesario calcularlo mediante un modelo matemático.

Si echamos un vistazo al modelo general del control FOC, tal y como se muestra en la Figura 20, se observa que las corrientes obtenidas de las transformaciones se utilizan para obtener el error con respecto a las referencias, y tras esto, realizar la regulación idónea.

En el caso más general, los reguladores empleados son PI, con ellos se regula la velocidad, el flujo ( $I_d$ ) y el par ( $I_q$ ). Como se ha explicado en apartados anteriores, el término proporcional elimina el error general, pero es el término integral con el que se elimina el error de “offset”.

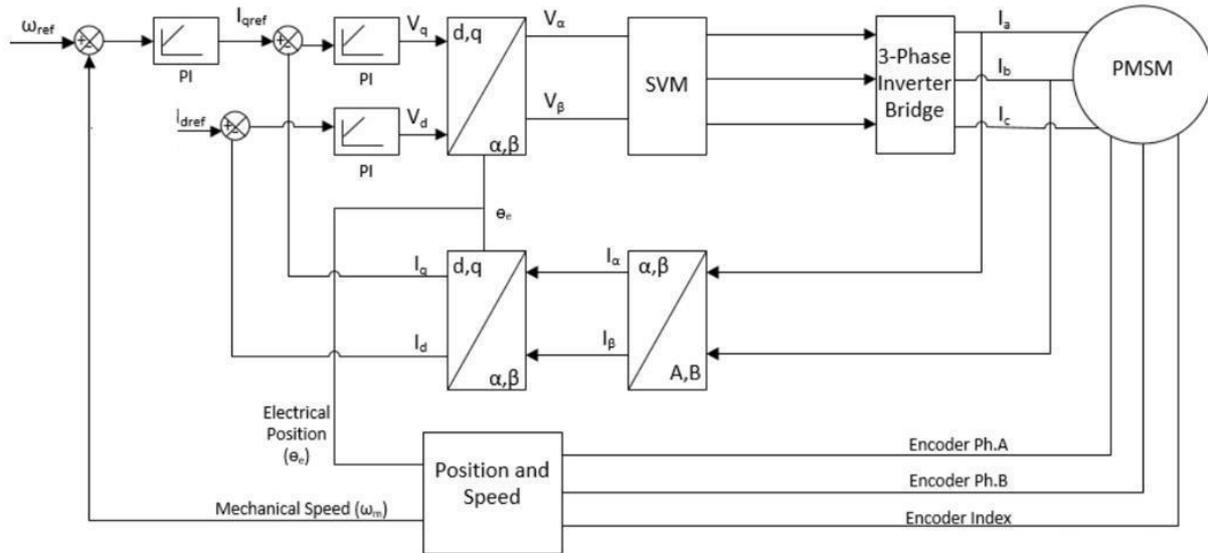


Figura 20 - Modelo general del control FOC.

Tras la regulación de par y flujo se obtienen las tensiones  $V_q$  y  $V_d$ , a las que se les realiza la transformada inversa de Park. Este paso es necesario para volver a trabajar con un sistema de coordenadas estacionario  $(\alpha, \beta)$ , donde el eje  $\beta$  se encuentra adelantado  $90^\circ$  respecto al eje  $\alpha$ . Estas tensiones  $U_\alpha$  y  $U_\beta$  serán las entradas de la modulación de espacio vectorial PWM (SVPWM).

Se elige este tipo de modulación frente a la extendida técnica sinusoidal PWM debido a que genera menos armónicos y puede aumentar hasta en un 15% la tensión de línea, reduciendo la corriente para una misma potencia. Esto supone reducir las pérdidas de conmutación y, por tanto, el coste.

En la Figura 21 se muestra la comparativa entre vectores de referencia de estas dos técnicas.

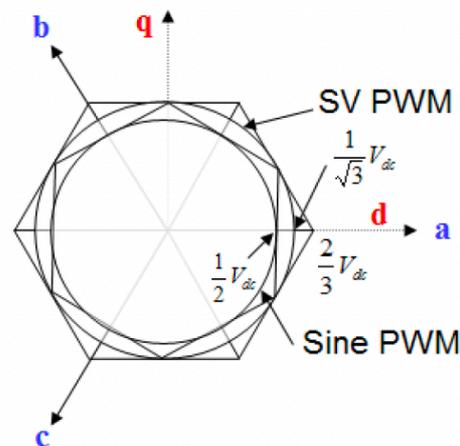


Figura 21 - Comparativa entre SVPWM y SPWM.

En ella se puede observar como el radio para el PWM senoidal es de 0,5Vdc mientras que, en el SVPWM, el radio es de 0,577Vdc. Este hecho justifica el aumento del 15,4% de la tensión de línea.

Las tensiones resultado de la transformada inversa de Park son las entradas al vector de espacio, el cual produce una salida de los 8 estados posibles que se introduce directamente a los transistores del inversor. En la Figura 22 se muestra el vector de espacio tipo.

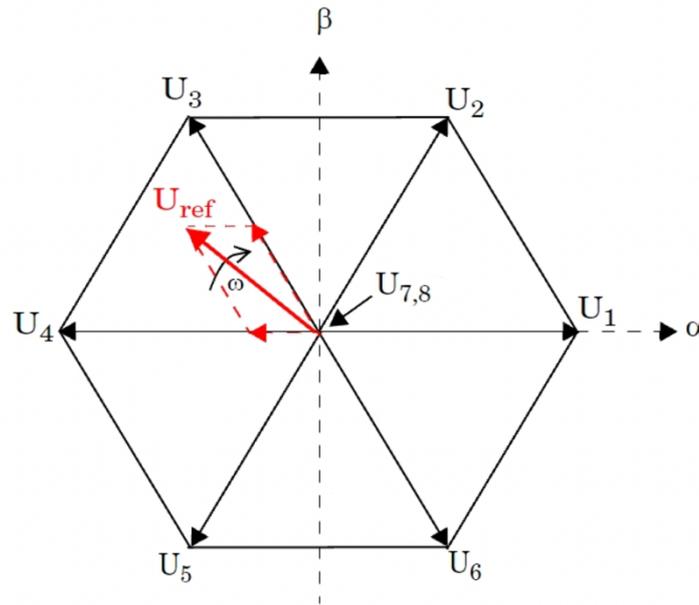


Figura 22 - Vector de espacio tipo.

Los vectores  $U_7$  y  $U_8$  implican que la salida de tensión hacia el motor es nula.

La posible combinación de vectores da lugar a la siguiente tabla de estados:

Vector	Fase C	Fase B	Fase A
$U_1$	0	0	1
$U_2$	0	1	1
$U_3$	0	1	0
$U_4$	1	1	0
$U_5$	1	0	0
$U_6$	1	0	1
$U_7$	0	0	0
$U_8$	1	1	1

Por tanto, el bloque de modulación SVPWM, determinará la tensión de referencia  $U_{ref}$  a partir de las componentes  $U_\alpha$  y  $U_\beta$ . Tras esto, obtendrá el tiempo de conmutación de cada uno de los transistores generando las señales de disparo de estos.

En la Figura 23 se muestran todas las transformaciones que se realizan en control FOC.

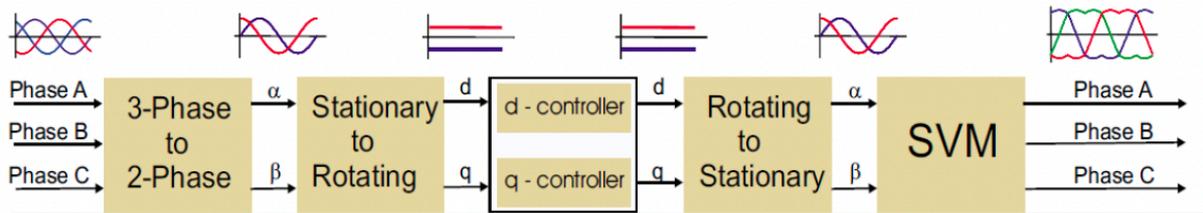


Figura 23 - Transformaciones del control FOC.

#### 3.4.4. Control DTC

Con el fin de mejorar el comportamiento dinámico del accionamiento eléctrico se desarrolló una nueva estrategia de control basada en la adaptación de los parámetros de la máquina eléctrica. Esta estrategia de control es denominada como “Control directo de par” o DTC por sus siglas en inglés (“Direct Torque Control”).

Este control se basa en el estado electromagnético del motor, prediciendo el flujo y par de la máquina eléctrica.

El flujo del estator y el par electromagnético se definen como:

$$\psi_s = \int (\bar{V}_s - \bar{I}_s \cdot R_s) \cdot dt \quad (4)$$

$$T_e = \left( \frac{3 \cdot P \cdot L_M}{2 \cdot \sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot L_s \right) \cdot |\psi_s| \cdot |\psi_r| \cdot \text{sen} \gamma \quad (5)$$

Donde  $\sigma$  es el coeficiente de dispersión y  $\gamma$  es el ángulo entre el flujo del rotor y del estator.

De esto, se deduce que si los módulos de los flujos son constantes, el par va a depender del ángulo que formen, siendo máximo para el valor de  $90^\circ$ .

Además, el flujo puede ser controlado por la tensión aplicada al estator del motor. Esta tensión provoca un incremento en el flujo del estator que, al sumarlo al flujo original, se obtiene un vector de mismo módulo, pero posición diferente, como se puede ver en la Figura 24.

Este cambio de posición induce también un cambio en el flujo del rotor, y, por lo tanto, un cambio en el ángulo  $\gamma$ , es decir, se modifica el par del motor.

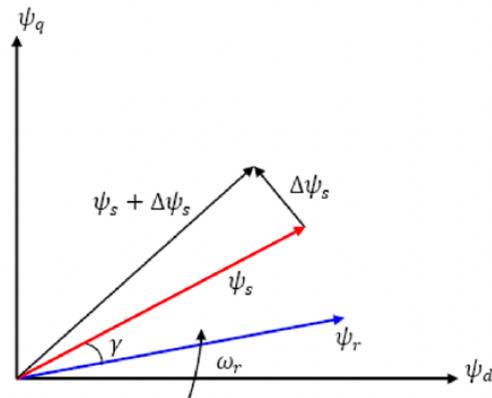


Figura 24 - Flujo de estator y rotor.

Por tanto, el control se basará en elegir el vector de tensión correcto a aplicar mediante los transistores del inversor. Estos vectores se representan en la Figura 25.

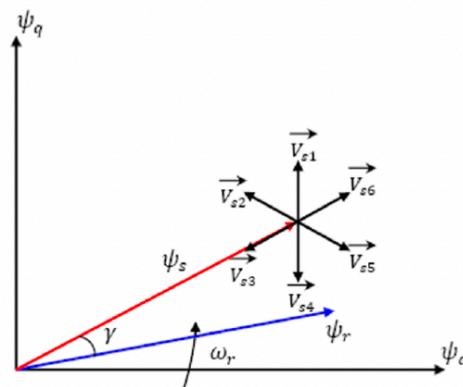


Figura 25 - Vectores de tensión de control.

Estos vectores son sencillos de implementar pues existen tablas predefinidas con los correspondientes disparos de los IGBT para obtener estos vectores de tensión como la que se puede ver a continuación:

Estado/Vector	S <sub>a</sub>	S <sub>b</sub>	S <sub>c</sub>
0	OFF	OFF	OFF
1	ON	OFF	OFF
2	ON	ON	OFF
3	OFF	ON	OFF
4	OFF	ON	ON
5	OFF	OFF	ON
6	ON	OFF	ON
7	ON	ON	ON

Mediante estas tablas de conmutación se obtiene el vector de tensión óptimo.

De esta manera, ofrece la respuesta de par más rápida de entre los diferentes controles mencionados, la capacidad de controlar el par a bajas frecuencias, desde velocidad cero y gran linealidad de par.

El DTC consiste en calcular los valores instantáneos del par y del flujo a partir de las variables del estator del motor. Ambos se controlan de manera independiente y haciendo uso de reguladores, de manera análoga al control FOC.

El diagrama general se puede apreciar en la Figura 26.

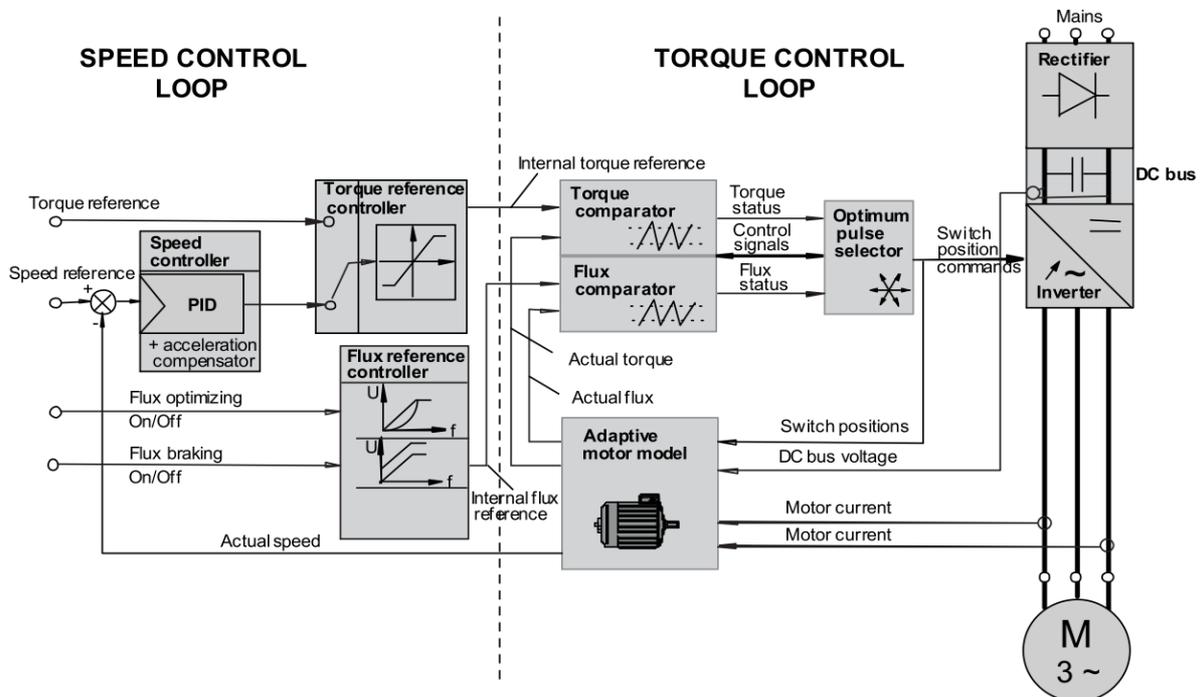


Figura 26 - Diagrama de bloques de control DTC.

Se observa que esta estrategia de control está compuesta por dos bucles de control, uno de par y otro de velocidad.

Con respecto al bucle de control de par, en primer lugar, se toman las corrientes del estator de la máquina y se introducen en un modelo matemático avanzado del que se obtiene la velocidad del rotor, el flujo real y el par electromagnético real del motor. Los parámetros de flujo de y par se comparan con las señales de referencia y el error obtenido de cada uno de ellos entra a los reguladores PI. Con estas señales se obtienen los pulsos de disparo del inversor.

En cuanto al bucle de velocidad, está compuesto por un regulador PID de velocidad cuya entrada es el error obtenido de comparar la velocidad de referencia con la velocidad obtenida mediante el modelo adaptativo. Además, mediante la salida de este regulador, se controla el par de referencia.

Como principales ventajas respecto al control FOC, se encuentran la orientación de campo sin necesidad de realimentación y la ausencia de modulador. Tampoco requiere transformaciones trigonométricas (Clarke y Park) ni controladores PI de corriente.

### 3.4.5. Control elegido

Para el de imanes permanentes se ha decidido implementar un control vectorial FOC frente a uno más impreciso como el escalar o uno de mejor respuesta dinámica como el DTC. Esto se debe a que se considera que con este control se consigue un resultado lo suficientemente bueno como para no optar por el DTC que supone un mayor coste.

Por otro lado, para el motor de inducción se ha optado por un control más sencillo en bucle cerrado y de teórica peor respuesta dinámica. El fin de esta decisión es comprobar que, efectivamente, el control más aconsejable sea uno de tipo vectorial por obtener mejores resultados.

El control escalar se ha descartado ya que, pese a tener un coste muy bajo y ser muy sencillo al no necesitar realimentación, se ignora el estado del motor y no se puede controlar el par, que dependerá de la carga y se reducirá considerablemente a bajas velocidades. Como desventaja adicional, es excesivamente sensible a perturbaciones y por tanto poco preciso.

De entre los reguladores expuestos, se ha decidido hacer uso de reguladores PI pues el regulador P, aunque es simple, es común que se produzca un error en estado estable (“offset”) que supone una desviación permanente, por lo que no es viable para la aplicación que se acomete. Los reguladores PD son incapaces de eliminar el error en estado estacionario, lo que los convierte en una opción inválida. Por último, el regulador PID es el más complicado de ajustar y, se considera que la aplicación a estudio, el control PI es suficiente.

### 3.5. Transmisión

En los vehículos eléctricos la transmisión del par motor a las ruedas se realiza de forma mucho más sencilla que en un vehículo de combustión. Esto se debe principalmente a que los vehículos eléctricos generan su par máximo desde 0 rpm, lo que supone que no necesiten de caja de cambios convencional, por lo que carecen de los piñones necesarios para las distintas marchas. Además, debido al tamaño del motor eléctrico, éste se puede situar sobre el eje motriz, por lo que el acoplamiento no necesita árboles de transmisión.

Con estas premisas, el elemento principal de la transmisión es un grupo reductor, que equivale a una caja de cambios de una única relación de velocidades fija (normalmente) y consiste en una caja de engranajes que parte del eje del motor eléctrico, disminuye su velocidad de giro y reparte la fuerza entre los ejes de salida.

Esta relación se mantendrá invariable ya se encuentre el vehículo parado con el motor a 0 rpm, o cuando se esté circulando a velocidad máxima.

La relación de las vueltas del motor respecto las vueltas que da el árbol de salida dependen de cada fabricante, estando la mayoría entre 6:1 y 10:1.

Aparte del grupo reductor, que consiste básicamente en piñón y corona, también se añade un mecanismo diferencial, el cual puede ser abierto simple (como los usados por Tesla) o antideslizamiento.

Un diferencial es el elemento mecánico que permite que las ruedas derecha e izquierda de un vehículo giren a distinta velocidad, según este se encuentre tomando una curva hacia un lado o hacia el otro. Esto provoca un ajuste en la velocidad relativa entre los ejes. Por lo tanto, la función de un diferencial automotriz es permitir la transmisión de la potencia del motor a las ruedas mientras que el automóvil sigue una trayectoria curva. En esta circunstancia, las ruedas que quedan en la parte interna de la curva recorren una menor distancia y, por lo tanto, giran a menor velocidad que las ruedas que van por fuera.

El diferencial consta de engranajes dispuestos en forma de "U" sobre el eje como se muestra en la Figura 27. Cuando ambas ruedas recorren el mismo camino, por ir el vehículo en línea recta, el engranaje se mantiene en situación neutra. Sin embargo, en una curva los engranajes se desplazan ligeramente, compensando con ello las diferentes velocidades de giro de las ruedas. (Aranguren, 2018)

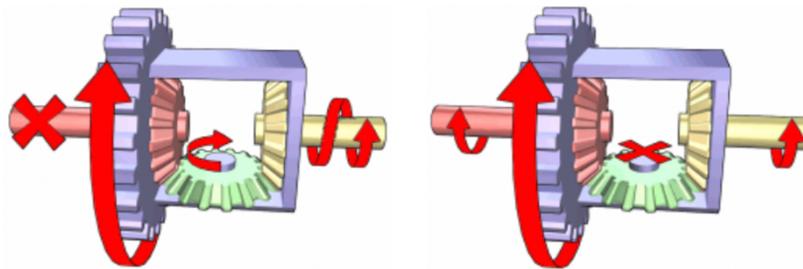


Figura 27 - Mecanismo diferencial.

La diferencia de giro también se produce entre los dos ejes. Las ruedas directrices describen una circunferencia de radio mayor que las no directrices, el diferencial también solventa esta limitación.

Un vehículo con tracción en las cuatro ruedas puede tener hasta tres diferenciales: uno en el eje frontal, uno en el eje trasero y un diferencial central.

Por otra parte, también podemos encontrar sistemas diferenciales a base de doble corona como se puede ver en la Figura 28.

De manera análoga a los vistos anteriormente, estos permiten que el motor transmita su potencia a las ruedas que pueden girar a la misma velocidad cuando el vehículo va en línea recta y a velocidades diferentes cuando va en curva.

Su funcionamiento consiste en dejar una de las coronas fijas y la otra libre, es decir, si dejamos que una de las coronas permanezca fija mientras hacemos que la otra gire un ángulo definido, se provoca un desfase entre el eje de entrada y el de salida; mientras que, si en lugar de eso, hacemos que la corona libre gire a velocidad constante, crearemos una diferencia permanente entre las velocidades de los dos ejes. (Rivera, 2018)

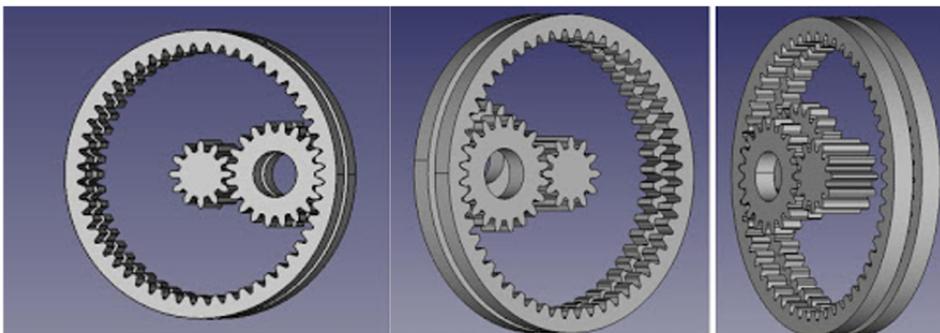


Figura 28 - Sistema diferencial de doble corona.

### 3.5.1. Elección del tipo de transmisión

En este apartado se ha visto que, a grandes rasgos, la parte mecánica no dispone de tantas alternativas. Por supuesto, esto no sería así de profundizar en la mecánica del automóvil, pero no es objeto de este trabajo.

Por tanto, en primer lugar, se ha decidido que, siguiendo la tendencia actual, la transmisión del vehículo sea de una sola velocidad y con una relación de transmisión fija.

El motor se acopla al eje delantero del coche, ya que los modelos de coche diseñados reflejan un automóvil utilitario, y las tracciones trasera y total se reservan para vehículos con mejores prestaciones y de gama más alta, implicando un mayor coste.

De manera interna, lo que se encuentra en la transmisión del vehículo eléctrico es un reductor de velocidad y un mecanismo diferencial en forma de “U”, que se ha elegido por delante del mecanismo de doble corona por no estar tan implantado en la mecánica actual.

## 4. Descripción de la solución adoptada

Como se ha desarrollado durante el presente trabajo, el objetivo final es desarrollar modelos en Simulink (programa Matlab) de un vehículo eléctrico impulsado por un motor de imanes permanentes y compararlo con uno similar pero que incorpora un motor de inducción.

Para poder implementar lo más fielmente posible todos los elementos que componen a un coche eléctrico tipo ha sido necesario realizar el trabajo de investigación expuesto en los puntos anteriores.

Gracias a toda la información recopilada se han podido diseñar los modelos que se presentan a continuación.

### 4.1. Modelo con motor de imanes permanentes

El modelo completo de coche eléctrico implementado con motor síncrono de imanes permanentes se puede ver en el plano P1 del apartado Planos de este trabajo.

Este esquema aparentemente sencillo se divide en subconjuntos según la función que desempeñan dentro del propio modelo.

De esta manera, en la parte izquierda se puede observar la parte de control del motor eléctrico, destacando en la esquina superior el ciclo de homologación WLTP y a su lado se observa el bloque “Longitudinal Driver” que también realiza una función de control como se detallará más adelante.

Por su parte, en la parte superior derecha se encuentra el conjunto de potencia, es decir, la batería, el inversor trifásico y el motor de imanes permanentes.

En la parte central se puede observar el subconjunto que contiene la transmisión y la dinámica del vehículo que dará lugar al movimiento del coche.

Por último, en la esquina inferior derecha se encuentran los resultados obtenidos.

Junto a este modelo, se ha realizado un “script” muy sencillo y breve en el que se inicializan las variables a usar en el modelo que se muestra en la Figura 29.

```
%% Tiempo de muestreo
Ts=5e-6;
```

```
%% Variables Vehiculo
```

```
m=1495;
ro=1.225;
Cd=0.24;
fr=0.032;
Af=2.35;
g=9.81;
alfa=0;
w_r=631.9/2;
v=36.11;
i3=6000/1175.38;
i2=4000/1175.38;
```

Figura 29 - Variables en "script" de los modelos implementados.

Se puede observar que se definen principalmente el tiempo de muestreo ( $T_s$ ) y los parámetros referidos al coche y su dinámica.

Además, la simulación se ha realizado con un paso fijo igual a  $T_s \cdot 3$  y el solver "ode4 Runge-Kutta".

A continuación, se detallan todos los subconjuntos mencionados.

#### 4.1.1. Ciclo de homologación WLTP

Tras haberse mencionado en múltiples ocasiones a lo largo de este trabajo, la velocidad de referencia no se ha tomado arbitrariamente si no que procede del ciclo WLTP, el cual es un procedimiento estándar para determinar el consumo y emisiones de los coches.

Este sustituye al ciclo NEDC y las principales diferencias entre ambos se reflejan en la siguiente tabla:

Tipo de ciclo	NEDC	WLTP
Distancia	11 km	23,3 km
Duración	20 min.	30 min.
Temperatura	20-30° C	14-23° C
Velocidad media	33,6 km/h	46,5 km/h
Velocidad máxima	120 km/h	131 km/h
Paradas	9	14
Cambios de marcha	Prefijados	Variables

<b>Velocidad constante</b>	475 s	66 s
<b>Tiempos de aceleración</b>	247 s	789 s
<b>Tiempos de frenado</b>	178 s	280 s
<b>Tiempo al ralentí</b>	280 s	226 s

Se observa que la duración del ciclo WLTP es mayor, así como su velocidad máxima. A grandes rasgos se puede afirmar que consigue resultados más acordes a la realidad.

En la Figura 30 se puede ver la comparativa entre las velocidades que debe seguir el coche sometido a prueba según un ciclo u otro.

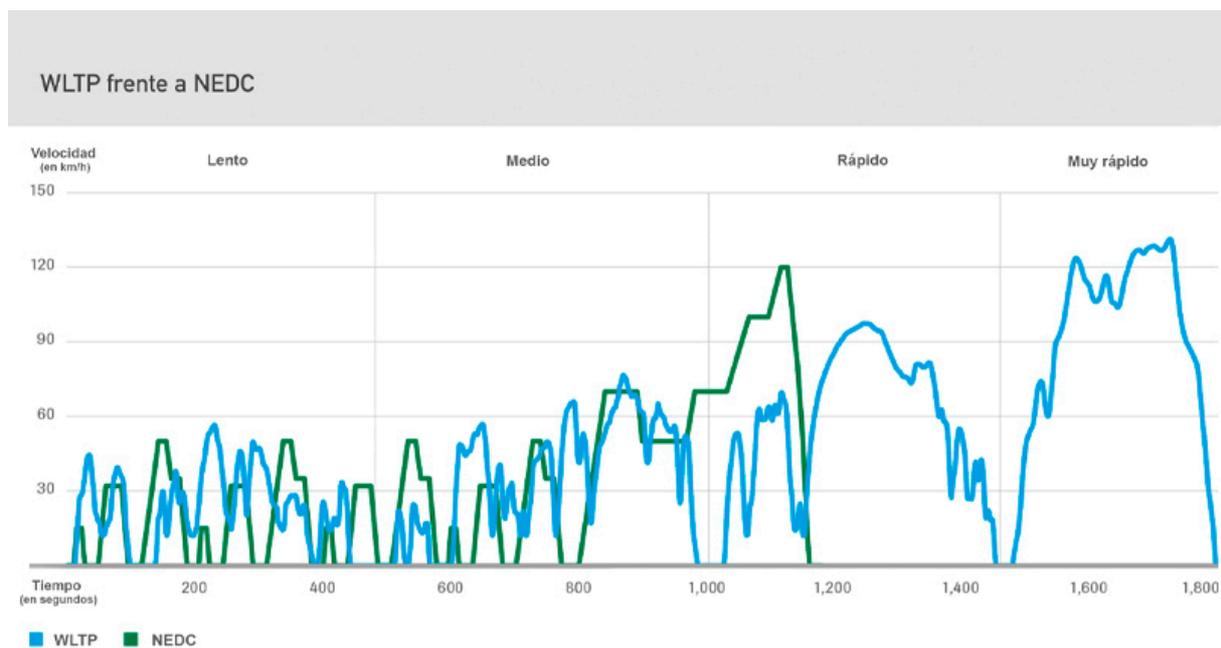


Figura 30 - Comparativa de ciclos WLTP y NEDC.

En el caso del coche eléctrico, el parámetro principal a medir es la autonomía que ofrece la batería, dejando de lado otros como las emisiones de CO<sub>2</sub> pues el coche eléctrico no produce este gas de manera directa.

La medición del consumo se hace con la batería cargada al máximo cuando comienza la prueba. Al acabar, el coche se vuelve a cargar y se mide la energía que ha gastado, que es la necesaria para volver a cargar al máximo la batería (incluyendo las pérdidas de energía durante la recarga). De esta manera se puede conseguir el dato de consumo energético medio dividiendo por la distancia total recorrida (kW/km). (Penabad, 2018)

Conocida la capacidad total de la batería instalada en el vehículo, se obtiene de manera inmediata la distancia (estimada, pues también depende de otros factores) que puede recorrer ese coche con una carga total (autonomía).

En la actualidad, un consumo en un coche eléctrico que esté en el entorno de los 18 kWh/100 km es un consumo razonable, por debajo de esta cifra estaremos ante coches muy eficientes (como puede ser entorno a los 14 o 15 kWh/100 km). Mientras que se considera un consumo elevado cuando se superan los 20 kWh/100 km.

En el software Simulink, el bloque utilizado para implementar el ciclo WLTP ha sido el “Drive Cycle Source” que se muestra en la Figura 31.

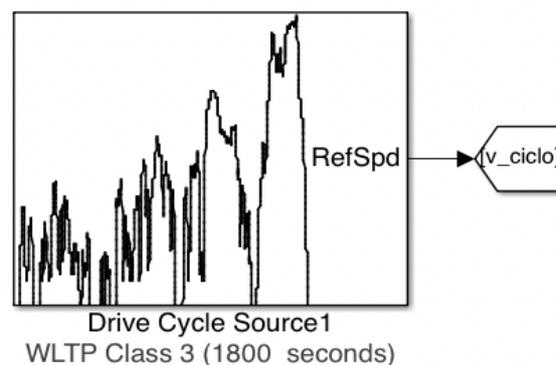


Figura 31 - Bloque de Simulink del ciclo WLPT.

Este bloque es realmente sencillo y útil pues tiene predefinida una extensa lista de diferentes ciclos de homologación, europeos, americanos, orientales...

Una vez elegido el ciclo a representar, se elige la magnitud de este y esta es la última variable de configuración del bloque. El ciclo que representa se muestra en la Figura 32.

Se puede observar que la velocidad máxima no supera los 37 m/s, velocidad equivalente a 133 km/h, menor a la velocidad de diseño del Capítulo 6 del presente trabajo.

Por otro lado, en la Figura 32 se aprecia como esta señal de velocidad que será la referencia de simulación entra en un bloque “Goto” de Simulink para poder ser utilizada como entrada en otros tantos bloques como se verá en los siguientes apartados.

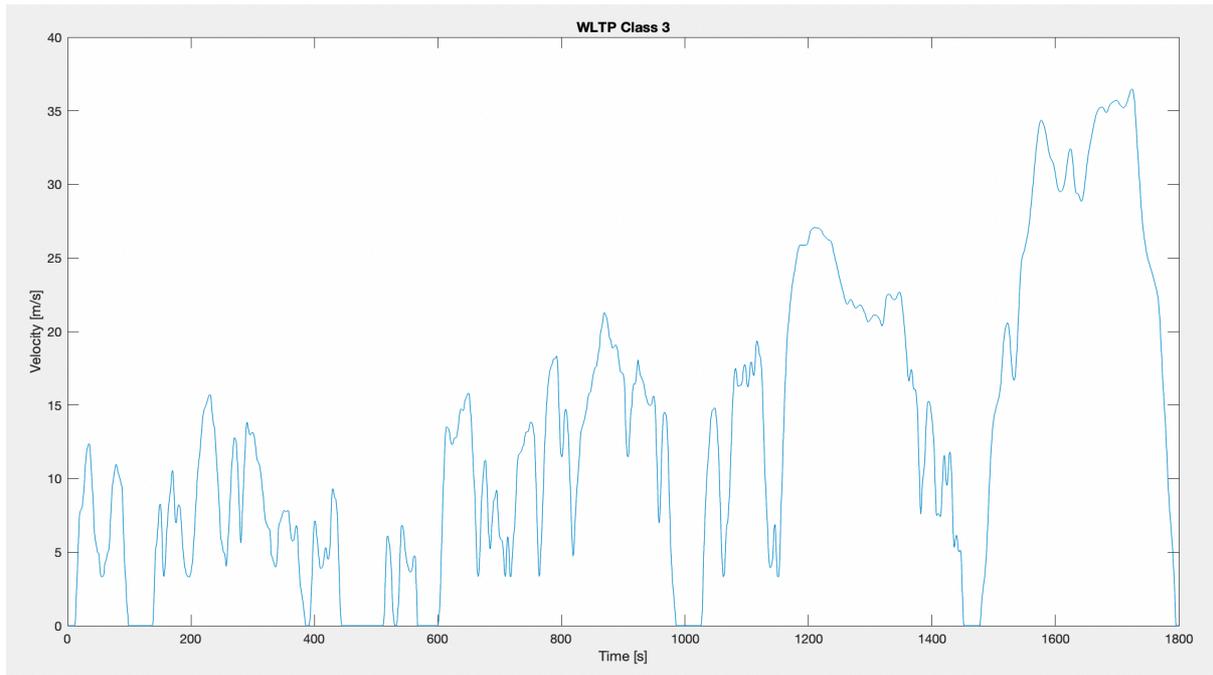


Figura 32 - Ciclo WLTP empleado en la simulación.

#### 4.1.2. Bloque “Longitudinal Driver”

El bloque “Longitudinal Driver” mostrado en la Figura 33 resulta de gran interés de cara a implementar un modelo de vehículo, ya sea eléctrico o de combustión.

Esto se debe a que mediante una velocidad de referencia y la realimentación de la velocidad real es capaz de obtener unas señales de control que hacen referencia a la presión que se ejerce sobre los pedales de aceleración y freno. Las señales de salida son adimensionales y las entrega en el rango de [0, 1] donde el 0 significa que el pedal no está pisado y el 1, que lo está en su recorrido total.

También es capaz de simular los cambios de marcha si los hay; en nuestro caso, esta variable nos es indiferente.

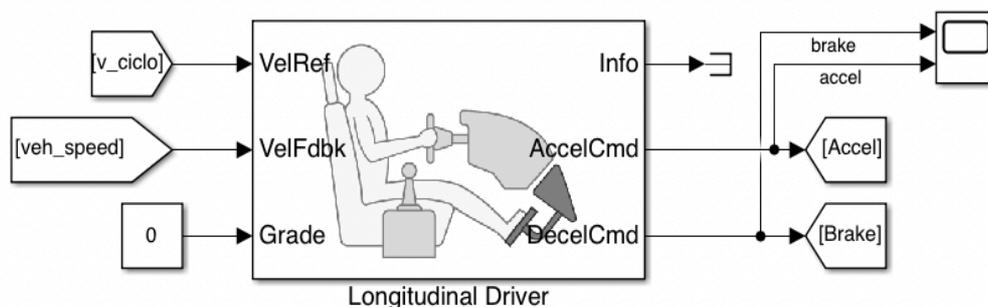


Figura 33 - Bloque “Longitudinal Driver”.

En esencia se trata de un controlador que genera los comandos necesarios para el correcto seguimiento de un ciclo de velocidad.

En la Figura 34 se pueden apreciar todos sus parámetros de configuración. En ella se puede observar que se ha elegido un control PI, sin cambios de marcha y se ha tomado como unidad de la velocidad m/s. Además, se han ajustado las ganancias Kp y Ki del regulador con un valor de 100 para ambas.

El resto de los parámetros se han dejado por defecto.

Parameters

Configuration

External Actions

Control type, cntrlType: PI

Shift type, shftType: None

Reference and feedback units, velUnits [velUnits]: m/s

Output gear signal

Control

Nominal Gains

Proportional gain, Kp []: 100

Integral gain, Ki []: 100

Velocity feed-forward, Kff []: .05

Grade angle feed-forward, Kg [1/deg]: .01

Nominal speed, vnom [velUnits]: 100

Anti-windup, Kaw []: .1

Error filter time constant, tauerr [s]: .03

Figura 34 - Parámetros de configuración del bloque "Longitudinal Driver".

### 4.1.3. Motor de imanes permanentes

A continuación, se van a detallar los bloques involucrados en la etapa de potencia del coche eléctrico modelado. En la Figura 35 se puede observar que está compuesta por la batería, el inversor trifásico y el motor de imanes permanentes (PMSM, “Permanent Magnet Synchronous Machine”).

La importancia del correcto funcionamiento de estos bloques es esencial para la obtención de resultados coherentes en la simulación del modelo.

Desde un punto de vista general se puede decir que la batería alimenta al inversor trifásico, el cual está controlado y devuelve unas tensiones que variarán en amplitud y frecuencia en función del control aplicado. El motor recibe estas tensiones y gira en consecuencia.

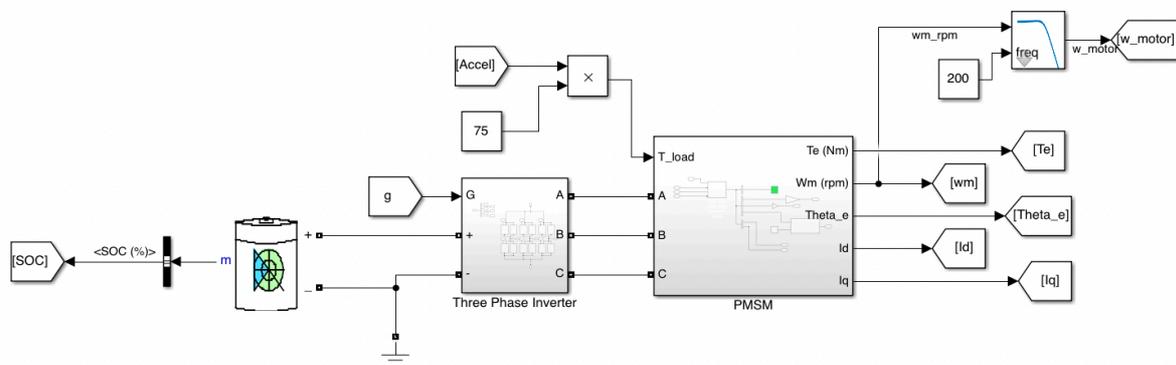


Figura 35 - Etapa de potencia del modelo con PMSM.

No solo se modifica la velocidad y el sentido de giro del motor, si no también el par electromagnético ( $T_e$ ) que genera. Además, también se debe tener en cuenta el par de carga que el motor debe vencer.

En el modelo realizado este par viene determinado por la presión del pedal del acelerador que se obtenía del bloque “Longitudinal Driver”. De esta manera, como se puede observar en la Figura 35, el par máximo a vencer será de 75 Nm, valor que se alcanzará en los arranques y en los instantes en los que se necesite mayor aceleración.

El bloque del motor de imanes permanentes está representado por un único bloque mostrado en la Figura 36.

Este motor se trata de una máquina síncrona trifásica en la que los devanados del estator están conectados en estrella a un punto neutro interno. Se ha configurado para una forma de onda sinusoidal y un rotor de polos salientes. Además, puede funcionar tanto en modo motor

como generador, característica clave para la recarga de la batería mediante la frenada regenerativa. Este modo de funcionamiento viene dictado por el signo del par mecánico (positivo para el modo motor, negativo para el modo generador).

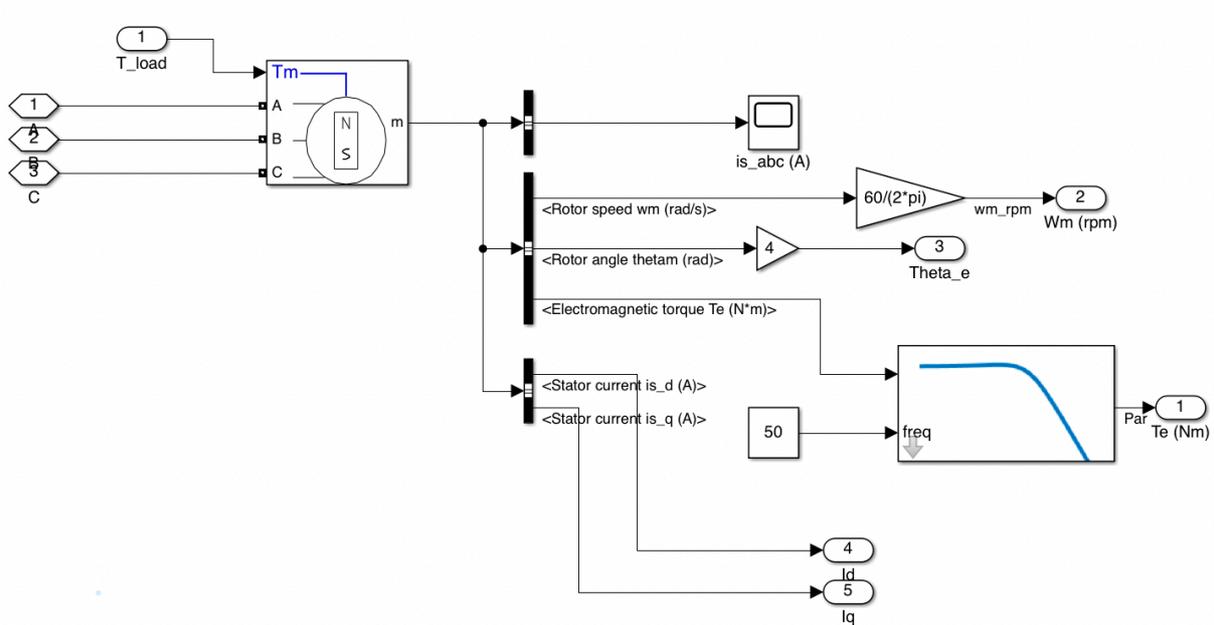


Figura 36 - Bloque PMSM.

El bloque representa con un modelo de espacio de estados de segundo orden las partes eléctrica y mecánica de la máquina. Este espacio de estados viene dado por las siguientes ecuaciones, expresadas con referencia en el rotor.

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} v_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_m i_q \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} v_q - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} p \omega_m i_d - \frac{\lambda p \omega_m}{L_q} \quad (7)$$

$$T_e = 1.5p[\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (8)$$

Dónde:

- $L_d$  es la inductancia en el eje  $q$  [H].
- $L_q$  es la inductancia en el eje  $d$  [H].
- $R_s$  es la resistencia en los devanados del estator [ $\Omega$ ].
- $i_q$  es la corriente en el eje  $q$  [A].
- $i_d$  es la corriente en el eje  $d$  [A].
- $v_q$  es la tensión en el eje  $q$  [V].
- $v_d$  es la tensión en el eje  $d$  [V].
- $\omega_m$  es la velocidad angular del rotor [rad/s].
- $\lambda$  es la amplitud del flujo inducido por los imanes permanentes del rotor en las fases del estator [-].
- $p$  es el número de pares de polos [-].
- $T_e$  es el par electromagnético [Nm].

$$\frac{d}{dt}\omega_m = \frac{1}{J}(T_e - T_f - F\omega_m - T_m) \quad (9)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_m \quad (10)$$

Dónde:

- $J$  es la inercia del rotor [ $\text{kgm}^2$ ].
- $F$  es el coeficiente de fricción viscosa del rotor [Ns/m].
- $\theta$  es la posición angular del rotor [rad].
- $T_m$  es el par mecánico del eje [Nm].
- $T_f$  es el par de fricción estática del eje [Nm].
- $\omega_m$  es la velocidad angular del rotor [rad/s].

Las entradas al bloque son las tensiones generadas por el inversor trifásico y el par de carga. A su salida se observan múltiples salidas, entre ellas se encuentran las corrientes de fase, la velocidad del rotor (que es convertida a rpm), la posición mecánica del rotor (que es convertida a posición eléctrica), el par electromagnético y las corrientes en los ejes  $d$  y  $q$ .

Cabe señalar que debido a las oscilaciones que produce el funcionamiento del PMSM, se ha decidido utilizar un filtro paso-bajo para reducir el ruido del par electromagnético. También se ha utilizado en otros parámetros, como se verá más adelante.

Los parámetros con los que se ha configurado el motor se presentan en la siguiente tabla:

<b>Potencia</b>	75 kW	<b><math>L_d</math></b>	0.538 mH
<b>Velocidad nominal</b>	3000 rpm	<b><math>L_q</math></b>	0.824 mH
<b>Par nominal</b>	238 Nm	<b><math>R_s</math></b>	6.5 m $\Omega$
<b>Corriente nominal</b>	296 A <sub>RMS</sub>	<b>Flujo</b>	0.162 Wb
<b>Tensión nominal</b>	396 V <sub>RMS</sub>	<b>Inercia, J</b>	0.1 kgm <sup>2</sup>
<b>Nº de polos</b>	8	<b>Coef. de amort., B</b>	0

Estos datos se han obtenido de (Nam, 2010).

#### 4.1.4. Inversor trifásico

Otro de los elementos indispensables en la anatomía del coche eléctrico es el convertidor de potencia que incorpora, que es el inversor trifásico. En ocasiones también se puede encontrar un rectificador. Para el modelo que se está describiendo se ha desarrollado el inversor que se muestra en la Figura 37.

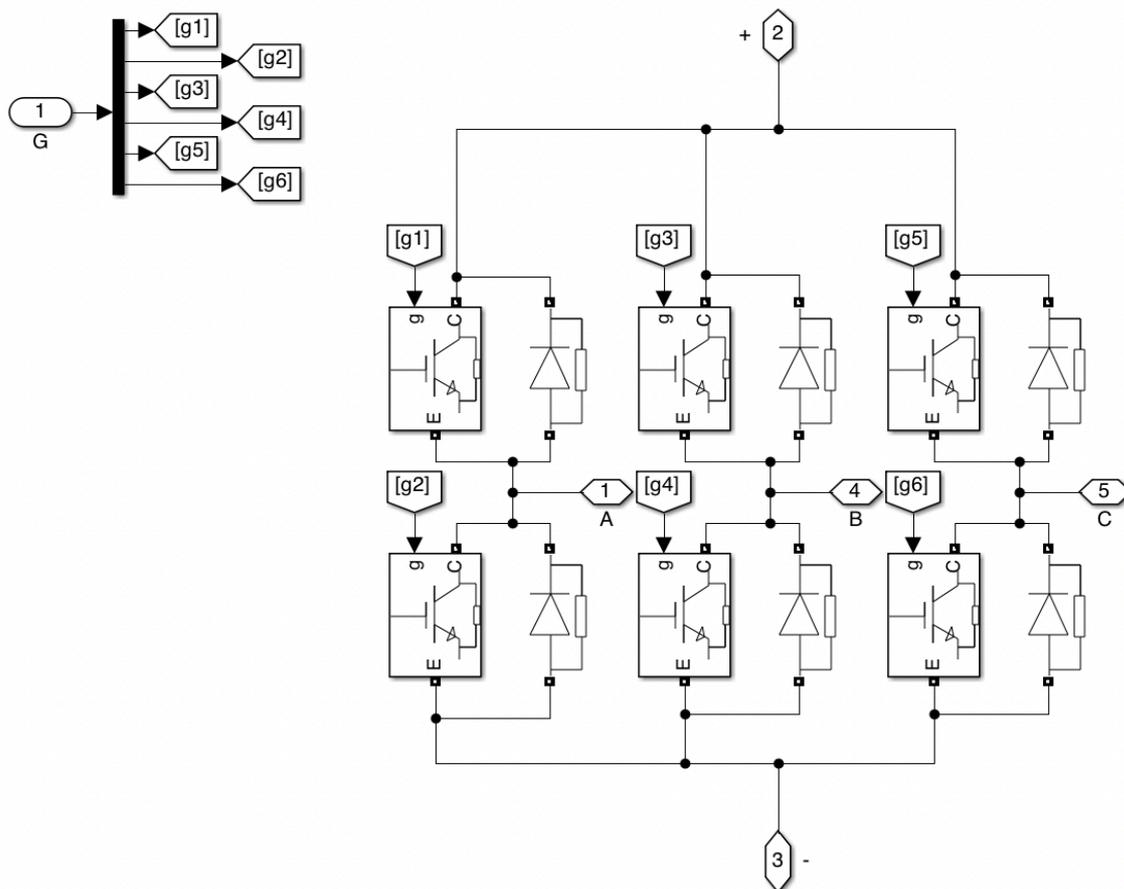


Figura 37 - Inversor trifásico.

Se puede apreciar que está compuesto por IGBTs con diodos en anti-paralelo para evitar conmutaciones no deseadas de los transistores por posibles corrientes parásitas. Además, los semiconductores incorporan una resistencia de amortiguado (“snubber resistance”) de 100 k $\Omega$ .

Estos dispositivos están controlados por una señal de puerta externa, generada por el control implementado y explicado en el siguiente apartado. En los extremos de sus bornes se encuentra la tensión continua de entrada procedente de la batería, mientras que a su salida se obtienen las señales de tensión que alimentarán al motor de imanes permanentes.

Este inversor es bidireccional, es decir, es capaz de rectificar tensiones trifásicas del motor y cargar la batería con corriente continua.

#### 4.1.5. Batería

Elemento alrededor del cual gira toda la controversia del vehículo eléctrico. El bloque utilizado se representa en la Figura 38.

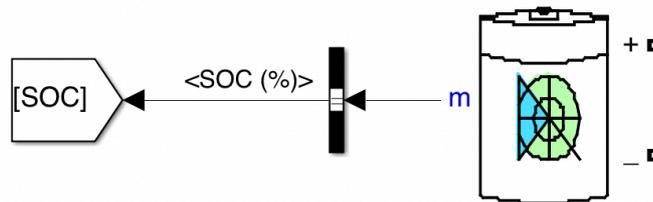


Figura 38 - Batería implementada en modelo PMSM.

Se ha elegido un bloque de batería recargable para alimentar el tren de potencia. Las curvas características de carga y descarga son iguales por la constitución del propio bloque. Para conocer el nivel de carga de la batería se recurre a la medida del estado de carga (SOC, “State of Charge”), que se expresa como un porcentaje de la carga completa.

Por lo tanto, para la frenada regenerativa, no ha sido necesario añadir ningún bloque más, simplemente se ha tenido en cuenta el cuadrante de trabajo del motor como se representa en la Figura 39.

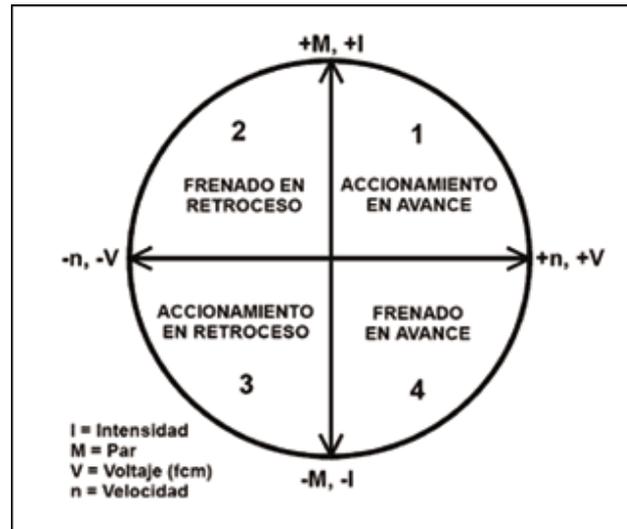


Figura 39 - Cuadrantes de trabajo de motor AC.

El funcionamiento normal del motor será el cuadrante 1, en el que la tensión, la corriente, el par y la velocidad son positivas. En este modo de funcionamiento, la batería alimenta al inversor y éste al motor, produciendo un par positivo y giro del motor hacia delante. Por el contrario, cuando el coche frena esto cambia. La tensión sigue siendo positiva porque la alimentación no cambia y la velocidad sigue siendo positiva porque el motor gira en sentido positivo pese a que cada vez lo haga más lento. Por su parte, el par y la corriente se vuelven negativos provocando que las intensidades inviertan el sentido, es decir, ahora pasarán del motor al inversor y después a la batería, provocando su recarga.

En la Figura 40 se muestran los parámetros con los que se ha configurado el bloque de la batería.

Figura 40 - Parámetros del bloque de batería.

Se observa que, tal y como se definía en el Apartado 3.3, se ha elegido una batería de Ion-Litio, al ser esta una de las más extendidas en la actualidad.

Por otro lado, al tratarse de un ciclo de velocidad de 30 minutos se ha decidido no tener en cuenta ni los efectos de la temperatura ni los de envejecimiento. Se considera que éstos tienen mucho más sentido en pruebas realizadas a largo plazo.

De manera análoga a la realidad, este bloque ha impuesto dos limitaciones importantes en la simulación.

La primera de ellas trata sobre su capacidad. En primer lugar, se eligió una batería de 100 Ah, que es equivalente a una capacidad de 56 kWh (con un voltaje nominal de 560V), lo que supondría una autonomía de 300 km aproximadamente. Pero al realizar la simulación se apreciaba que al disminuir del 98% del SOC, el control se volvía inestable y por tanto el sistema dejaba de funcionar correctamente.

Se llegó a la conclusión de que, por alguna razón desconocida, la pequeña disminución de tensión que se produce en la batería durante su descarga provocaba que el control FOC diseñado se volviese inestable y deficiente.

La solución adoptada fue incrementar considerablemente la capacidad de la batería, tal y como se puede ver en la Figura 40. El valor tomado fue de 500 Ah.

La segunda limitación consiste en la incapacidad de implementar la frenada regenerativa, ya que, al frenar y provocar un par negativo, la inversión de corriente, una vez más, provocaba el mal funcionamiento del control FOC.

Realmente, la batería funciona perfectamente y las limitaciones vienen por el control implementado, pero afectan directamente a este bloque.

Esto no se ha podido solventar de ninguna manera y se ha tomado la decisión de no implementar frenada regenerativa en este modelo.

#### 4.1.6. Control FOC

Como se mencionaba en el Capítulo 3.4.5, el control implementado para el modelo del motor de imanes permanentes ha sido el vectorial FOC. En las Figuras 41 y 42 se puede ver el aspecto del diagrama de bloques que componen dicho control.

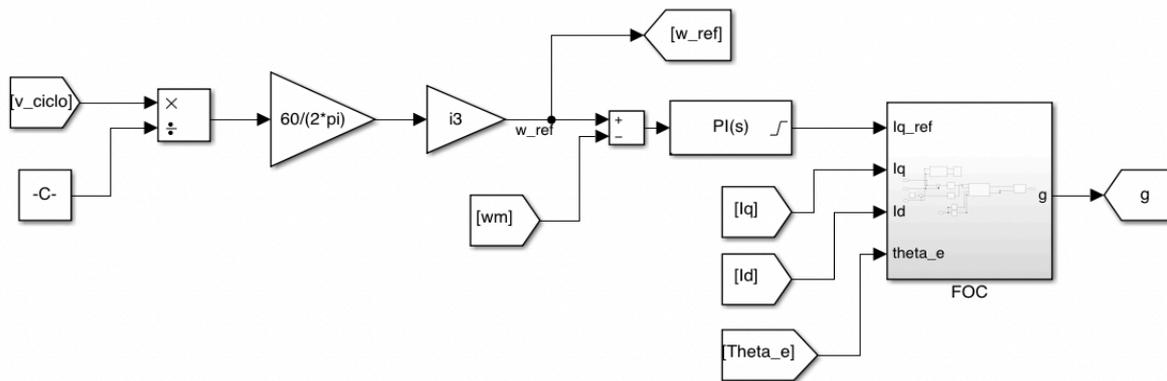


Figura 41 - Diagrama del control FOC.

En la Figura 41 se observa que el control de velocidad se realiza fuera de los dos bucles internos de flujo y par característicos del control FOC.

Para el control de velocidad, en primer lugar, se obtiene la velocidad angular de las ruedas en rad/s y se convierte a rpm mediante la ganancia de valor  $60/(2\pi)$ . A continuación, se aplica el valor de la relación de transmisión elegida para este motor. En este caso se ha tomado que la máxima velocidad lineal del vehículo (en las ruedas) se alcanzará cuando el motor gire a 6000 rpm. Dicha máxima velocidad se corresponde a las 1175.38 rpm obtenidas en el Capítulo 5. De esta manera, el valor de la relación de transmisión es de 5.1 aproximadamente.

Una vez se dispone de la velocidad del motor en revoluciones por minuto, ésta se compara con la velocidad real del motor, que es un parámetro de salida del propio bloque.

Sobre el error se aplica un regulador PI cuyos parámetros son  $K_p = 40$  y  $K_i = 3$ . Estos valores se han obtenido de manera experimental mediante prueba y error según la respuesta obtenida aislando el bucle de control. Además, también se le añade una saturación cuyos márgenes son el valor del par nominal de motor positivo y negativo.

La salida de este regulador hará las veces de la referencia de  $I_q$ , siendo así una entrada al bloque del control FOC. También encontramos como entradas las corrientes  $I_d$  e  $I_q$  y la posición angular eléctrica del rotor que nos devuelve el propio bloque del motor PMSM. Dentro del bloque "FOC" se puede encontrar el diagrama de bloques mostrado en la Figura 42.

El primer apunte que destacar es que, al tratarse de un motor síncrono, la corriente de referencia de  $I_d$  se puede aproximar a 0.



$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (11)$$

Dónde:

- $f_\alpha$  y  $f_\beta$  son las componentes ortogonales bifásicas en el sistema de referencia estacionario  $\alpha\beta$ .
- $f_d$  y  $f_q$  son las componentes ortogonales del eje directo y de cuadratura en el sistema de referencia  $dq$  rotatorio.

Una vez obtenidas las tensiones  $\alpha$  y  $\beta$  se debería realizar la transformada inversa de Clarke para obtener las tensiones trifásicas  $a$ ,  $b$  y  $c$ . Sin embargo, en el modelo diseñado se hace uso de un bloque que realiza la modulación SVPWM tomando como entradas las tensiones de salida de la transformada inversa de Park. A la salida de este bloque se obtienen las señales de disparo de los transistores IGBT del inversor trifásico.

Con esta configuración del control FOC queda totalmente controlado el motor en velocidad y par.

#### 4.1.7. Transmisión mecánica

Una vez desarrollados los aspectos eléctricos y electrónicos, ha sido necesario implementar, aunque de manera simplificada, la parte mecánica del coche. El subsistema general se puede observar en la Figura 43, en la que las entradas son la señal del frenado que se obtenía del bloque "Longitudinal Driver" y el par electromagnético resultado del bloque del motor PMSM.

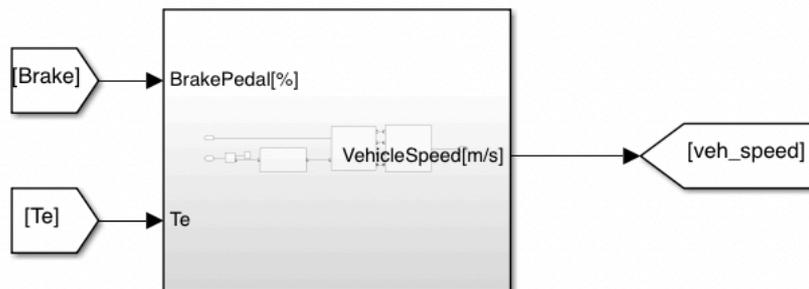


Figura 43 - Subsistema mecánico del modelo PMSM.

La salida de este subsistema es sencillamente la velocidad lineal en m/s teórica del vehículo según las condiciones con las que se han configurado los subconjuntos interiores. De hecho, en la Figura 44 se pueden ver los tres subconjuntos principales que conforman la parte meramente mecánica. Estos son: la reductora y diferencial, las ruedas y las características del vehículo.

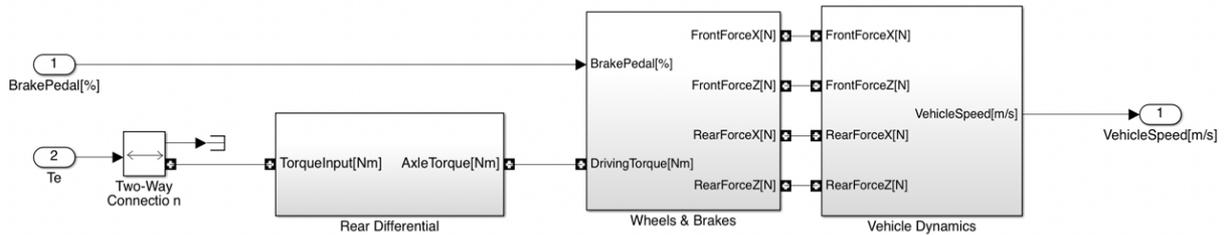


Figura 44 - Subconjuntos mecánicos del modelo de PMSM.

El subconjunto de la reductora y diferencial está compuesto principalmente por dos bloques que representan precisamente la función de ambos. Este se puede observar en la Figura 45.

El primer bloque representa el acople del motor al eje de transmisión de las ruedas. Es por ello por lo que se compone del mecanismo diferencial y de los engranajes que obtienen como resultado la relación de transmisión deseada.

Teniendo en cuenta que el ciclo de velocidad utilizado se considera en una superficie plana y recta, el mecanismo diferencial no tiene efecto alguno sobre el comportamiento del coche eléctrico.

Debido a la ausencia de curvas, la trayectoria de las cuatro ruedas será la misma durante toda la simulación.

Por su parte, la relación de transmisión se introduce directamente como parámetro, es decir, este bloque no permite ningún tipo de personalización de engranajes. Con respecto a otros múltiples parámetros de configuración que permite el bloque, se han dejado por defecto. La razón principal es que el único parámetro de interés real es la relación de transmisión ( $i3$ ).

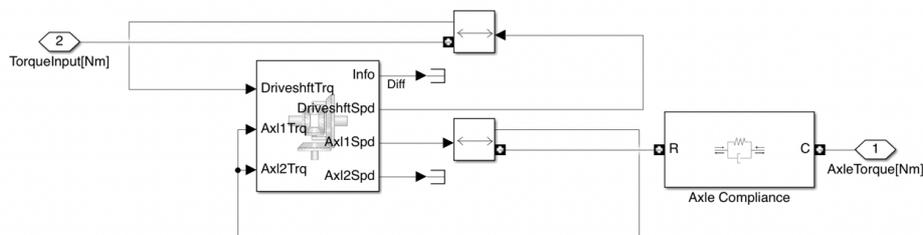


Figura 45 - Diferencial y reductora.

Se observa también que el bloque tiene varias salidas entre las que se encuentran las velocidades de los ejes, de las cuales solo nos interesa una pues disponemos de un único eje motriz.

El siguiente bloque se trata de un bloque de conformidad torsional formado por un amortiguador de muelle paralelo para acoplar dos ejes de transmisión giratorios. Su función es básicamente la velocidad del eje motriz en par.

Las ruedas se representan mediante el diagrama de bloques mostrado en la Figura 46.

Este subconjunto es más intuitivo que el anterior pues sus entradas son el par existente en el eje motriz, que era la salida del subconjunto anterior, y la señal de freno que nos devolvía el bloque "Longitudinal Driver".

Ya que la señal de frenado varía entre 0 y 1, es necesario aplicarle una ganancia para introducir la presión de la frenada en pascales (Pa).

Por otro lado, el par solamente se introduce a uno de los dos bloques de rueda. Esto es así porque cada rueda representa a un eje delantero y trasero. Esta simplificación se ha llevado a cabo multiplicando por dos la señal de salida del bloque de la rueda, haciendo las veces de dos ruedas por eje.

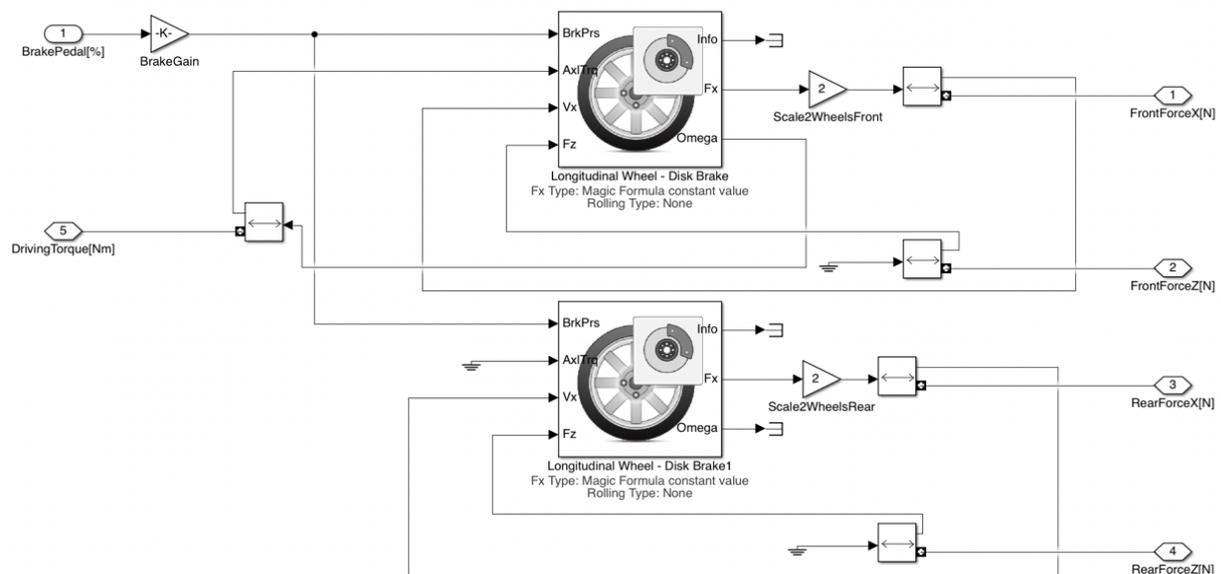


Figura 46 - Subconjunto de las ruedas.

Aparte de las entradas ya mencionadas, se aprecian también la velocidad lineal de las mismas y la fuerza sobre el eje z que se aplica sobre ellas. Gracias al bloque “Two-way connection” que se corresponde con la imagen mostrada en la Figura 47, somos capaces de conectar la velocidad resultante final.

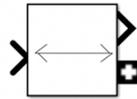


Figura 47 - Bloque "Two-Way Connection".

Este bloque implementa una conexión bidireccional que transporta las señales de Simulink en ambos sentidos, tal y como se muestra en la Figura 48. Se debe conectar a otro bloque “Two-Way Connection”.



Figura 48 - Funcionamiento del bloque "Two-Way Connection".

Se observa que lleva la señal 1 desde el puerto de entrada del primer bloque al puerto de salida del segundo bloque. Al mismo tiempo, lleva la señal 2 desde el puerto de entrada del segundo bloque al puerto de salida del primero.

Con este mismo método se introduce la fuerza  $F_z$  que se obtiene como resultado en el siguiente subsistema.

Con respecto al bloque de la rueda elegido, la configuración realizada se muestra en la Figura 49.

Se observa que los parámetros que se han modificado han sido el tipo de modelado, el tipo de freno y el radio de la rueda.

Block Options

Longitudinal Force: Magic Formula constant value

Rolling Resistance: None

Brake Type: Disc

Vertical Motion: None

Longitudinal scaling factor, lam\_x []: 1  Input friction scale factor

Parameters

▼ Wheel Dynamics

Axle viscous damping coefficient, br [N\*m\*s/rad]: 0.001

Wheel inertia, Iyy [Kg\*m^2]: 0.8

Wheel initial angular velocity, omegao [rad/s]: 0

Relaxation length, Lrel [m]: 0.5

Loaded radius, Re [m]: w\_r/1000

Unloaded radius, UNLOADED\_RADIUS [m]: 0.4

Nominal longitudinal speed, LONGVL [m/s]: 16

Nominal camber angle, gamma [rad]: 0

Nominal inflation pressure, NOMPRES [Pa]: 220000

Pressure, press [Pa]: 220000  Input tire pressure

Figura 49 - Configuración del bloque de las ruedas.

El modelado del neumático elegido ha sido el caracterizado como “Magic Formula”. No se va a entrar en detalle del modelo matemático del propio bloque, pero tiene en cuenta, entre otras, los parámetros que se pueden ver en la Figura 50.



Figura 50 - Parámetros usados por el modelado Magic Formula.

También modela el tipo de freno que se elija; en este caso se ha seleccionado un freno de disco frente a uno de tambor, por ser más común en los coches. De nuevo, pese a no entrar en el modelado matemático, se presenta en la Figura 51 un esquema de las partes principales que este bloque tiene en cuenta.

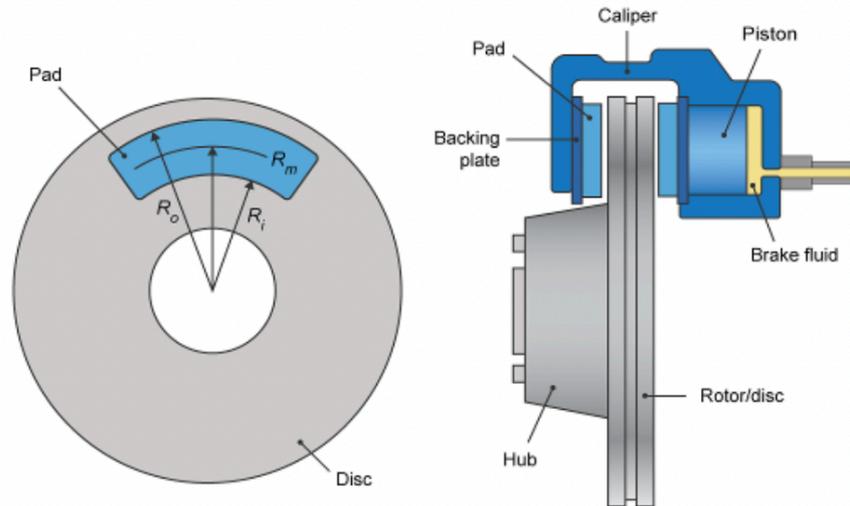


Figura 51 - Esquema de las partes principales de un freno de disco.

Por último, el radio de la rueda elegido ha sido el calculado en el Capítulo 5. Además, se introduce como parámetro inicializado en el script.

Los demás parámetros no se han modificado.

El valor de salida de interés de este bloque es la fuerza en el eje x, que entra directamente en el siguiente subconjunto, el cual se presenta en la Figura 52. Éste reúne todas las características del vehículo tipo simulado y le aplica la dinámica correspondiente de un coche. El bloque que realiza esta función es el “Vehicle Body 1 DOF Longitudinal” que viene a ser el cuerpo del vehículo con un grado de libertad longitudinal (avance o marcha atrás).

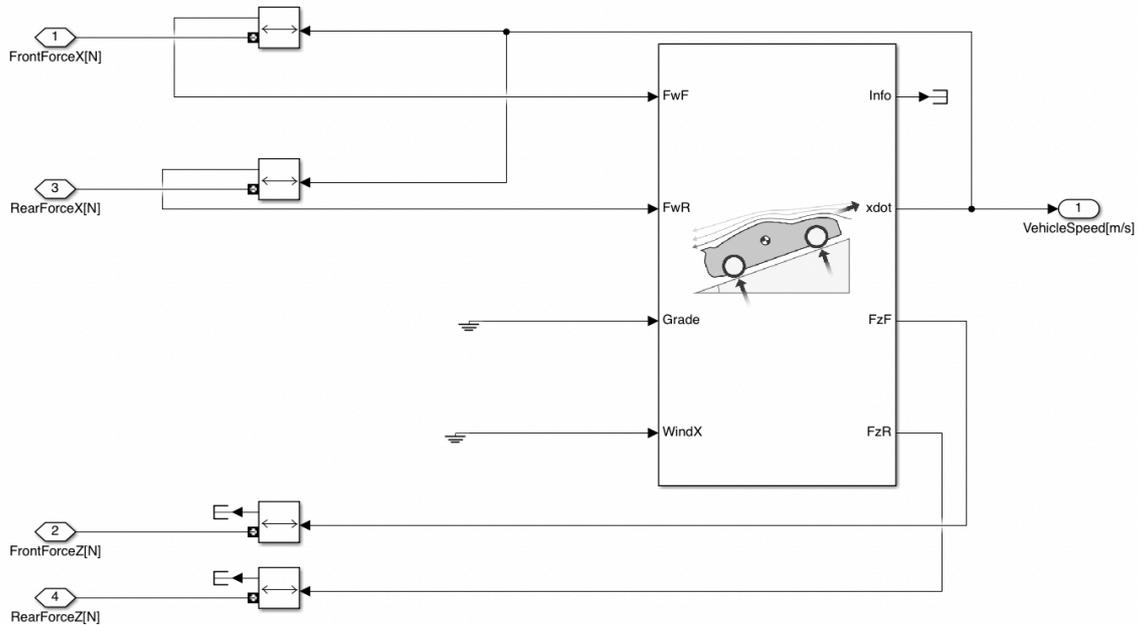


Figura 52 - Subconjunto de la dinámica del vehículo.

Se puede ver que las entradas al bloque son las fuerzas en el eje x de las ruedas delanteras (front) y traseras (rear) que se corresponden con las salidas del subconjunto de los neumáticos.

Además, podemos ver que se pueden introducir como entradas la inclinación del terreno y la velocidad del viento. Para el caso que nos ocupa, se ha decidido que estos dos valores sean nulos.

Las salidas del bloque son la velocidad lineal y las fuerzas delantera y trasera en el eje z que se introducirán como entradas en las ruedas, como se ha explicado en el apartado anterior.

La configuración de este bloque es bastante completa. Se pueden ver todos sus parámetros en la Figura 53.

Parameters

▼ Longitudinal Parameters

Number of wheels on front axle, NF [-]:

Number of wheels on rear axle, NR [-]:

Mass, m [kg]:

Horizontal distance from CG to front axle, a [m]:

Horizontal distance from CG to rear axle, b [m]:

CG height above axles, h [m]:

Drag coefficient, Cd [-]:

Lift coefficient, Cl []:

Pitch drag moment coefficient, Cpm []:

Frontal area, Af [m<sup>2</sup>]:

Initial position, x\_o [m]:

Initial velocity, xdot\_o [m/s]:

▼ Environment Parameters

Absolute Pressure, Pabs [Pa]:

Air Temp, T [K]:

Gravitational acceleration, g [m/s<sup>2</sup>]:

Figura 53 - Parámetros del bloque de la dinámica del coche eléctrico.

Se aprecian dos partes, una correspondiente a los parámetros longitudinales, que se refieren a los aspectos físicos del coche, y los parámetros del medio.

Con respecto a los primeros, se han tomado dos ruedas por eje, y un centro de gravedad a una altura estándar y no en el centro del vehículo si no más cercano al eje delantero, que es donde iría acoplado el motor eléctrico.

La masa del coche, su área frontal y el coeficiente aerodinámico son valores obtenidos en el Capítulo 5 y se inicializan en el script.

El bloque aplica estos parámetros y hace uso de las expresiones del Capítulo 5 con respecto a las fuerzas que intervienen en el movimiento del vehículo para determinar la velocidad a la que es capaz de moverse según la fuerza que le sea introducida.

Una vez obtenida esta velocidad, tenemos todas las señales para evaluar los resultados de la simulación.

## 4.2. Modelo con motor de inducción

Se ha desarrollado un modelo en Simulink para conocer el comportamiento del coche eléctrico y su batería cuando incorpora este tipo de motor. Tanto por comodidad como por ser lo más fiel a la comparativa realizada, ambos modelos comparten gran parte de los subsistemas que los componen.

El modelo completo de coche eléctrico implementado con motor asíncrono de inducción se puede ver en el plano P2 del apartado Planos de este trabajo.

Este modelo comparte muchos subconjuntos del modelo anterior. Tal es así, que se puede comprobar que el ciclo de homologación es el mismo, como cabía de esperar en pro del objetivo de la comparación. Además, también comparten ambos modelos el bloque “Longitudinal Driver” para obtener las señales de control de la aceleración y la frenada.

De la misma manera, dentro del bloque de potencia, ha cambiado evidentemente el motor y las características de la batería, como se detallará en los apartados posteriores; sin embargo, el inversor permanece invariable.

Como se mencionaba en el Capítulo 3.4.5, el control elegido para este motor ha sido uno en bucle cerrado con regulación PI en detrimento del control vectorial FOC.

Por último, la parte mecánica también permanece invariable, con la salvedad de que, al haber cambiado el motor, también se ha modificado la relación de transmisión. Como se observa en la Figura 29, la nueva relación de transmisión se corresponde con el valor inicializado  $i_2$  del script.

Debido a esto solamente se van a detallar los subconjuntos que han sufrido alguna modificación con respecto al modelo del motor de imanes permanentes. Para los subconjuntos invariables se pueden consultar los Apartados 4.1.1, 4.1.2, 4.1.4 y 4.1.7.

La simulación se ha realizado bajo la misma configuración que modelo PMSM, es decir, con un paso fijo igual a  $T_s \cdot 3$  y el solver “ode4 Runge-Kutta”.

### 4.2.1. Motor de inducción

En la Figura 54 se puede observar el conjunto de potencia, que está compuesto por la batería, el inversor trifásico y el motor de inducción (IM, "Induction Machine").

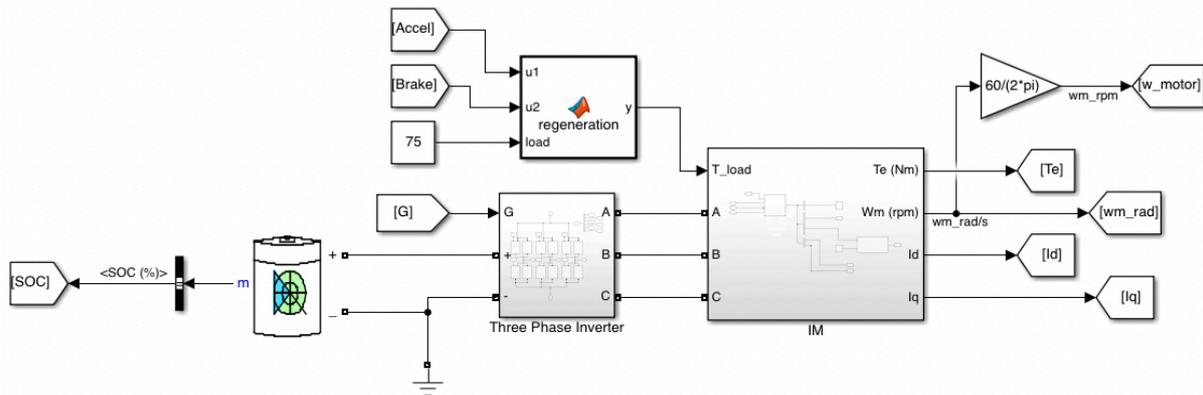


Figura 54 - Bloque de potencia del modelo IM.

La principal diferencia que existe con respecto al motor de imanes permanentes es que, en este caso, sí se ha podido implementar una frenada regenerativa. Para ello, solamente se ha añadido par de carga negativo cuando la señal de frenada del bloque "Longitudinal Driver" supere el valor de cero. Esta simple función se expresa en la Figura 55 y se implementa mediante el bloque de Simulink "Function".

```

function y = regeneration(u1, u2, load)
    if u1>0
        y = load*u1;
    else
        y=-load*u2;
    end
end
    
```

Figura 55 - Función que regula el par de carga del modelo IM.

Por tanto, el par viene determinado por la presión del pedal del acelerador, pero también por la presión del pedal del freno. De igual manera que en el modelo del PMSM, el par máximo a vencer será de 75 Nm.

El nuevo bloque motor está representado en la Figura 56.

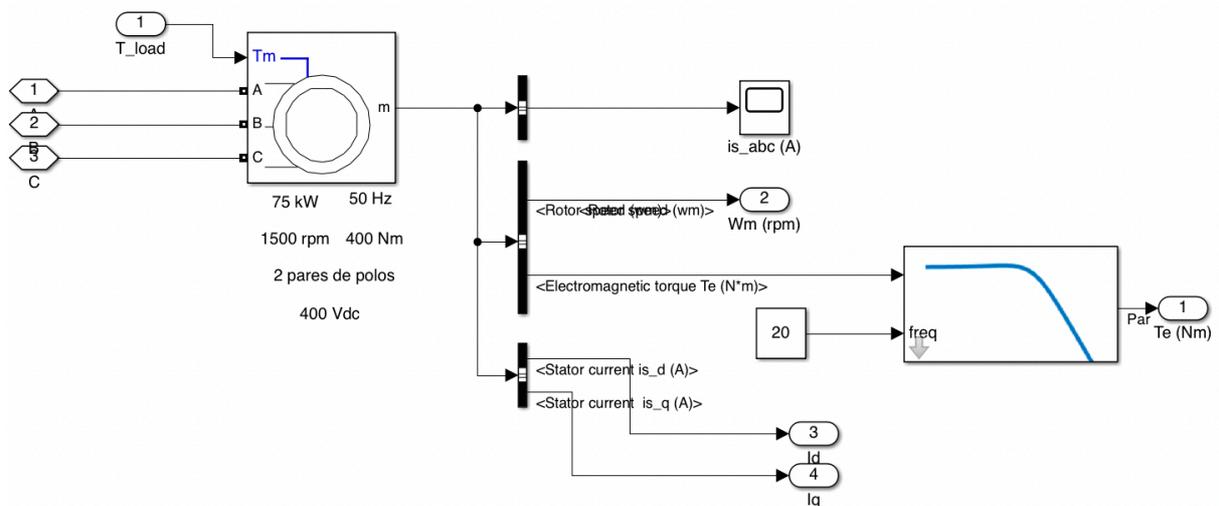


Figura 56 - Bloque del motor de inducción.

Este motor se trata de una máquina asíncrona trifásica de jaula de ardilla modelada en un marco de referencia dq del estator. Los devanados del estator y del rotor están conectados en estrella a un punto neutro interno.

El bloque puede funcionar en modo generador (si el par de carga es negativo) o motor (cuando el par de carga es positivo).

La parte eléctrica de la máquina está representada por un modelo de espacio de estados de cuarto orden y la parte mecánica por un sistema de segundo orden. Estos espacios de estados se representan mediante las siguientes ecuaciones:

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega \phi_{ds} \quad (12)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} + \omega \phi_{qs} \quad (13)$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d\phi'_{qr}}{dt} + \omega \phi'_{dr} \quad (14)$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d\phi'_{dr}}{dt} + \omega \phi'_{qr} \quad (15)$$

$$T_e = 1.5p(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds}) \quad (16)$$

Dónde:

- $V_{qs}$  y  $V_{ds}$  son las tensiones respecto del estator [V].
- $V'_{qr}$  y  $V'_{dr}$  son las tensiones respecto del rotor [V].
- $\phi_{qs}$  y  $\phi_{ds}$  son los flujos respecto al estator [Vm].
- $\phi'_{qr}$  y  $\phi'_{dr}$  son los flujos respecto al rotor [Vm].
- $R_s$  es la resistencia del estator [ $\Omega$ ].
- $R'_r$  es la resistencia del rotor [ $\Omega$ ].
- $i_{qs}$  e  $i_{ds}$  son las corrientes respecto del estator [A].
- $i'_{qr}$  e  $i'_{dr}$  son las corrientes respecto del rotor [A].
- $p$  es el número de pares de polos [-].
- $T_e$  es el par electromagnético [Nm].

$$\frac{d}{dt}\omega_m = \frac{1}{2H}(T_e - F\omega_m - T_m) \quad (17)$$

$$\frac{d}{dt}\theta_m = \omega_m \quad (18)$$

Dónde:

- $F$  es el coeficiente de fricción viscosa del rotor [Ns/m].
- $\theta_m$  es la posición angular del rotor [rad].
- $T_m$  es el par mecánico del eje [Nm].
- $H$  es la constante de inercia del rotor [ $\text{kgm}^2$ ].
- $\omega_m$  es la velocidad angular del rotor [rad/s].

Las entradas al bloque son las tensiones generadas por el inversor trifásico y el par de carga. A su salida se observan múltiples salidas, entre ellas se encuentran las corrientes de fase, la velocidad del rotor (en rad/s), el par electromagnético y las corrientes en los ejes  $d$  y  $q$ .

Cabe señalar que debido a las oscilaciones que produce el funcionamiento del IM se ha decidido utilizar un filtro paso-bajo para reducir el ruido del par electromagnético. También se ha utilizado en otros parámetros, como se verá más adelante.

Para configurar el bloque del motor se ha utilizado un modelo preconfigurado cuyos parámetros se presentan en la siguiente tabla:

<b>Potencia</b>	75 kW	<b>L<sub>m</sub></b>	0.0151 H
<b>Velocidad de sincr.</b>	1500 rpm	<b>R<sub>s</sub></b>	35.52 mΩ
<b>Velocidad nominal</b>	1484 rpm	<b>Fricción</b>	0.039 Nms
<b>Frecuencia nom.</b>	50 Hz	<b>Inercia, J</b>	1.25 kgm <sup>2</sup>
<b>Tensión nominal</b>	400 V <sub>DC</sub>	<b>Nº de polos</b>	4

#### 4.2.2. Batería

Se ha elegido el mismo bloque de batería recargable que en el modelo de imanes permanentes.

De manera contraria al modelo anterior, sí se ha podido invertir la corriente para implementar la frenada regenerativa. Se recuerda que en este cuadrante de trabajo la velocidad y la tensión siguen siendo positivas, pero tanto el par como las corrientes del motor se vuelven negativas. De esta manera, el inversor bidireccional es capaz de cargar la batería.

En la Figura 57 se muestran los parámetros con los que se ha configurado el bloque de la batería.

The screenshot shows a software interface for configuring a battery. It has two tabs: 'Parameters' (active) and 'Discharge'. Under 'Parameters', the 'Type' is set to 'Lithium-Ion'. There are two unchecked checkboxes: 'Simulate temperature effects' and 'Simulate aging effects'. Below these are four input fields with dropdown menus on the right: 'Nominal voltage (V)' set to 400, 'Rated capacity (Ah)' set to 30, 'Initial state-of-charge (%)' set to 100, and 'Battery response time (s)' set to 3.

Figura 57 - Parámetros de la batería de IM.

Al tratarse de un ciclo de velocidad de 30 minutos se ha decidido no tener en cuenta ni los efectos de la temperatura ni los de envejecimiento. Se considera que éstos tienen mucho más sentido en pruebas realizadas a largo plazo.

En este modelo, debido al control más sencillo implementado, se ha podido configurar la batería con una capacidad estándar, como son los 30 Ah que se muestran en la Figura 57. Para este tipo de motor la caída de tensión de la batería provocada por su descarga no afectaba ni al control, ni por tanto al comportamiento del motor. Esto supone evitar uno de los problemas que se habían encontrado en el modelo anterior.

Por otro lado, y tal y como ya se venía mencionando, también se ha podido aplicar un par de carga negativo para provocar que la máquina eléctrica trabaje en modo generador y cargue la batería.

De esta manera se conseguía superar la segunda limitación que se encontraba en el modelo de PMSM.

#### 4.2.3. Control en bucle cerrado

Como se mencionaba en el Capítulo 3.4.5, el control implementado para el modelo del motor de inducción ha sido un control en bucle cerrado con regulación PI. En las Figuras 58 y 59 se puede ver el aspecto del diagrama de bloques que componen dicho control.

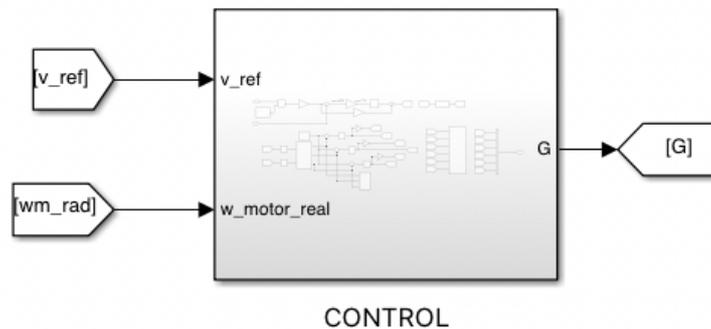


Figura 58 - Subconjunto del control del IM.

Se observa de manera genérica que, para el correcto funcionamiento de este control se necesitan como entradas la velocidad de referencia lineal (m/s) y la velocidad del rotor (en rad/s). Una vez procesadas y tratadas estas señales como se muestra en la Figura 59, se obtienen las señales de disparo de los IGBTs del inversor trifásico.

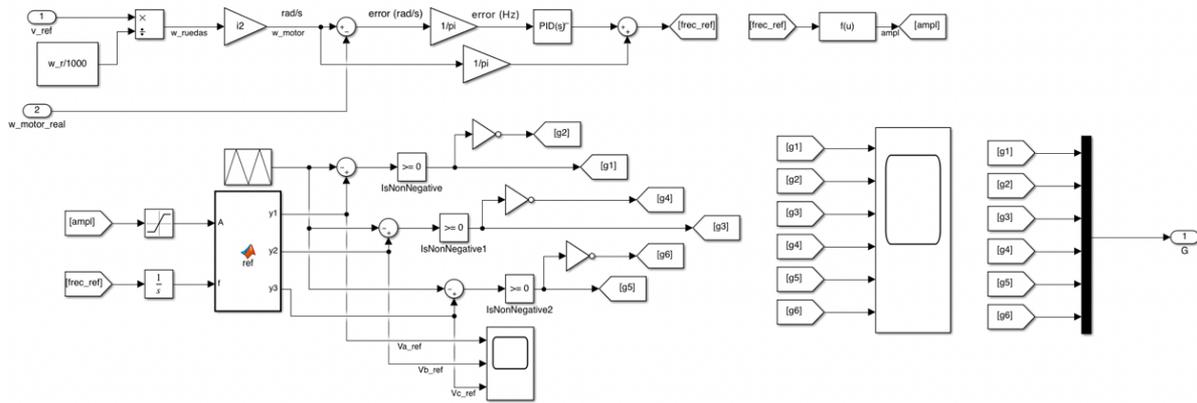


Figura 59 - Esquema del control del motor de inducción

En la parte superior se aprecia que la velocidad lineal de referencia, es decir, la del ciclo WLTP, se va tratando hasta convertirla en la velocidad del motor de referencia (en rad/s). En primer lugar, se divide por el radio de la rueda para obtener la velocidad angular a la que gira el eje. A continuación, se le aplica la ganancia correspondiente a la relación de transmisión, que, en este caso se ha decidido que la máxima velocidad lineal del vehículo (en las ruedas) se alcance cuando el motor gire a 4000 rpm. Dicha máxima velocidad se corresponde a las 1175.38 rpm obtenidas en el Capítulo 5. De esta manera, el valor de la relación de transmisión es de 3.4 aproximadamente. Este valor queda reflejado en el script de la Figura 29 mediante el parámetro i2.

Esta velocidad, ya correspondiente al motor y en rad/s se compara con la velocidad del rotor y al error obtenido se le aplica una regulación PI con saturación. Dicho regulador se caracteriza por la configuración de la siguiente tabla.

Velocidad		Saturación	
Kp	Ki	Superior	Inferior
1	0.1	10	-10

A la salida de esta regulación se le suma la referencia en Hz de la velocidad original, obteniendo de esta manera la frecuencia de las tensiones de fase a aplicar sobre el motor.

Además, con esta frecuencia también se obtiene la amplitud de las mismas señales de tensión. Para ello se ha tenido en cuenta que a 50 Hz la velocidad debe ser de 1500 rpm y que para frecuencia 0 debe existir un “offset” de tensión de aproximadamente un 20% de la tensión total.

Puesto que se trabaja en términos de control, a partir de este momento, los valores de las magnitudes van a variar entre -1, 0 y 1. Es por esto por lo que la ecuación de la recta que modela la amplitud de la señal de tensión en función de la frecuencia es:

$$A = \frac{0.8}{50} * f_{ref} + 0.2 \quad (19)$$

El siguiente paso es obtener las señales de disparo de los IGBTs, para lo que se ha desarrollado una modulación PWM artesana en la que se comparan las tensiones de referencia con la señal triangular moduladora.

Para obtener las tensiones de referencia se ha hecho uso de la frecuencia y amplitud ya calculadas y el bloque “Matlab Function”, en el que se han configurado las tres señales sinusoidales, como se ve en la Figura 60.

```
function [y1, y2, y3] = ref(A, f)
y1 = A*sin(2*pi*f+0);
y2 = A*sin(2*pi*f-2*pi/3);
y3 = A*sin(2*pi*f+2*pi/3);
```

Figura 60 - Señales de referencia de tensión del control de IM.

Una vez obtenidas estas tres tensiones, se comparan con una señal moduladora de forma triangular y con una frecuencia de 2 kHz. Cuando la tensión senoidal es mayor o igual que la triangular, la señal de salida es igual a 1. Por el contrario, cuando es menor, el valor de salida es 0.

Puesto que los IGBTs son simétricos respecto a sus señales de disparo, obtenidas tres señales, las otras tres se obtienen al invertir los valores cero por unos y viceversa. Es por esto por lo que se utilizan los bloques lógicos “NOT” que se aprecian en la Figura 59.

Cabe destacar que al tratarse de una simulación de un sistema físico que supone una duración de 30 minutos, la representación de las tensiones, señales de control y señales de disparo apenas aportan información por estar muy densificadas en el tramo de simulación.



## 5. Justificación detallada de la solución adoptada

La potencia y el par de giro suministrados por el motor del vehículo se transmiten a las ruedas provocando así el desplazamiento del coche eléctrico.

Se debe calcular la potencia mínima necesaria que necesitará nuestro vehículo para circular dadas unas circunstancias concretas, en concreto, la velocidad que el coche debe alcanzar es de 130 km/h, por ser esta velocidad la máxima del ciclo WLTP.

Con un buen ajuste de la potencia se podrá dimensionar el vehículo de una forma más realista que permita conocer cuándo va más holgado o más al límite.

Para el cálculo de la potencia debemos tener en cuenta las fuerzas resistentes que se oponen al desplazamiento del vehículo para conseguir que este avance (Figura 61).

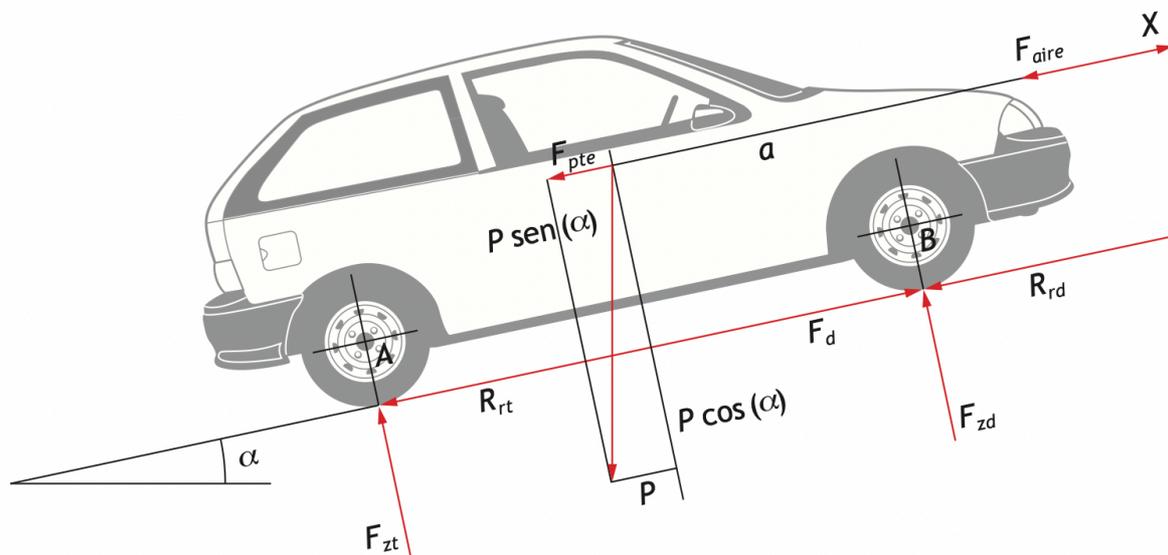


Figura 61 - Dinámica longitudinal del vehículo.

### 5.1. Fuerza de resistencia aerodinámica

El aire se opone al avance del vehículo ejerciendo una fuerza contraria a la de tracción en las ruedas. Hay tres factores principales que modifican esta resistencia aerodinámica y son: el tamaño del vehículo, su forma y la velocidad a la que se desplaza.

Cuanto más grande es el vehículo, más grande es el volumen de aire que tiene que atravesar y por tanto la fuerza necesaria será mayor.

Por otro lado, la estética, la altura, la anchura del vehículo y demás detalles del aspecto del coche, determinan un menor o mayor coeficiente aerodinámico. Al reducir el coeficiente aerodinámico se provoca un menor esfuerzo del motor y una mejora en la estabilidad de éste.

Por último y más importante factor, la velocidad varía enormemente la resistencia que ejerce el aire contra el coche.

Dicha fuerza se representa mediante la siguiente fórmula:

$$F_{aire}(v) = \frac{1}{2} \rho C_d A_F v^2 \quad (20)$$

Dónde:

- $F_{aire}$  es la fuerza de resistencia aerodinámica [N].
- $A_F$  es el área frontal efectiva [m<sup>2</sup>].
- $\rho$  es la densidad del aire [kg/m<sup>3</sup>].
- $C_d$  es el coeficiente aerodinámico de rozamiento [-].
- $v$  es la velocidad del vehículo [m/s].

## 5.2. Resistencia debida a la pendiente

La resistencia debida a la pendiente dificulta el avance del vehículo por ese terreno, pues parte de su masa provoca una fuerza que se opone al movimiento del coche (en caso en que la pendiente sea ascendente). Esta fuerza de resistencia se aplica en el centro de gravedad del vehículo.

La fuerza de resistencia debido a la pendiente viene dada por la siguiente formula:

$$F_{pte} = m g \sin(\alpha) \quad (21)$$

Dónde:

- $F_{pte}$  es la fuerza de resistencia debida a la pendiente [N].
- $m$  es la masa del vehículo y los ocupantes [kg].
- $\rho$  es la densidad del aire [kg/m<sup>3</sup>].
- $g$  es la aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>].
- $\alpha$  es el ángulo de la carretera respecto a la horizontal [rad].

### 5.3. Resistencia a la rodadura

Esta fuerza se opone al avance y está directamente relacionada con la masa del vehículo, el tipo de neumáticos, la presión de inflado y su perfil.

Se produce cuando la rueda, al girar, se deforma por las grandes presiones que existen en la zona de contacto entre el neumático y el suelo.

Esto produce una deceleración de la velocidad angular de la rueda y, por tanto, pérdidas de energía que calientan el neumático.

La fuerza de resistencia por rodadura viene dada por la siguiente fórmula:

$$F_{rod} = f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (22)$$

Dónde:

- $F_{rod}$  es la fuerza de resistencia de rodadura [N].
- $m$  es la masa del vehículo y los ocupantes [kg].
- $f_r$ , es el coeficiente de rozamiento por rodadura [-].
- $g$  es la aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ].
- $\alpha$  es el ángulo de la carretera respecto a la horizontal [rad].

### 5.4. Fuerza de inercia

La fuerza de inercia o de aceleración aparece cuando se producen variaciones de velocidad; serán contrarias al avance cuando se quiere aumentar la velocidad.

La aceleración afecta también a la potencia del motor, pues si queremos una aceleración mayor se necesitará mayor potencia.

De esta manera, la potencia empleada por un motor para circular por una pendiente a 50 km/h constantes será menor que si queremos que nuestro motor acelere, aumentando la velocidad durante la subida.

La fuerza de inercia es representada de forma simplificada como:

$$F_{in} = ma \quad (23)$$

Dónde:

- $F_{in}$  es la fuerza de inercia [N].
- $m$  es la masa del vehículo y los ocupantes [kg].

- $a$ , es la aceleración del vehículo [ $m/s^2$ ].

## 5.5. Potencia necesaria para vencer las fuerzas resistivas

Tomando las fórmulas y parámetros mencionados anteriormente y que afectan a la potencia del vehículo se obtiene la expresión con la que se modela la fuerza que un automóvil debe ejercer para vencer la resistencia a la marcha.

Así, la fuerza de tracción se expresa como:

$$F_r(v) = F_{aire} + F_{pte} + F_{rod} + F_{in} \quad (24)$$

Y sustituyendo, se obtiene:

$$F_r(v) = \frac{1}{2} \rho C_d A_F v^2 + mg \sin(\alpha) + f_r mg \cos(\alpha) + ma \quad (25)$$

Dónde:

- $F_r$  es la fuerza de tracción del vehículo [N].
- $A_F$  es el área frontal efectiva [ $m^2$ ].
- $C_d$ , el coeficiente aerodinámico de rozamiento [-].
- $m$ , es la masa del vehículo y los ocupantes [kg].
- $f_r$ , es el coeficiente de rozamiento por rodadura y transmisión [-].
- $\rho$  es la densidad del aire [ $kg/m^3$ ].
- $g$ , la aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ].
- $\alpha$ , el ángulo de la carretera respecto a la horizontal [rad].
- $a$ , es la aceleración del vehículo [ $m/s^2$ ].
- $v$ , la velocidad del vehículo [ $m/s$ ].

No se tiene en cuenta la velocidad del viento.

La potencia mecánica que necesitará ejercer el motor viene dada por la siguiente expresión:

$$P = F_r(v) \cdot v \quad (26)$$

Para la obtención de la potencia necesaria para vencer las resistencias de marcha, se ha tomado como velocidad máxima constante 130 km/h, sobre terreno asfaltado y con una pendiente ascendente del 5%. Además, se ha tomado como coeficiente de rozamiento por rodadura el correspondiente al de neumáticos ordinarios sobre asfalto.

Debido a que se pretende mantener la velocidad constante, la aceleración del vehículo es nula, eliminando así el término referente a la fuerza de inercia de la Ecuación 24.

Con todo ello, obtenemos la siguiente tabla de datos (similares a Hyundai Ioniq):

$A_F$	$C_d$	$m$	$f_r$	$\rho$	$g$	$\alpha$	$v$
2.35 m <sup>2</sup>	0.24	1495 kg	0.032	1.225 kg/m <sup>3</sup>	9.81 m/s <sup>2</sup>	0.05 rad	36.11 m/s

De esta manera, se obtiene que:

$$P = \left( \frac{1}{2} \rho C_d A_F v^2 + mg \sin(\alpha) + f_r mg \cos(\alpha) + ma \right) \cdot v \quad (27)$$

Sustituyendo por sus correspondientes valores:

$$P = (0.34545 \cdot 36.11^2 + 731.77 + 468,73 + 0) \cdot 36.11 \quad (28)$$

La potencia resultante es:

$$P = 59615.56 \text{ W} \quad (29)$$

Con la intención de sobredimensionar la potencia necesaria para realizar el trabajo definido, se tienen en cuenta el rendimiento mecánico de la transmisión (85%) y la pérdida de tracción del contacto del neumático con asfalto seco granulado (10%).

Con esto, la potencia resultante es:

$$P = \frac{59615.56}{0.9 \cdot 0.9} = 73599.46 \text{ W} \quad (30)$$

Si incluimos el consumo de las cargas auxiliares:

Radio	52 W
Calefacción y aire acondicionado	489 W
Luces	316 W
Total	857 W

(Valores basados en Ehsani et al., 2005; Emadi, 2005; Lukic & Emadi, 2002).

La potencia final de nuestro motor deberá ser de:

$$P = 74456.46 \text{ W} \sim 75 \text{ kW} \sim 100 \text{ CV} \quad (31)$$

## 5.6 Selección del acoplamiento

Como se ha comentado en capítulos anteriores, el acoplamiento entre el motor eléctrico y el eje motriz consiste básicamente en un grupo reductor y un mecanismo diferencial.

Aunque no se va a realizar un cálculo exhaustivo del número de engranajes, sus números de dientes y las conversiones de par y velocidad intermedias, sí que se pretende calcular el valor de la relación de transmisión final ( $i$ ), es decir, teniendo en cuenta el eje de entrada (el motor) y el de salida (eje de las ruedas).

En primer lugar, es necesario conocer el radio de las ruedas del vehículo. Para ello, se han tomado los valores normalizados de un neumático tipo que incorporan multitud de coches, tanto eléctricos como de combustión.

En particular, se ha tomado el siguiente código de neumático: 205/55 R16 91H.

El "91H" se refiere al índice de carga y de velocidad, respectivamente, y son datos innecesarios para el cálculo del radio de la rueda.

La "R" indica el tipo de neumático, que tampoco es una variable que afecte al cálculo, y el "16" es el diámetro en pulgadas del neumático.

Pero, además se debe tener en cuenta para el cálculo del diámetro total los flancos del neumático. Así, el "205" es el ancho en mm, el "55" es la altura del flanco en porcentaje respecto del ancho.

Debido a esto, el diámetro final de la rueda será la suma del diámetro del neumático más dos veces la altura de los flancos.

La siguiente ecuación representa este cálculo.

$$\varnothing_{\text{rueda}} = 55 * 205 * 2/100 + 16 * 25.4 \quad (32)$$

$$\varnothing_{\text{rueda}} = 631.9 \text{ mm} \quad (33)$$

Conocido este dato y partiendo de la necesidad de alcanzar una velocidad lineal de al menos 140 km/h debido al ciclo WLTP, se puede obtener la velocidad angular máxima de las ruedas.

$$\omega_{rueda} = \frac{v_{rueda}}{R_{rueda}} = \frac{140 \text{ km/h}}{316 \text{ mm}} \equiv \frac{38.89 \text{ m/s}}{0.316 \text{ m}} = 123.08 \text{ rad/s} \quad (34)$$

Por lo tanto, la velocidad máxima que van a alcanzar las ruedas es de 1175.38 rpm.

Esto sucederá para una velocidad muy alta del motor eléctrico y cuyo valor variará dependiendo del tipo de motor y sus parámetros. Por ejemplo, en el caso del PMSM del Nissan Leaf, la velocidad máxima del motor es de unas 10000 rpm, con la que se obtendría una relación de transmisión como sigue:

$$i = \frac{\omega_{entrada}}{\omega_{salida}} = \frac{10000}{1175.38} \approx 8.5 \quad (35)$$

La relación de transmisión usada en las simulaciones ha dependido de los motores usados y sus parámetros.

Como se ha podido comprobar en el Capítulo 4, las relaciones de transmisión elegidas han sido:

- Para el motor de imanes permanentes:

$$i = \frac{\omega_{entrada}}{\omega_{salida}} = \frac{6000}{1175.38} \approx 5.1 \quad (36)$$

- Para el motor de inducción:

$$i = \frac{\omega_{entrada}}{\omega_{salida}} = \frac{4000}{1175.38} \approx 3.4 \quad (37)$$



## 6. Resultados obtenidos

### 6.1. Respuesta dinámica

Las señales que se consideran de interés han sido agrupadas para mostrarse conjuntamente y conseguir una comparación o correlación que ayuden a verificar la calidad de los resultados obtenidos. Esto ha sido así para ambos modelos, como se observa en las Figuras 62 y 63.

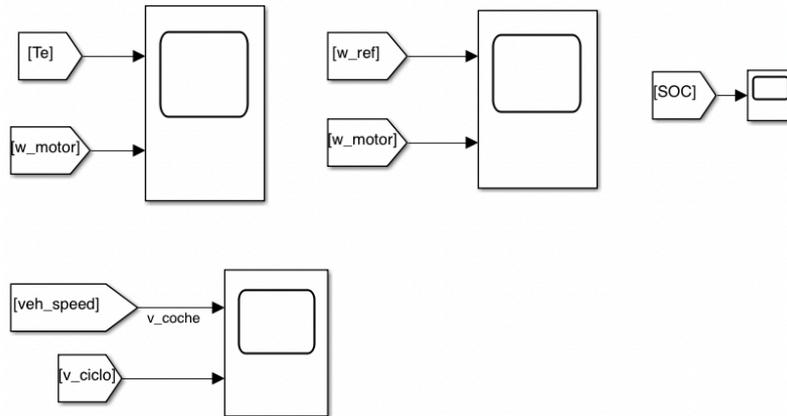


Figura 62 - Scopes de los resultados de la simulación PMSM.

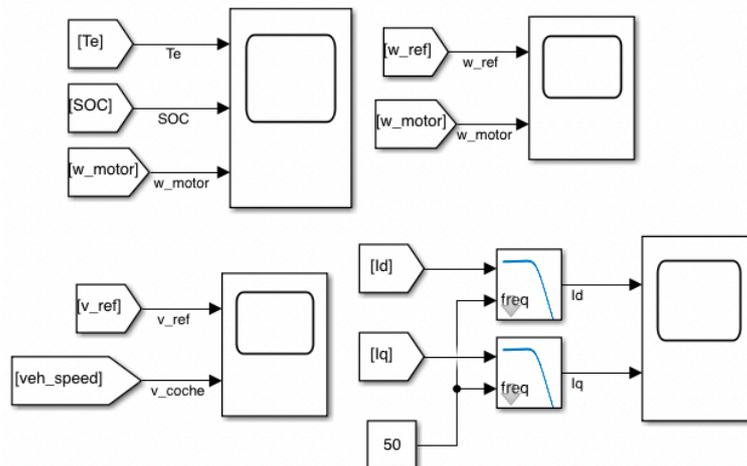


Figura 63 - Scopes de los resultados de la simulación IM.

En el modelo de imanes permanentes se han agrupado la velocidad angular del motor con la de referencia, la velocidad lineal del coche con la del ciclo WLTP, el SOC de la batería y el par electromagnético del motor. Por otro lado, en el modelo del motor de inducción se han

agrupado la velocidad angular del motor con la de referencia, la velocidad lineal del coche con la del ciclo WLTP, el SOC de la batería junto al par electromagnético del motor y por otro lado las corrientes  $I_d$  e  $I_q$ .

A continuación, se muestran en las Figuras 64 y 65 la velocidad lineal que ha seguido el coche modelado con respecto a la velocidad de referencia procedente del ciclo de homologación WLTP.

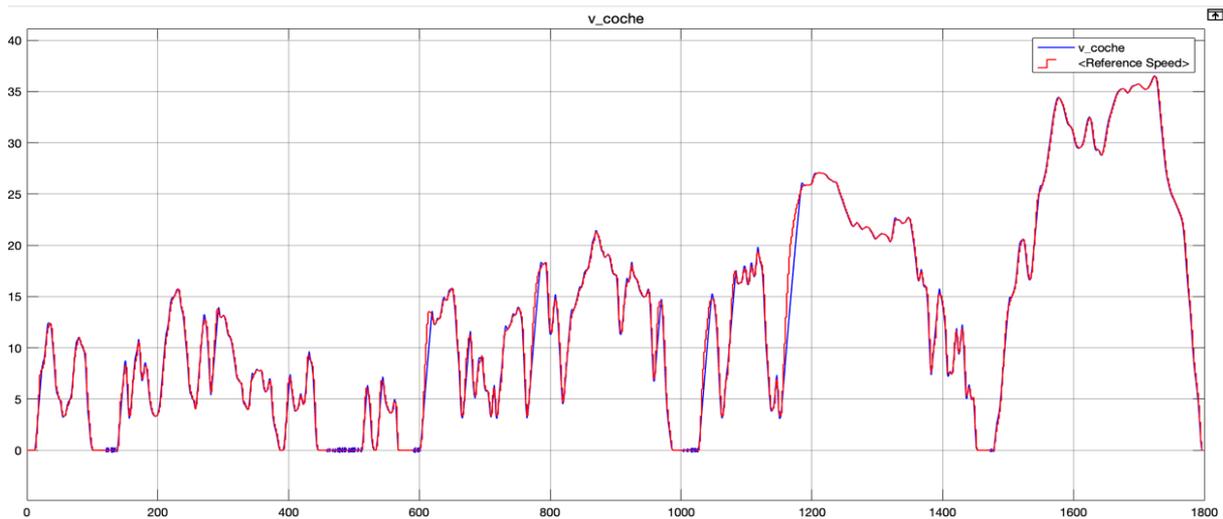


Figura 64 - Comparativa de las velocidades lineales en modelo PMSM.

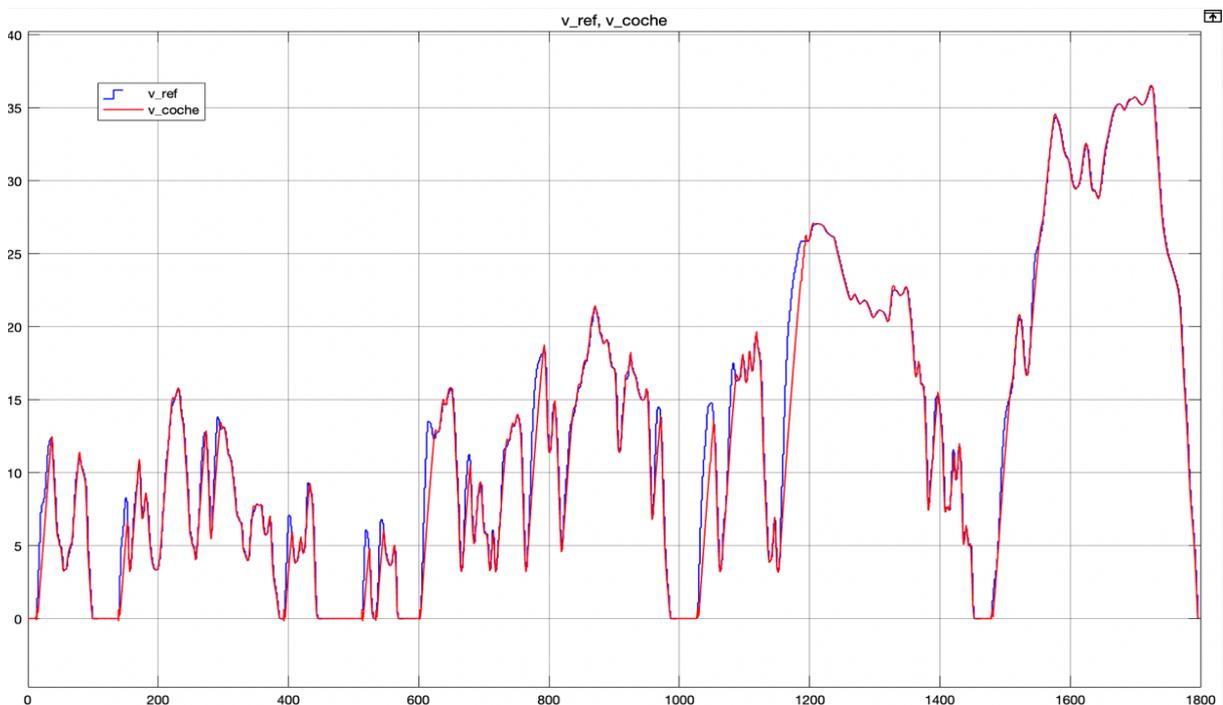


Figura 65 -Comparativa de las velocidades lineales en modelo IM.

En el modelo de PMSM, tal y como expresa la leyenda de la propia gráfica, la señal roja se corresponde a la velocidad de referencia procedente del ciclo WLTP, mientras que la azul representa la velocidad de avance del modelo de coche eléctrico implementado. En el caso del modelo de IM, esto es justo al revés, es decir, la señal azul se corresponde a la velocidad de referencia procedente del ciclo WLTP y la señal roja representa la velocidad lineal del coche eléctrico. La unidad en la que están representadas estas señales es m/s.

En ambos casos, se puede observar que ambas señales son casi idénticas; se han podido seguir todas las variaciones de velocidad con una precisión muy alta.

Pero, en el modelo de PMSM, sí se aprecia que en los momentos de reposo en los que el vehículo se debería encontrar parado, aparece un pequeño tramo de oscilación de velocidad procedente de la inestabilidad del motor de imanes permanentes en la simulación.

Además, en algunos instantes de aceleración como los tramos de 600 a 620 segundos o 1150 a 1200 segundos, se aprecia que la aceleración del coche eléctrico es algo más lenta que la de referencia. Este fenómeno se acentúa todavía más en el modelo de IM; sin embargo, en este, en el reposo teórico, el motor sí se encuentra prácticamente parado, eliminando el rizado a velocidad cero del motor de imanes permanentes.

La velocidad objetivo de los 130 km/h se alcanza sin problema en ambos modelos.

Para que el automóvil haya ido modificando su velocidad de marcha ha sido necesario realizar el control de velocidad de los motores eléctricos. Del control FOC de velocidad del modelo PMSM se pueden observar los resultados en la Figura 66, en la que se representan la velocidad de referencia del ciclo WLTP en azul y la velocidad del rotor en rojo. Por otro lado, en la Figura 67, se representa el resultado del control en bucle cerrado del motor de inducción, en la que la señal azul se corresponde con la velocidad de referencia del ciclo WLTP y la señal roja con la velocidad del rotor.

Por comodidad se ha decidido que la unidad de representación sea de rpm, ya que resulta más sencilla de interpretar esta unidad que los rad/s.

En este punto se encuentran dos seguimientos de velocidad muy diferentes. En el caso del motor de imanes permanentes, el control de velocidad realizado ha sido capaz de seguir casi a la perfección la velocidad de referencia en la mayor parte de los tramos de velocidad. Sin embargo, en el caso del motor de inducción, el control ha seguido la trayectoria de la velocidad de referencia, pero cometiendo durante toda la simulación un error de posición muy evidente. Se observa que éste se hace mayor conforme la velocidad va aumentando, llegando a ser máximo en el tramo de los 1500 a 1800 segundos. Este error se muestra con mayor detalle en la Figura 68.

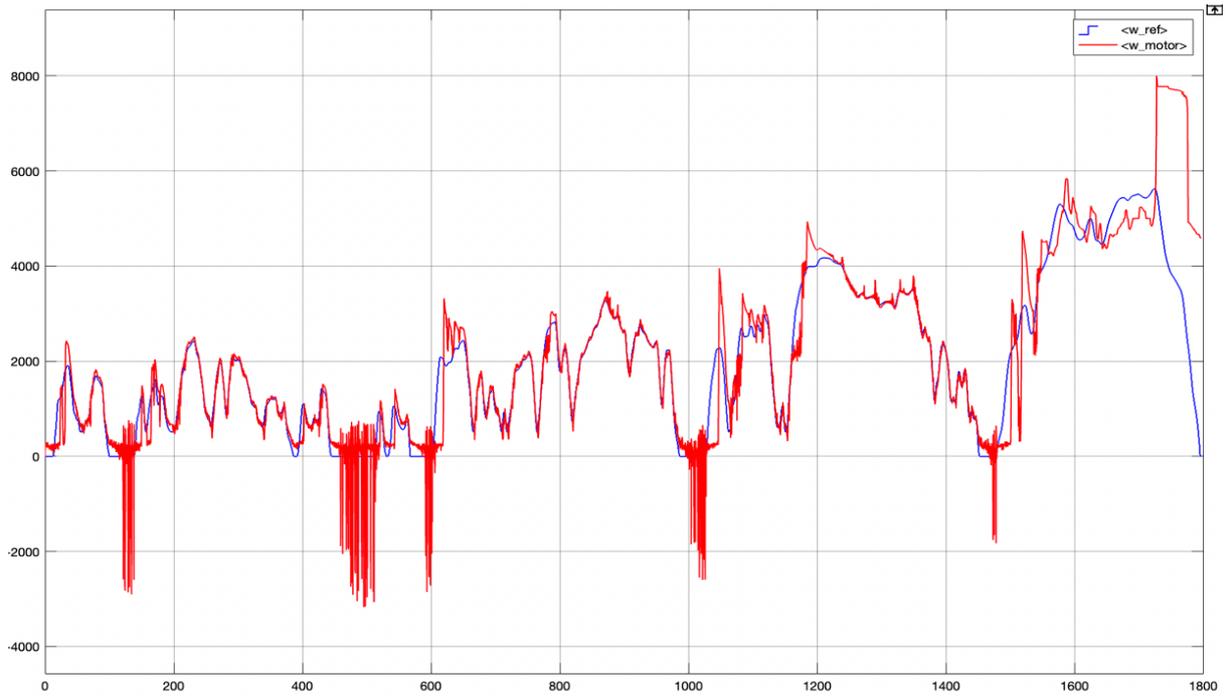


Figura 66 - Resultado del control de velocidad del modelo de PMSM.

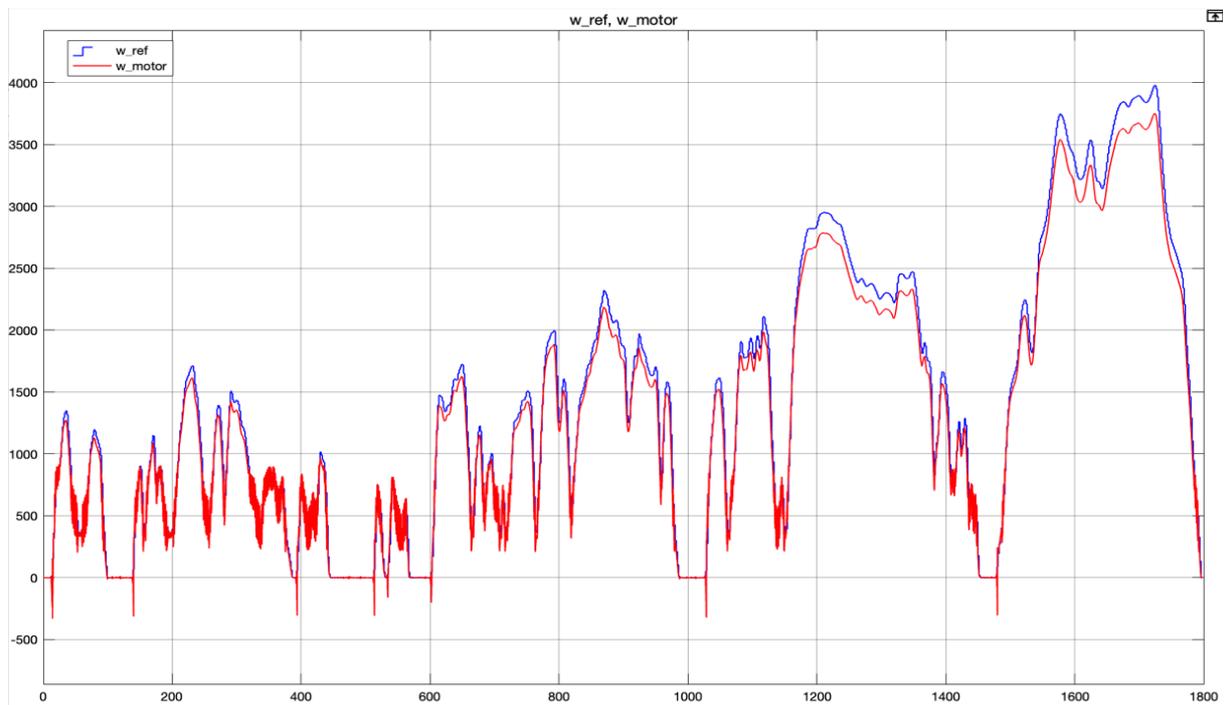


Figura 67 - Resultado del control de velocidad del modelo de IM.

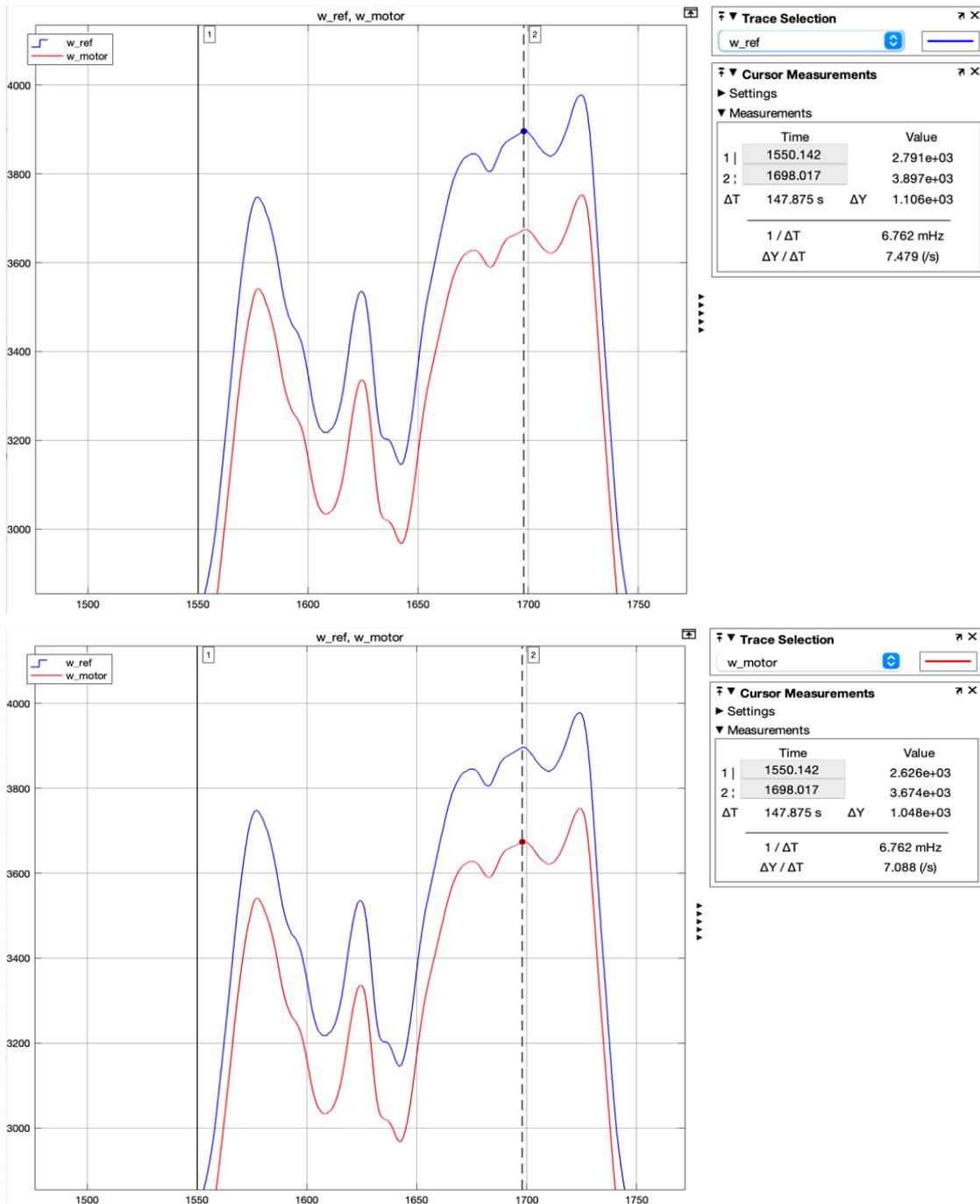


Figura 68 - Detalle del error de posición de la velocidad del motor de inducción.

Se puede ver que en el instante 1698.017 segundos la diferencia entre señales es de 250 rpm. Se trata de un error considerable para tener en cuenta de cara a una posible aplicación del motor de inducción.

Las causas más probables de este error son: se trata de un motor asíncrono que nunca alcanza la velocidad objetivo. Su velocidad nominal es de 1500 rpm, a partir de este punto, la

inestabilidad del motor se acusa más y resulta más impredecible para el control de este. Y la principal razón es que el control aplicado presenta algunas carencias de cara a la respuesta dinámica del motor. El control elegido es sencillo y capaz de seguir una velocidad de referencia, pero a costa de perder precisión y provocar un error de posición bastante acusado.

Aunque presenta esta gran desventaja, el motor de inducción, a diferencia del motor de imanes permanentes sí llega a detenerse y no presenta oscilaciones durante el reposo. Esto es así en los instantes de 20, 120, 600, 1050 y 1500 segundos. En estos tramos no solamente aparecen oscilaciones si no que la velocidad no llega a alcanzar el valor de cero. Se asume que este comportamiento solamente forma parte de un aspecto de la simulación.

Por su parte, la mayor inestabilidad apreciable en el motor de inducción aparece en algunos tramos de frenada por lo que se asume que su origen recae en la generación del par negativo en favor de la frenada regenerativa.

En ambos casos, el tramo de velocidades muy altas (a partir de 1500 segundos) es el más impreciso. Además, para la relación de transmisión elegida del modelo de PMSM, la velocidad del motor debe alcanzar casi el doble de su velocidad nominal y se observa que a partir de las 4500 rpm, aparece un error de posición ya que el control no es capaz de alcanzar la velocidad que se le exige. Tal es así que es incapaz de alcanzar las 6000 rpm predefinidas por la relación de transmisión y es precisamente cuando llega al instante de velocidad máxima, cuando la velocidad del motor aumenta de manera brusca. Esto se debe a la frenada tan pronunciada que se produce a continuación. Esta frenada se traduce en que el par de carga del motor pase de ser máximo, por la exigencia de alcanzar las velocidades máximas, a cero por querer detenerse el vehículo, como se puede observar en la Figura 69.

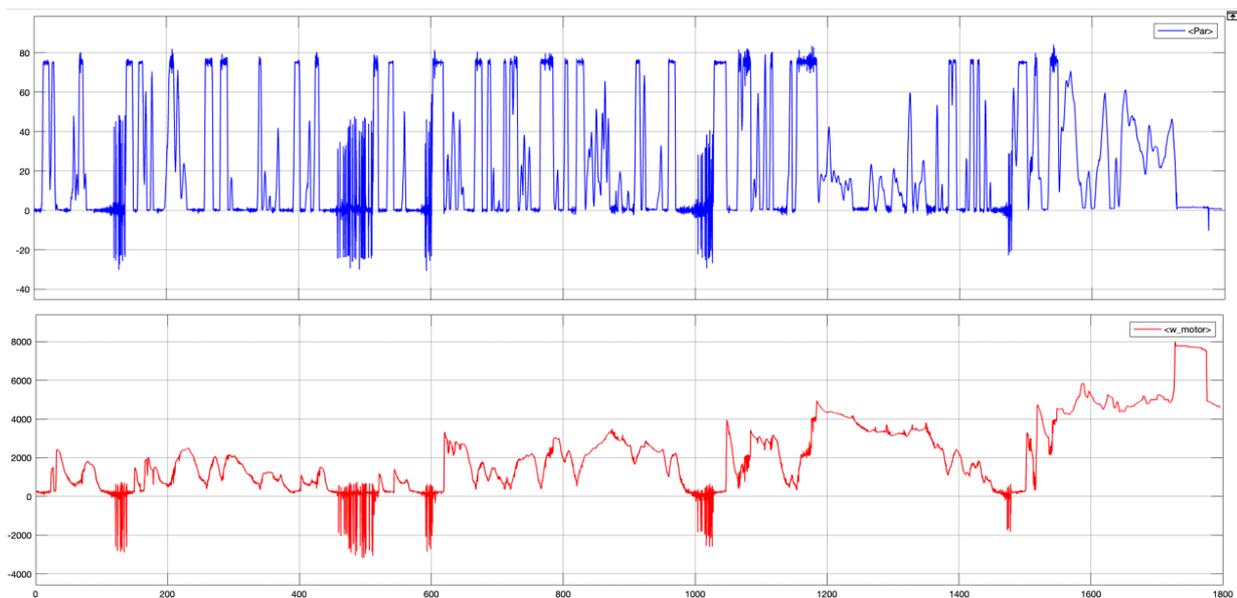


Figura 69 – Par electromagnético del motor de imanes permanentes.

Es por ello por lo que, en el momento en que desaparece este par, la velocidad del PMSM se dispara momentáneamente. Una vez solventado este momento de inestabilidad, el control del motor intenta volver a seguir la referencia.

El par de carga del motor es modelado mediante la señal de aceleración del bloque “Longitudinal Driver”. Dicha señal se muestra en la Figura 70.

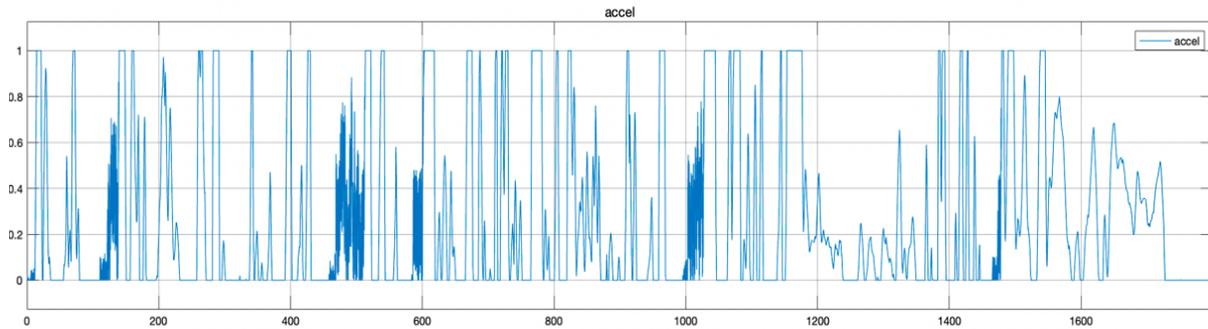


Figura 70 - Señal de aceleración del PMSM.

Parece evidente que el origen de la inestabilidad o ruido existente en la Figuras 66 y 69 con respecto al PMSM, es esta señal de aceleración. Estas oscilaciones se traspasan al par de carga y a su vez a las señales del par electromagnético del motor y de la velocidad del rotor.

De manera análoga al PMSM, el par electromagnético generado por el motor de inducción se representa en la Figura 71. Se recuerda en este momento que en este modelo sí se ha implementado la frenada regenerativa por lo que, en los tramos en los que el vehículo frene (diferente a decelerar) se genera un par negativo proporcional a la presión del pedal. Esto viene dado por las señales de aceleración y frenada del bloque “Longitudinal Driver”, las cuales se representan en la Figura 72.

Se observa que en todo momento el motor es capaz de generar un par muy alto, del término de los 200 Nm en momentos puntuales.

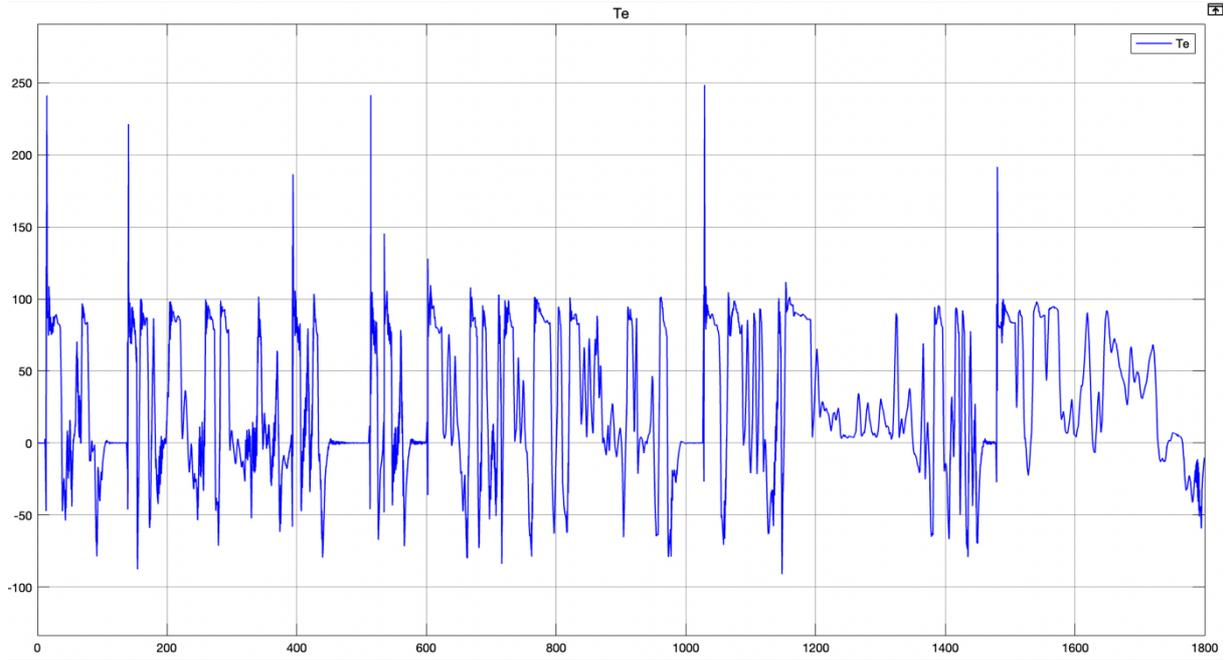


Figura 71 - Par electromagnético del motor de inducción.

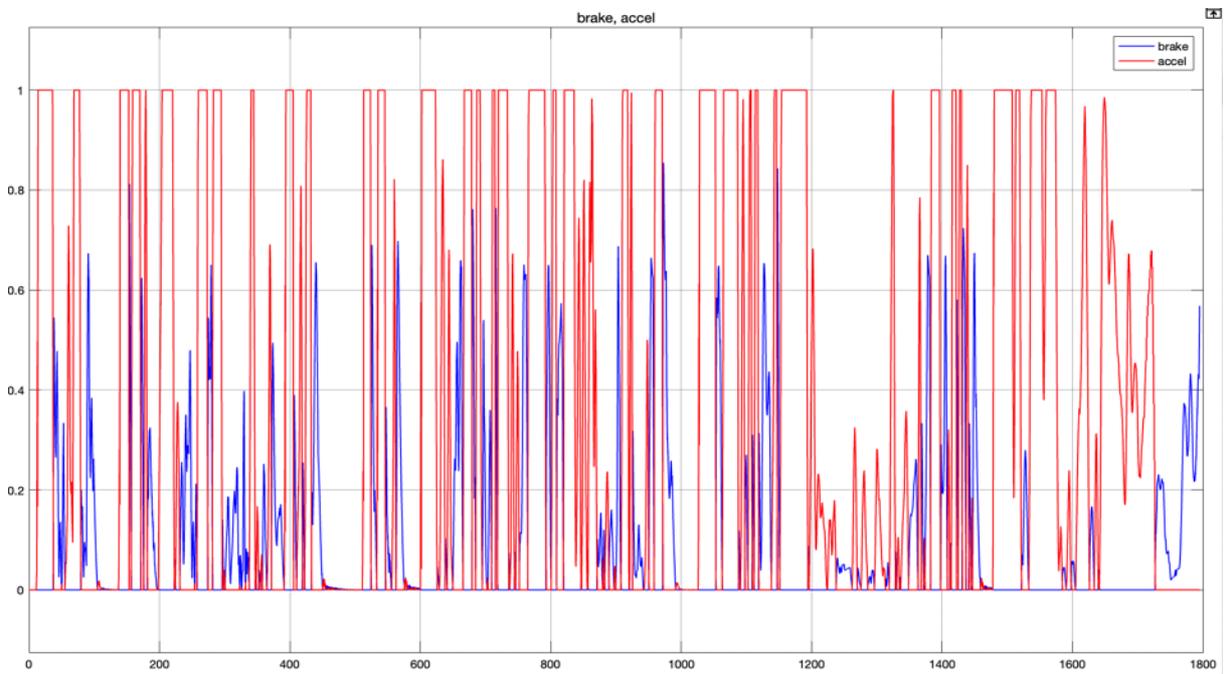


Figura 72 - Señales del control del par de carga del motor de inducción.

El fenómeno de la frenada se aprecia perfectamente en el último tramo de las gráficas, a partir de 1700 segundos.

Además, aunque de manera poco precisa, se puede observar como cuando el par de carga es máximo en múltiples instantes de la simulación, el par electromagnético del motor es superior a este valor, variando entre los 80 y 100 Nm.

Una vez analizadas las respuestas dinámicas de ambos modelos, se percibe una pequeña incongruencia al comparar la velocidad lineal del coche y la velocidad del motor. Y es que ambas deberían tener idéntica forma de onda, pero siendo proporcionales, donde dicha proporción o escala viene dado por la relación de transmisión de cada motor. Es decir, al existir una relación de transmisión, las ruedas deberían girar acorde a la velocidad del motor, manteniendo el comportamiento de la velocidad del rotor.

Esto no es así debido a una sencilla razón propia de las premisas de la simulación. Y es que la generación de la velocidad lineal se produce cuando el motor vence el par de carga introducido. Es por esto por lo que, aunque el motor no gire a la velocidad que se espera, si es capaz de generar un par mayor o igual a la carga, la velocidad lineal resultante del subconjunto mecánico va a resultar completamente correcta.

## 6.2. Consumo energético

Como aspecto secundario, pero crucial para conocer el comportamiento de los motores de tracción analizados en este trabajo, se procede a evaluar el consumo energético que ha supuesto cada uno de los motores.

Para ello, se ha representado el estado de carga (SOC) de la batería. En la Figura 73 se muestra la descarga acusada en la simulación del modelo con motor de imanes permanentes. De la misma manera, con respecto al motor de inducción, el SOC de la batería de su modelo se representa en la Figura 74.

Se observa que la variación de carga es de apenas un 2% de la capacidad total. Esto se debe a que la capacidad de la batería se había sobredimensionado para solventar el problema de la inestabilidad del control.

Para conocer con mayor precisión cuál ha sido el consumo energético del motor de imanes permanentes se ha decidido realizar un zoom sobre el final de la señal. Este detalle se muestra en la Figura 75.

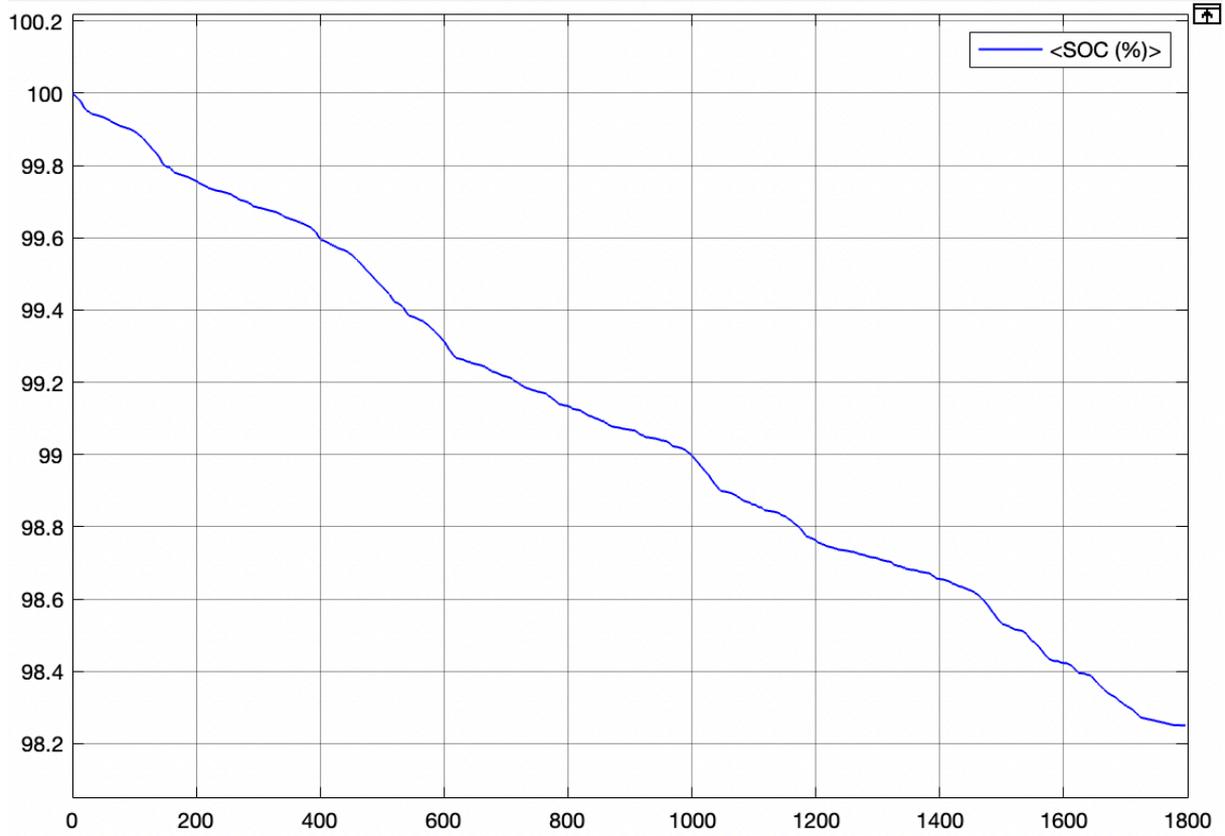


Figura 73 - Estado de carga de la batería en el modelo PMSM.

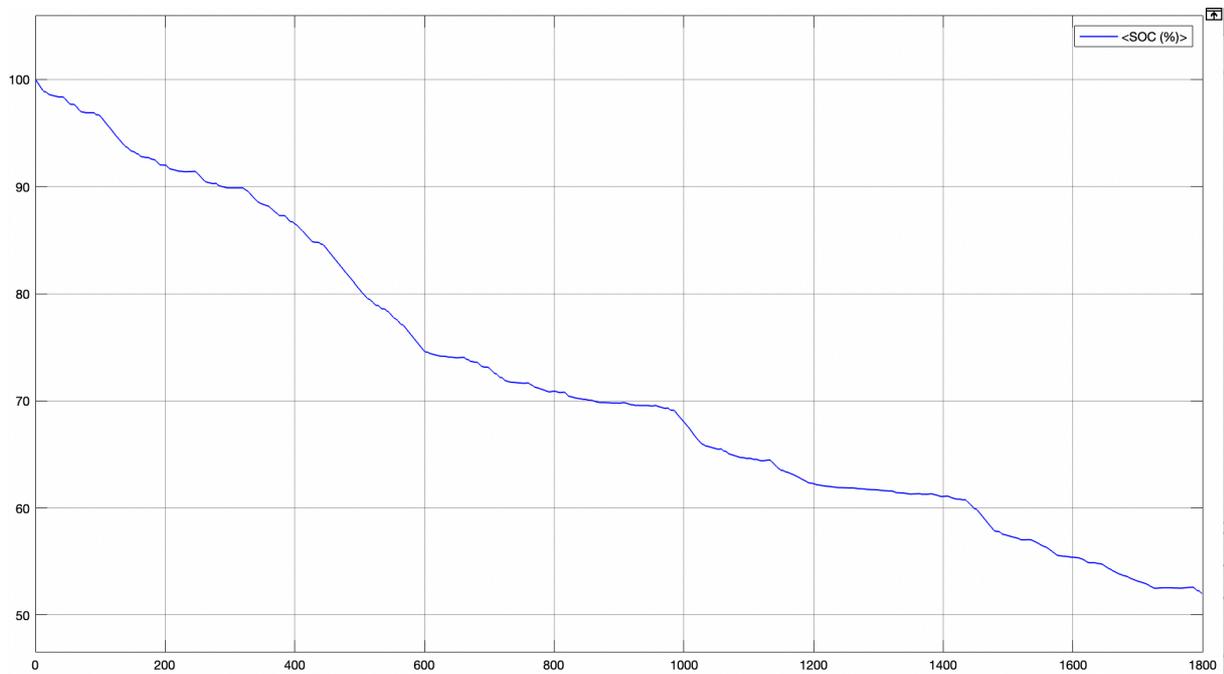


Figura 74 - Estado de carga de la batería en el modelo IM.

Se observa que la variación de carga es de casi un 50% de la capacidad total. A priori, este valor resulta algo exagerado en comparación con el 98% de la batería del modelo de PMSM, pero se debe a la enorme diferencia de la capacidad inicial de la batería.

También destaca el hecho de que, pese a haber implementado la frenada regenerativa, en ningún momento la batería aumenta su carga. Sí es cierto que en los tramos de frenada y reposo la batería permanece casi constante y no disminuye, pero este comportamiento está lejos del esperado.

Para conocer con mayor precisión cuál ha sido el consumo energético del motor eléctrico se ha decidido realizar un zoom sobre el final de la señal. Este detalle se muestra en la Figura 76.

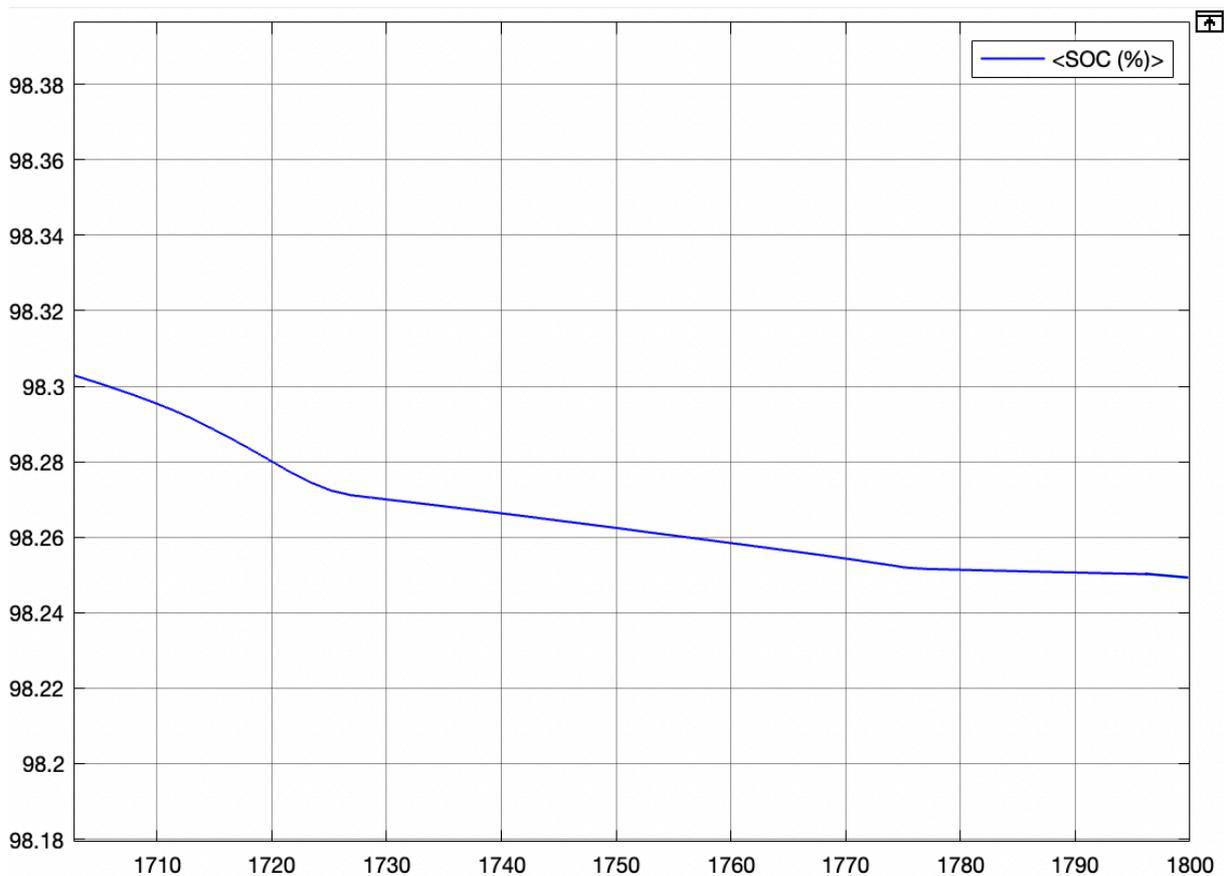


Figura 75 - Detalle del SOC de la batería del modelo PMSM.

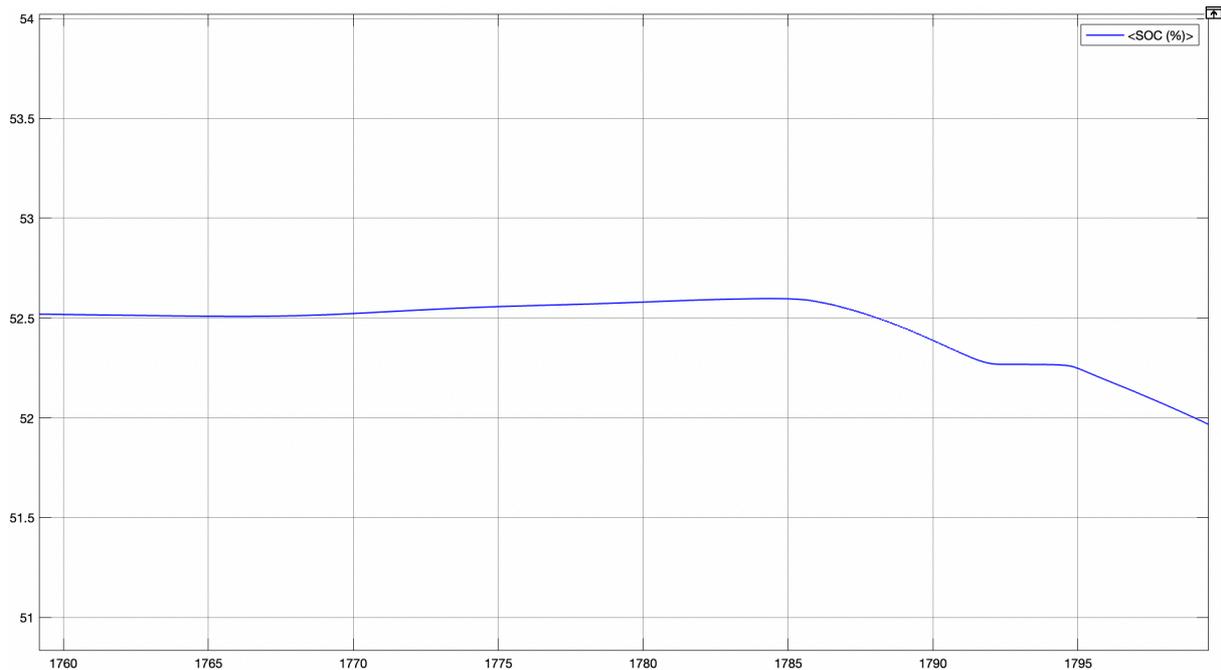


Figura 76 - Detalle del SOC de la batería del modelo IM.

En el caso del motor de imanes permanentes se parte de la premisa de que la capacidad inicial de la batería era de 500 Ah y la tensión 560 V, obteniendo una capacidad equivalente de 280 kWh.

Puesto que la capacidad final de la batería ha sido del 98.25%, esto resulta en que la potencia consumida ha sido de:

$$280 - 280 * \frac{98.25}{100} = 4.9 \text{ kWh} \quad (38)$$

Puesto que el ciclo WLTP tiene un recorrido de 23.3 km, se puede asumir que el consumo promedio a los 100 km sería:

$$4.9 * \frac{100}{23.3} = 21.03 \text{ kWh}/100 \text{ km} \quad (39)$$

Este valor puede considerarse algo alto, aunque entra dentro de los márgenes realistas, por lo tanto, se considera que la autonomía obtenida en este modelo es correcta.

De manera análoga se procede con la batería del modelo del motor de inducción, en el que la capacidad inicial de su batería era de 30 Ah y la tensión 400 V, obteniéndose una capacidad equivalente de 12 kWh.

Puesto que la capacidad final de la batería ha sido del 52%, esto resulta en que la potencia consumida ha sido de:

$$12 - 12 * \frac{52}{100} = 5.76 \text{ kWh} \quad (40)$$

De igual manera, ya que según el ciclo WLTP se recorren 23.3 km, se puede asumir que el consumo extrapolado a 100 km sería:

$$5.76 * \frac{100}{23.3} = 24.72 \text{ kWh/100 km} \quad (41)$$

El consumo energético del motor de inducción resulta alto, tanto en comparación con los valores teóricos de modelos de coche actuales como al compararlo con el resultado obtenido con el motor de imanes permanentes.



## 7. Conclusiones

Una vez desarrollados ambos modelos y obtenidos sus resultados, han sido sometidos a una comparación directa, tanto de la respuesta del control de velocidad implementado en cada uno de ellos como del consumo energético.

En primer lugar, el control vectorial FOC desarrollado para el modelo con el motor de imanes permanentes es considerablemente más complejo que el control en bucle cerrado con regulación PI utilizado en el motor de inducción. Esta complejidad añadida ha supuesto además unas limitaciones en la simulación de la batería, que han conseguido solventarse de cara a simular correctamente el modelo con PMSM. Por el contrario, con el control en bucle cerrado del motor de inducción no se encontraron problemas para ello.

Comentado esto, el control del IM ha resultado ser más impreciso pues en los resultados del control de velocidad, aparecía un error de posición muy acusado que no se encontraba en el modelo de PMSM. En cómputo general, con el control FOC se ha obtenido una respuesta dinámica mejor que con el control implementado en el modelo de IM.

Desde el punto de vista del consumo energético, el valor del SOC obtenido en el modelo del motor de imanes permanentes ha sido mucho más ajustado a la realidad. El consumo energético de este motor ha resultado ser más bajo que para el motor de inducción, por lo que resulta un gran punto a favor para el motor de imanes permanentes de cara a ser elegido por delante del motor de inducción para constituir un coche eléctrico.

Cabe destacar que este era el resultado esperado, pues el estado del arte constituye que este tipo de motor sea, a falta de pruebas del motor síncrono de reluctancia variable, el óptimo para el coche eléctrico utilitario.

Como conclusión final de este trabajo de investigación realizado sobre la comparativa de los dos motores eléctricos de tracción más usados en la actualidad, se puede afirmar que, dejando de lado el coste del propio motor, el motor de imanes permanentes resulta una alternativa con mejor consumo energético, y por tanto autonomía, que el motor de inducción.

Además, observando los resultados de este proyecto, también se confirma que, dada la complejidad de la aplicación, es necesario un control vectorial para satisfacer las exigencias dinámicas del coche eléctrico en detrimento de un control escalar más sencillo.

Como posibles alternativas y futuras mejoras, se podría añadir en primer lugar a la comparativa el motor de reluctancia variable. Este tipo de motor poco a poco está ganando importancia en la actualidad y está siendo objeto de I+D para su implementación en futuros modelos de coches eléctricos. De hecho, Tesla ya ha comenzado a montarlos en sus automóviles.

Por otro lado, la motricidad del coche también abre un abanico de posibilidades con el fin de conocer la mejor configuración que sea rentable y consiga mayor autonomía. Las posibilidades más directas son: eje delantero motriz, ambos ejes motrices (tracción a las cuatro ruedas) y un motor por rueda.

Por último, también se podría variar el control utilizado, implementando un control DTC, asumiendo en todo momento el sobrecoste que este acarrea.

Con todo, los resultados han resultado satisfactorios ya que reflejan perfectamente el estado actual de la tecnología de los coches eléctricos.

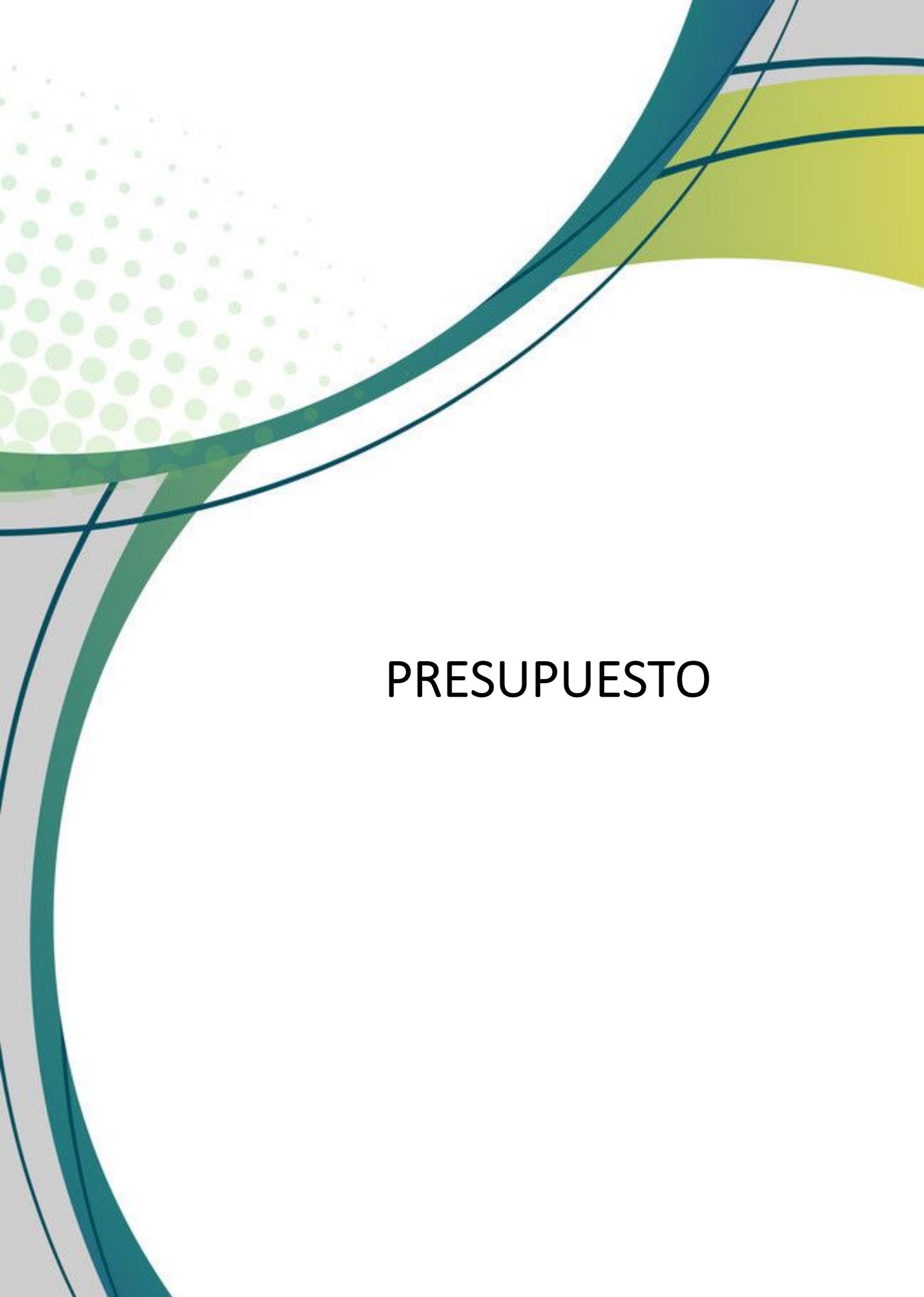
## 8. Bibliografía

- Almarza, O. (Octubre de 2018). UrbanTecno. Obtenido de urbantecno.com:  
<https://urbantecno.com/motor/tesla-fiabilidad-coches>
- Andrew, S. (1999). *Wikipedia*. Obtenido de Wikipedia:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Ányos\\_Jedlik](https://en.wikipedia.org/wiki/Ányos_Jedlik)
- Aragón, E. d. (Julio de 2018). *Movilidad Eléctrica*. Obtenido de movilidadelectrica.com:  
<https://movilidadelectrica.com/modos-y-tipos-de-carga-de-un-vehiculo-electrico/>
- Aranguren, Á. (Enero de 2018). *Motor y Racing*. Obtenido de motoryracing.com:  
<https://www.motoryracing.com/coches/noticias/el-diferencial-sus-partes-tipos-y-su-funcionamiento/>
- Baeza, M. (Diciembre de 2012). *El País*. Obtenido de elpais.com:  
<https://blogs.elpais.com/coche-electrico/2012/12/los-combustibles-mas-energeticos.html>
- BBVA. (Diciembre de 2019). *BBVA*. Obtenido de bbva.com:  
<https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/quien-invento-el-primer-coche-electrico/>
- Calderón, F. (Febrero de 2018). *La Vanguardia*. Obtenido de lavanguardia.com:  
<https://www.lavanguardia.com/historiayvida/historia-contemporanea/20180223/47311039683/el-coche-electrico-una-historia-que-se-repite.html>
- Callejo, A. (Julio de 2018). *Forococheselectricos*. Obtenido de forococheselectricos.com:  
<https://forococheselectricos.com/2018/07/que-configuracion-es-mejor-para-un-coche-electrico-traccion-delantera-o-trasera.html>
- CanalMotor. (Octubre de 2018). *Mapfre*. Obtenido de motor.mapfre.com:  
<https://www.motor.mapfre.es/coches/noticias-coches/que-tipos-de-hibridos-existen/>
- Cubero, S. C. (2014). *Sostenibilidad técnica, económica y ambiental de flotas comerciales de vehículos eléctricos*.
- Felipe, P. R. (Septiembre de 2014). *Scielo*. Obtenido de scielo.sld.cu:  
[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59012015000100008](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012015000100008)

- Fuentes, V. (Marzo de 2019). *Motorpasion*. Obtenido de motorpasion.com:  
<https://www.motorpasion.com/tecnologia/93-todos-coches-electricos-vendidos-2018-usaron-motores-iman-permanentes-estudio>
- Galbarro, H. R. (Marzo de 2021). *Ingemecánica*. Obtenido de Ingemecánica:  
<https://ingemecanica.com/tutoriales/objetos/CategoriasdeVehiculos.pdf>
- García, G. (Septiembre de 2020). *Híbridos y Eléctricos*. Obtenido de hibridosyelectricos.com:  
<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/coches-electricos-adios-traccion-delantera/20200911163954038031.html>
- García, J. V. (2018). *Sistemas de Transmisión y Frenado*. Macmillan Education.
- Gutierrez, D. (Julio de 2019). *Híbridos y eléctricos*. Obtenido de hibridosyelectricos.com:  
<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/drivemode-desarrolla-modulo-compacto-motor-transmision-conversor/20190704162212028807.html>
- H. M. R. Bargalló, J. L. (s.f.). *El vehículo eléctrico y la eficiencia energética global*.
- L. Jaime, H. F. (2011). *Cells, Batteries and Lithium-Ion Batteries for an Alternative*.
- Ladera, I. M. (Marzo de 2021). *Forococheselectricos*. Obtenido de forococheselectricos.com:  
<https://forococheselectricos.com/2021/04/espana-aprueba-ley-de-cambio-climatico-que-supone-el-fin-coche-gasolina-diesel-hibrido.html>
- Lambert, F. (Abril de 2019). *Electrek*. Obtenido de electrek.com:  
<https://electrek.co/2019/04/05/tesla-model-s-new-electric-motors/>
- Litoral, U. N. (2014). *Química General*.
- M., L. (2019). *Lovesharing*. Obtenido de lovesharing.com:  
<https://www.lovesharing.com/como-funciona-un-motor-electrico-de-coche/>
- Marti, J. (2012). *AreaTecnología*. Obtenido de areatecnologia.com:  
<https://www.areatecnologia.com/EL%20MOTOR%20ELECTRICO.htm>
- Martin, J. (Abril de 2019). *Motorpasion*. Obtenido de motorpasion.com:  
<https://www.motorpasion.com/revision/alla-plomo-tipos-baterias-para-coche>
- Martinez, J. (Junio de 2019). *Forococheselectricos*. Obtenido de forococheselectricos.com:  
<https://forococheselectricos.com/2019/06/hyundai-esta-desarrollando-coches-electricos-con-motores-en-rueda.html>
- Murias, D. (Abril de 2020). *Motorpasion*. Obtenido de motorpasion.com:  
<https://www.motorpasion.com/coches-electricos/anatomia-coche-electrico-su-sencilla-mecanica-al-desnudo>

- Nam, K. H. (2010). *AC Motor Control and Vehicle Applications*. London, New York: CRC Press.
- Nye, D. E. (2008). *Wikipedia*. Obtenido de Wikipedia:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas\\_Davenport\\_\(inventor\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Davenport_(inventor))
- P., M. (2015). *Máquinas Eléctricas Blog*. Obtenido de [maquinaselectricasblog.wordpress.com](http://maquinaselectricasblog.wordpress.com):  
<https://maquinaselectricasblog.wordpress.com/motor-de-induccion/>
- Penabad, L. R. (Octubre de 2018). *Noticias Coches*. Obtenido de [noticias.coches.com](http://noticias.coches.com):  
<https://noticias.coches.com/consejos/wltp-coches-electricos/307561>
- Plaza, D. (2015). *Motor*. Obtenido de [motor.es](http://www.motor.es): <https://www.motor.es/que-es/centralita-ecu>
- Rivera, E. N. (Junio de 2018). *Componentes Mecánicos*. Obtenido de [componentesmecanicos](http://componentesmecanicos.blogspot.com):  
<http://componentesmecanicos.blogspot.com/2018/06/reductores-de-velocidad-vii.html>
- Rodriguez, B. (Enero de 2020). *Foro Coches Eléctricos*. Obtenido de [forococheselectricos.com](http://forococheselectricos.com): <https://forococheselectricos.com/2020/01/los-diferentes-tipos-de-recarga-del-vehiculo-electrico.html>
- Unidas, N. (2008). *Protocolo de kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*.
- Zurita, J. (2020). *Electromovilidad*. Obtenido de [electromovilidad.net](http://electromovilidad.net):  
<http://electromovilidad.net/historia-del-vehiculo-electrico/>





# PRESUPUESTO



## 1. Introducción

En este capítulo del proyecto se recoge el coste de este diferenciando recursos materiales de recursos humanos.

Este trabajo de investigación se ha llevado a cabo durante diez meses en los que principalmente se han consumido horas de trabajo del ingeniero técnico a su cargo. Sin embargo, también se debe tener en cuenta el uso de un ordenador que satisfaga las necesidades de las simulaciones realizadas y las licencias oficiales del Software empleado.

## 2. Recursos materiales

El desglose de los recursos materiales empleados para la elaboración de este trabajo da lugar a la siguiente tabla

### 2.1. Material amortizable

<b>Descripción</b>	<b>Coste Mensual</b>	<b>Coste Total</b>
Ordenador para la elaboración de simulaciones y memoria.	75 €/mes	750 €
Licencia Microsoft 365	7 €/mes	70 €
Licencia AutoCAD LT	67 €/mes	670 €
Licencia Matlab (anual prorrateada a 12 meses)	67 €/mes	670 €

### 3. Recursos humanos

Para el cálculo del coste de las horas invertidas en la elaboración del presente trabajo se ha estimado un precio de 25 €/hora. Además, también se han añadido los desplazamientos puntuales para las reuniones concertadas con los tutores del proyecto.

A continuación, se desglosa el total de horas invertidas:

Descripción	Horas	Coste Total
Objeto y alcance	5	150 €
Especificaciones y necesidades	10	300 €
Limitaciones y condicionantes	10	300 €
Alternativas	30	900 €
Justificación de la solución	15	450 €
Estudio técnico del estado del arte	30	900 €
Elaboración de modelos	75	2250 €
Simulaciones	75	2250 €
Conclusiones	10	300 €
Redacción de la documentación	100	3000 €
<b>Total</b>	<b>360</b>	<b>10800 €</b>

#### 3.1 Otros costes

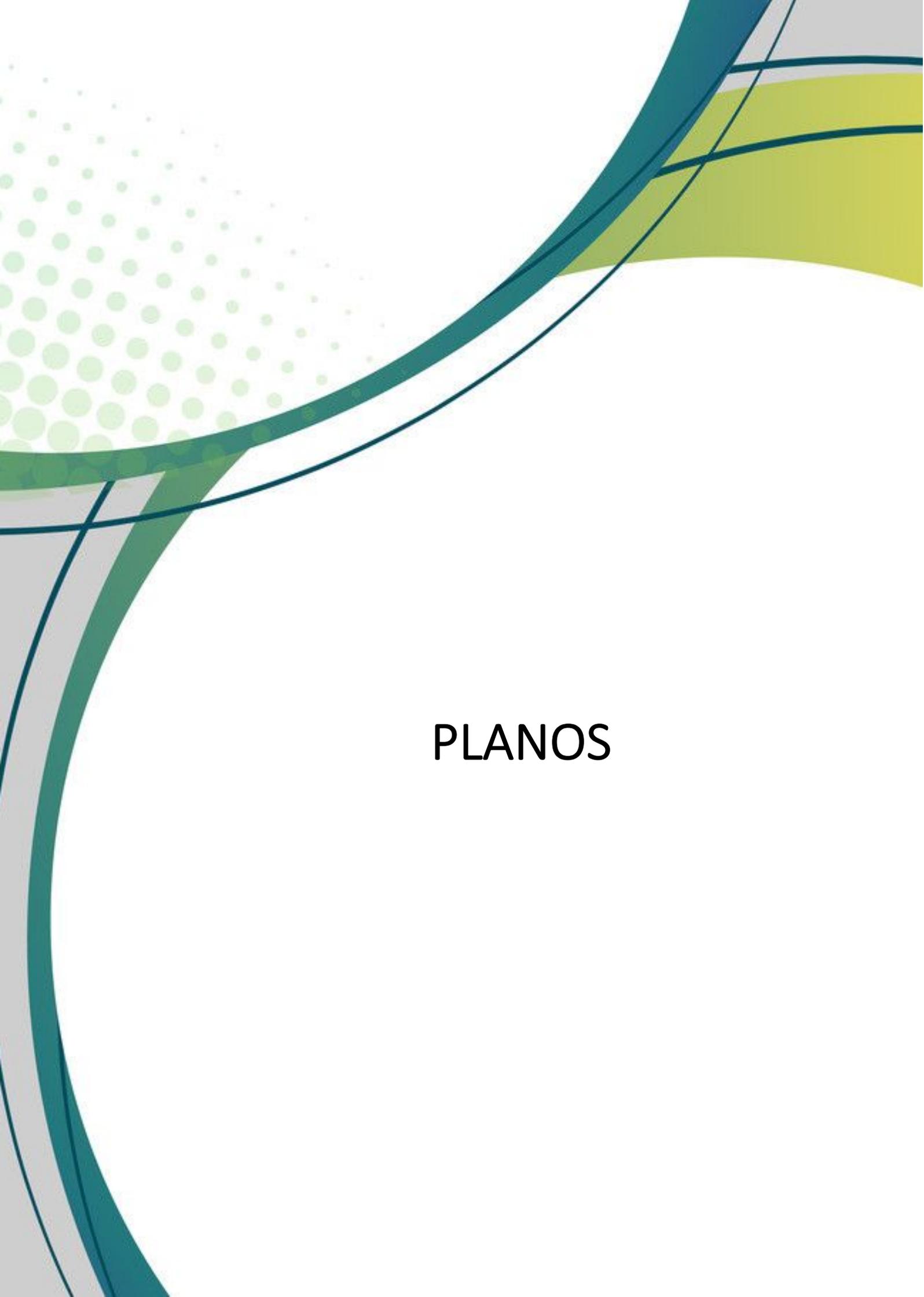
Descripción	Porcentaje	Coste Total
Beneficio industrial	6%	777,6 €
Gastos generales	13%	1684,8 €

#### 3.2 Coste total

Una vez expresados todos los costes relacionados con este proyecto, el coste total resultante es:

Coste Total	15422,40 €
Impuestos (21%)	3238,71 €
<b>Importe final</b>	<b>18661,11 €</b>

Por tanto, el precio del presenta trabajo asciende a la cantidad de **dieciocho mil seiscientos sesenta y un euros con once céntimos**.



PLANOS



