



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## **TRABAJO FIN DE GRADO**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
ÁREA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

# **TRABAJO FIN DE GRADO**

## **MODELADO Y CONTROL DE UN ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO NONAFÁSICO**

Grado en Ingeniería Eléctrica

Autor: Fabián Gómez Bustos

Tutor: Mario Javier Durán Martínez

Cotutor: Ángel González Prieto

MÁLAGA, septiembre de 2023

# AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría expresar mi agradecimiento a mis directores de este Trabajo Fin de Grado. Gracias Mario, porque debido al empeño y la implicación que tienes como profesor en tus clases yo no estaría aquí. Las ganas con la que ejerces tu profesión y la facilidad que tienes a la hora de explicar los conceptos más complejos me empujaron a embarcarme en este viaje. Gracias a ti Ángel, que me has acompañado desde el principio hasta el final de esta aventura, en la cual me has enseñado todo lo que necesité, y un poco más. Gracias por haber estado siempre que lo he necesitado, y que más que considerarte un tutor, te considero un amigo.

Aunque no aparezcas como mi tutor, también quería darte las gracias, Ignacio, que al igual que Mario, las ganas e ilusión que pones en tu trabajo me motivaron a creer que yo también podría realizar un trabajo de estas dimensiones.

Dar las gracias también a todos los compañeros que me han acompañado durante mis años universitarios, puesto que sin ellos no habría llegado hasta aquí. En especial quería agradecerte Omar, por todos tus consejos, por todas las charlas, y por toda la ayuda que me has podido dar a lo largo de estos últimos años.

Muchas gracias a mi madre, la que siempre está ahí, tanto en los buenos como en los malos momentos. Gracias por tus “tu hazme caso a mí, que yo soy tu madre”, gracias por todo el cariño que me das, día sí y día también, gracias por ser mi madre. Gracias a mi padre, por tener siempre una solución para los problemas, por animarme y darme fuerza cuando la he necesitado. Gracias a mi hermana, por animarme, por sus chistes sin gracia, pero que, sin ellos, no sería mi hermana. Y gracias a toda mi familia, por quererme, y por hacer que el camino sea lo más llevadero posible.

Por último, quería darte las gracias a ti, Ana, por apoyarme en todo momento, porque con tu ayuda he sido capaz de superarme cada día, y poder alcanzar todos los objetivos que me he planteado.

# ÍNDICE

RESUMEN .....	7
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
1.1. ANTECEDENTES .....	8
1.2. OBJETIVOS .....	9
<b>CAPÍTULO 2 – VEHÍCULOS ELÉCTRICOS .....</b>	<b>10</b>
2.1. INTRODUCCIÓN .....	10
2.2. CONTEXTO HISTÓRICO .....	11
2.3. TIPOS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS .....	13
2.4. PARTES DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO .....	17
<b>CAPÍTULO 3 - MÁQUINAS ELÉCTRICAS.....</b>	<b>21</b>
3.1. INTRODUCCIÓN .....	21
3.2. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS .....	22
3.3. CLASIFICACIÓN .....	25
3.4. MÁQUINAS MULTIFÁSICAS.....	27
<b>CAPÍTULO 4 – MODELO MÁQUINA SÍNCRONA DE IMANES PERMANENTES .....</b>	<b>29</b>
4.1. INTRODUCCIÓN .....	29
4.2. MODELO DE FASES .....	30
4.3. MODELO EN $\alpha - \beta$ . TRANSFORMADA DE CLARKE.....	31
4.4. MODELO EN $d - q$ . TRANSFORMADA DE PARK .....	34
4.5. MODELO VSD DE LA MÁQUINA .....	36
4.6. MODELO DEL CONVERTIDOR.....	40
4.6.1. <i>FUNCIONAMIENTO</i> .....	40
4.6.2. <i>MODELO MATEMÁTICO</i> .....	41
<b>CAPÍTULO 5 – MODELO DEL CONTROL PREDICTIVO.....</b>	<b>43</b>
5.1. INTRODUCCIÓN .....	43
5.2. CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO .....	43
5.3. SELECCIÓN DE ESTADOS DE CONMUTACIÓN.....	50
<b>CAPÍTULO 6 – SIMULADOR .....</b>	<b>52</b>
6.1. INTRODUCCIÓN .....	52
6.2. BLOQUE MODELO DE LA MÁQUINA .....	53
6.2.1. <i>SUBSISTEMAS TRANSFORMADAS</i> .....	54
6.2.2. <i>SUBSISTEMA MODELO EN d-q</i> .....	55
6.3. BLOQUE MODELO CONTROL PREDICTIVO .....	57
6.4. BLOQUE CONVERTIDOR .....	60
6.5. SIMULADOR COMPLETO .....	61
<b>CAPÍTULO 7 – RESULTADOS DE SIMULACIÓN .....</b>	<b>62</b>
7.1. VALORES PARÁMETROS UTILIZADOS .....	62
7.2. RESULTADOS SIMULACIÓN BAJA VELOCIDAD.....	63
7.3. RESULTADOS SIMULACIÓN ALTA VELOCIDAD.....	65
7.4. RESULTADOS SIMULACIÓN SALTO VELOCIDAD .....	67
<b>CAPÍTULO 8 – CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....</b>	<b>69</b>
8.1. CONCLUSIONES .....	69
8.2. LÍNEAS FUTURAS .....	70
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>71</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Matriculaciones de coches eléctricos y cuota de ventas en China, Estados Unidos y Europa 2018-2022. Fuente [3].	10
Figura 2. Producción de vehículos en Estados Unidos. Fuente [4].	11
Figura 3. Segunda generación del Tesla Roadster. Fuente [5].	12
Figura 4. Vehículo eléctrico de batería (BEV). Fuente [6].	13
Figura 5. Modelo Toyota Prius. Fuente [7].	14
Figura 6. Modos de funcionamiento de un EREV. Fuente [8].	15
Figura 7. Motor con combustión de hidrógeno. Fuente [9].	16
Figura 8. Esquema sistema de control.	18
Figura 9. Esquema flujo energía batería - motor.	19
Figura 10. Esquema flujo energía motor - batería.	19
Figura 11. Rueda polar de un alternador trifásico. Fuente [10].	21
Figura 12. Esquema de elementos principales de las máquinas eléctricas rotativas. Fuente [11].	22
Figura 13. Explosionado estátor de polos lisos de una máquina eléctrica.	23
Figura 14. Explosionado rotor de polos lisos de una máquina eléctrica.	23
Figura 15. Tipos de rotor en máquinas síncronas. a) Rotor bobinado y b) Rotor jaula de ardilla. Fuente [12].	25
Figura 16. Tipos de disposición de los imanes en el rotor. a) En la superficie y b) Insertados. Fuente [13].	26
Figura 17. Diferentes configuraciones de desplazamiento de fases: a) Simétrica, b) Asimétrica, c) Coincidentes. Fuente [14].	27
Figura 18. Sistema de referencia por fase. Fuente [13].	30
Figura 19. Comportamiento señal en sistema de referencia de fases.	30
Figura 20. Sistema de coordenadas $\alpha$ - $\beta$ . Fuente [13].	31
Figura 21. Comportamiento señal en sistema de referencia $\alpha$ - $\beta$ .	31
Figura 22. Sistema de referencia d-q. Fuente [13].	34
Figura 23. Comportamiento señal en sistema de referencia d-q.	34
Figura 24. Circuito equivalente de una máquina síncrona: a) componente d y b) componente q.	38
Figura 25. Circuito equivalente máquina síncrona de imanes permanente componente q.	38
Figura 26. Topología del accionamiento eléctrico nonafásico empleado.	40
Figura 27. Esquema de control MPC en un accionamiento trifásico.	44
Figura 28. Alineación del eje d con el flujo magnético.	45
Figura 29. Vectores de tensión en el subespacio a) $\alpha\beta$ , b) $xy_1$ , c) $xy_2$ .	51
Figura 30. Entradas y salidas del bloque del modelo de la máquina.	53
Figura 31. Bloques de las transformadas de Clarke, Park y sus inversas.	54
Figura 32. Subsistema del modelo en d-q.	55
Figura 33. Modelo en Simulink de los circuitos equivalentes en a) componente d y b) componente q.	55
Figura 34. Modelo en Simulink de los circuitos equivalentes en a) componentes $xy_1$ y b) componente componentes $xy_1$ .	56
Figura 35. Modelos en Simulink de la ecuación del par electromagnético y cálculo de la velocidad mecánica.	56
Figura 36. Bucle externo de velocidad.	57
Figura 37. Esquema suma de Riemman.	57
Figura 38. Bloque modelo control predictivo.	59
Figura 39. Bloque del convertidor.	60

Figura 40. Conjunto simulador completo.....	61
Figura 41. Simulación a baja velocidad: a) velocidad del motor, b) corrientes dq, c) corrientes xy1, d) corrientes xy2, e) par electromagnético, f) corrientes de fase en el devanado a1, b1 y c1 .....	64
Figura 42. Simulación a alta velocidad: a) velocidad del motor, b) corrientes dq, c) corrientes xy1, d) corrientes xy2, e) par electromagnético, f) corrientes de fase en el devanado a1, b1 y c1 ....	66
Figura 43. Simulación con cambio de velocidad: a) velocidad del motor, b) corrientes dq, c) corrientes xy1, d) corrientes xy2, e) par electromagnético, f) corrientes de fase en el devanado a1, b1 y c1 .....	68

## RESUMEN

---

Dada la situación actual del planeta, se ha vuelto esencial abordar la transición energética como una respuesta efectiva a los crecientes problemas de contaminación causados por las actividades humanas. Una de las fuentes de contaminación con un alto porcentaje se encuentra en el sector de transporte. Cada día se realizan innumerables viajes por carretera, por lo que es necesario de que esa transición energética llegue también en este sector. Una de las opciones que hoy en día está sobre la mesa son los vehículos eléctricos. Estos tipos de vehículos representan una solución parcial a esa contribución al calentamiento global. Es por ello por lo que están en continuo desarrollo, buscando obtener las mejores prestaciones posibles y poder competir de forma directa con vehículos más tradicionales.

Con objeto de contribuir a este desarrollo de vehículos eléctricos se presenta este documento en el que se estudia una máquina eléctrica de imanes permanentes de nueve fases. Esta máquina pertenece al grupo de máquinas multifásicas. Este tipo de sistema eléctrico se ha desarrollado con una mayor velocidad en las últimas décadas. Esto se debe gracias a los avances que se han conseguido en campos como la electrónica de potencia, creando procesadores capaces de adaptarse a este tipo de máquinas.

El presente trabajo está dividido en ocho capítulos. El primer capítulo presentará de manera detallada los antecedentes y objetivos que se plantean alcanzar con el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado. El segundo capítulo se definirán los aspectos más relevantes de los vehículos eléctricos, desde los tipos que hay, hasta las partes de las que consta éste. El tercer capítulo se dedicará al estudio de las máquinas eléctricas. Se desarrollará de manera precisa el funcionamiento de este tipo de máquinas, los componentes que las forman y se presentará una clasificación, viendo las diferentes configuraciones que se pueden adoptar. En este tercer capítulo también se hablará de las máquinas multifásicas, presentando sus características y los beneficios que tiene la utilización de este tipo de máquinas. En el capítulo cuatro se comenzará a desarrollar el modelo matemático de la máquina objeto de estudio. Se presentará tanto el modelo de fases de la máquina como las herramientas necesarias para plantear otro modelo en el que, gracias a las características, tanto de las herramientas utilizadas como de la máquina, se podrá trabajar de una manera más sencilla, y teniendo una comprensión más exacta del comportamiento de la máquina. En este capítulo también se definirá el modelo del convertidor, donde se detallará la tipología de este y su funcionamiento. En el capítulo cinco se desarrollará el modelo del control que se utilizará sobre la máquina. Será un control predictivo basado en modelo. Mediante una serie técnicas de estimación de parámetros se realizará el control, definiendo los estados de conmutación óptimos para cada instante en el que se evalúen los parámetros. En el capítulo cinco también se detallará la selección de estados de conmutación que se realizará sobre la máquina, a fin de poder obtener una mejor calidad de señal. En el capítulo seis se presentará el modelo realizado en el entorno de Simulink, donde se explicarán los detalles de la discretización de las ecuaciones del modelo desarrollado en el capítulo cuatro. Además, también se explicará con detalle la realización del modelo del control predictivo. En el capítulo siete se mostrarán los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas. Por último, en el capítulo ocho recoge las conclusiones obtenidas a raíz del desarrollo de este trabajo, así como una serie de líneas futuras de investigación.

**PALABRAS CLAVE:** Máquina multifásica, control predictivo, imanes permanentes, convertidor, vehículo eléctrico,

# CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. ANTECEDENTES

Hoy en día, el cambio climático supone uno de los mayores problemas a los que se ha enfrentado la humanidad. El aumento en la cantidad de noticias relacionadas con este asunto es cada vez más evidente. De manera preocupante, el tiempo para remediar los efectos negativos causados al planeta se está agotando rápidamente, lo que añade urgencia a la necesidad de abordar esta problemática. Según [1], la década de 2011-2020 ha sido la más cálida con una temperatura en 2019 superior en 1.1°C a los niveles preindustriales. El actual fenómeno de calentamiento global, de intensidad notable, encuentra su principal origen en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Para poder contrarrestar esta situación la humanidad se encuentra inmersa en la búsqueda de soluciones. La Unión Europea declaró en 2019 la emergencia climática y debido a esto se planteó el Pacto Verde Europeo [2]. Este pacto establece una ruta a seguir por los países de la Unión Europea con el objetivo de reducir las emisiones un 55% para 2030 con respecto a los niveles que se obtuvieron en 1990 con el objetivo final de alcanzar la situación de neutralidad climática para 2050.

Uno de los puntos a tratar dentro de ese pacto es garantizar que los nuevos vehículos de la UE produzcan cero emisiones de CO<sub>2</sub> en 2035. Según [3], el 80% del transporte, tanto de mercancías como de pasajeros corresponde con el transporte por carretera. Esto supone que el 25% de las emisiones totales de gases invernadero en España sea debido al transporte. Es por ello por lo que es necesario realizar mejoras dentro de este sector para poder conseguir una transición lo más rápido y eficiente posible hacia los vehículos eléctricos, de forma que se alcancen los objetivos planteados en el pacto.

Para facilitar la consecución de esta transición, resulta imperativo contar con los recursos necesarios. Es en este contexto que en los años recientes se han registrado notables avances en el campo de la electrónica de potencia. Estos progresos han posibilitado la reactivación de determinados dispositivos que habían caído en desuso debido a la escasa evolución experimentada en este ámbito. A manera de ejemplo, se han desarrollado máquinas eléctricas multifásicas, las cuales, a pesar de presentar diversas ventajas sobre sus contrapartes trifásicas tradicionales, habían permanecido en un estado de "stand-by" durante las últimas décadas. Este estancamiento se debía a la falta de conocimiento en el campo de la electrónica de potencia para aprovechar plenamente su potencial.

No obstante, el constante progreso en la electrónica de potencia, así como en los procesadores digitales de señales, ha revivido la relevancia de las máquinas multifásicas en la industria. Estos avances han abierto nuevamente espacios de aplicación para estas máquinas, permitiendo que desempeñen un papel activo en el sector.

Gracias a la reaparición de máquinas multifásicas se están dando grandes pasos dentro del sector de los vehículos eléctricos. Este tipo de máquinas representan un pequeño paso dentro de la transición energética que se está buscando en estos momentos, sin embargo, sigue siendo un paso fundamental para poder frenar el cambio climático que está sufriendo el planeta.

## 1.2. OBJETIVOS

El presente Trabajo Fin de Grado tiene el objetivo de crear un simulador de una máquina síncrona de imanes permanentes de nueve fases. Este objetivo principal, se dividirá en una serie de objetivos generales, cuyo fin último es el obtener un modelo de simulación que permita el estudio de este tipo de máquina eléctrica

El primer objetivo será el estudio de los principios físicos que rigen el funcionamiento de las máquinas eléctricas. También se estudiarán sus características y tipologías existentes. A continuación, se ampliará el estudio a las máquinas multifásicas, se prevé que puedan proporcionar un gran avance dentro del sector eléctrico, como se podrá comprobar a lo largo de este trabajo.

Una vez realizado el estudio de las máquinas eléctricas, tanto trifásicas como multifásicas, se desarrollará el modelo matemático que rige el comportamiento de una máquina de nueve fases de imanes permanentes. Este modelo permitirá, a partir de una serie de señales de entrada, obtener la respuesta que proporcionaría la máquina real. Este proceso resulta clave en el estudio y simulación de cualquier accionamiento eléctrico.

Una vez desarrollados el conjunto de ecuaciones matemáticas que modelan el comportamiento del accionamiento eléctrico objeto de estudio en el presente TFG, se implementará dicho modelo en un software de simulación. Debido a su versatilidad, así como a su capacidad de cálculo, el software empleado ha sido MATLAB/Simulink. En este entorno, se someterá al modelo matemático implementado a una serie de ensayos que permitan validar la bondad de este.

Junto con el resto de los objetivos principales, el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado añadirá de forma transversal otra serie de objetivos secundarios:

- Actualización del estado del arte de los sistemas multifásicos.
- Comprensión de los elementos que componen el conjunto del accionamiento de vehículos eléctricos.
- Comprensión de ciertas tipologías de control usadas en los accionamientos eléctricos.
- Mejora de las competencias de programación mediante el uso de software propio de la ingeniería.
- Interpretación crítica de los resultados obtenidos y redacción de una memoria técnica.

## CAPÍTULO 2 – VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

### 2.1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, los vehículos eléctricos (V.E) se han convertido en una dura competencia para los vehículos de combustión tradicionales. Tanto es así, que según registros recogidos por [4], en China, Estados Unidos, Europa y otras regiones, el número de matriculaciones de V.E en 2022 aumentó considerablemente en comparación con años anteriores (Figura 1). Este aumento viene condicionado por las duras restricciones que se están aplicando al sector de transporte debido al cambio climático. Además, los V.E están siendo cada vez más solicitados. No solo debido a su emisión nula, sino también a las mejoras evidentes en su rendimiento, eficacia, fiabilidad y costes de producción. Estos avances están convirtiendo a los vehículos eléctricos en una opción sumamente conveniente, cada vez más accesible para un número creciente de individuos.

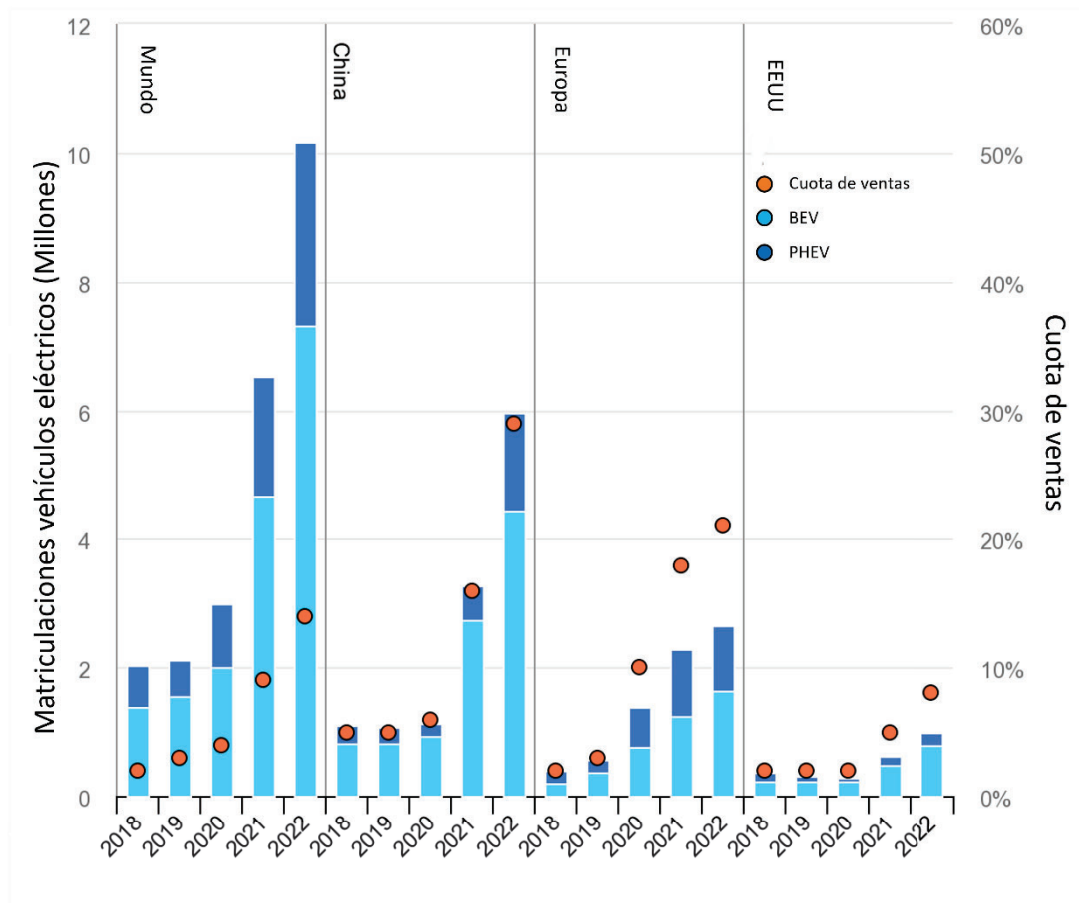


Figura 1. Matriculaciones de coches eléctricos y cuota de ventas en China, Estados Unidos y Europa 2018-2022. Fuente [4].

## 2.2. CONTEXTO HISTÓRICO

La novedad aparente de los vehículos eléctricos no refleja su historia en profundidad. Los primeros prototipos de vehículos eléctricos vinieron de la mano de la transición de los coches de caballo a los coches motorizados. A lo largo del siglo XIX se produjeron una serie de avances tecnológicos dentro del sector del transporte eléctrico. En 1834, Thomas Davenport diseñó y construyó un pequeño tren de juguete, el cual se impulsaba mediante un motor alimentado por baterías. Con este pequeño invento estableció un hito esencial en la cronología de la movilidad eléctrica, puesto que es uno de los primeros intentos documentados de explorar el potencial de la electricidad como fuente de movimiento. En 1859, el inventor Gastón Planté hizo una batería recargable de ácido-plomo, la cual se sigue usando hoy en día en aplicaciones de arranque de motores en vehículos convencionales.

Para finales del siglo XIX y principios del XX se habían logrado bastantes avances dentro de los vehículos eléctricos, lo cual permitió que se pudiesen comercializar. Su uso principal se encontraba como medio de transporte en entornos urbanos, puesto que la autonomía de la que disponían los V.E en esa época rondaban los 25-30 km. Los vehículos eléctricos eran atractivos dada su fácil conducción, menor ruido y por las bajas emisiones. Como se puede observar en la Figura 2, la tendencia de la producción de V.E se encontraba en aumento hasta principios del siglo XX.

Sin embargo, en 1885, Karl Benz inventó el primer automóvil propulsado por un motor de gasolina marcando el principio de la era de los vehículos movidos por un motor de combustión interna (MCI). Con la llegada de este tipo de vehículos, los V.E. vieron menguada su producción, como se puede observar en la Figura 2. Esto se debía a las dos grandes desventajas que presentaban con respecto a los vehículos de combustión interna, como eran su autonomía y su coste. Los vehículos con un MCI disponían de las siguientes ventajas:

- Una mayor autonomía (a principios del siglo XX el promedio se encontraba entre 80 y 160 km)
- Coste inferior de producción, debido a la ausencia de las baterías en este tipo de vehículo, hacía que su precio disminuyera considerablemente comparado con el de los vehículos eléctricos. Esto provocaba que los vehículos con MCI fuesen accesibles para un mayor número de personas.

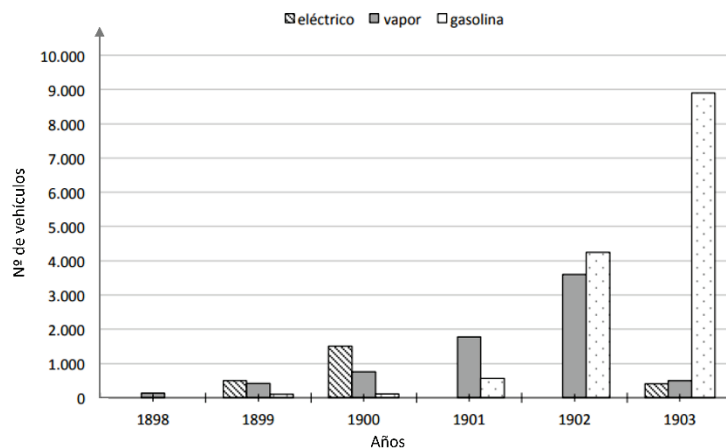


Figura 2. Producción de vehículos en Estados Unidos. Fuente [5]

El éxito que estaban teniendo los vehículos de combustión interna se acrecentó debido al sistema de producción en masa de Henry Ford. Este sistema de “producción en masa” permitió la fabricación de vehículos eficiente y a gran escala mediante la estandarización de procesos dentro de la línea de ensamblaje.

Con todos estos acontecimientos, la producción de vehículos eléctricos se vio eclipsada por la de vehículos de combustión interna. No es hasta la década de los 90 que los V.E. comenzaron a resurgir nuevamente en el mercado. Esta nueva inclusión se debía en gran parte a las preocupaciones con respecto al cambio climático y la búsqueda de nuevas formas de transporte sin emisiones. Gracias a los avances tecnológicos, tanto en baterías, motores como en la electrónica, hicieron posible que los vehículos eléctricos pudiesen competir con los vehículos de combustión interna.

Uno de los acontecimientos más importantes para los V.E. tuvo lugar con el nacimiento de la compañía Tesla, pionera en el sector de los V.E. En 2008 se lanzó el primer modelo de vehículo eléctrico de la compañía, el Tesla Roadster, el cual supuso un punto de inflexión para los vehículos eléctricos, dado que era el primero que se producía en masa y que utilizaba baterías de iones de litio de alto rendimiento. En la Figura 3 se puede observar el modelo de segunda generación del Tesla Roadster.



*Figura 3. Segunda generación del Tesla Roadster. Fuente [6]*

La demostración de que los vehículos eléctricos podían volver a competir con los vehículos de combustión interna revolucionó la industria del automóvil. Junto con la situación climática, y las duras restricciones que se han ido aplicando a este sector, las empresas de automóviles han ido apostando cada vez más por modelos eléctricos.

## 2.3. TIPOS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Para llevar a cabo una clasificación efectiva de los vehículos eléctricos, es viable abordar esta tarea desde diversas perspectivas. En este contexto, se ha optado por adoptar una perspectiva centrada en el tipo de alimentación y el nivel de electrificación de los vehículos. Esta elección se fundamenta en el deseo de destacar con énfasis el elemento central que impulsa estos vehículos: el motor eléctrico. De esta manera, se busca lograr una categorización que resalte el papel primordial de la propulsión eléctrica en el panorama de la movilidad moderna.

- **BEV – VEHÍCULO ELÉCTRICO DE BATERÍA**

Los BEV son aquellos vehículos cuya única fuente de energía primaria proviene de una batería. Gracias a uno o más motores eléctricos se obtiene la fuerza necesaria para la impulsión del vehículo. La energía se almacena en baterías recargables. Estas baterías se pueden recargar bien enchufando el vehículo a una estación de carga doméstica, o bien en alguna estación de carga pública. Algunos modelos también cuentan con una recarga mediante el sistema de frenado denominado “frenada regenerativa”. Gracias a este sistema la energía generada durante la frenada es totalmente aprovechable para la recarga de la batería. La autonomía de estos coches dependerá del tamaño y capacidad de la batería, llegando a tener autonomías entre los 200-300 km, o 400-500 km en modelos más avanzados. Son muchas empresas las que durante las últimas décadas han depositado sus inversiones en la mejora de este tipo de vehículos, por ejemplo, en la Figura 4 se puede observar el esquema del conjunto de propulsión de un vehículo de la marca Audi.



Figura 4. Vehículo eléctrico de batería (BEV). Fuente [7]

- **HEV – VEHÍCULO HÍBRIDO ELÉCTRICO NO ENCHUFABLE**

Este tipo de vehículos combinan la tecnología de los vehículos eléctricos con la de los vehículos tradicionales de combustión interna. De esta forma, se pueden aprovechar las ventajas de ambos tipos de motores.

Al combinar motores de combustión interna con los motores eléctricos, los HEV pueden tener varios modos de funcionamiento como por ejemplo el uso únicamente del motor eléctrico. Este modo de funcionamiento se usa para trayectos cortos y con velocidades bajas o medias. Cuando el automóvil demanda un mayor nivel de potencia, entra en acción el motor de combustión interna, el cual provee ese plus de energía necesaria para el funcionamiento del vehículo.

Las baterías que usan este tipo de vehículo, en comparación con las que se montan en los BEV proporcionan al vehículo una menor autonomía. Sin embargo, esta carencia de autonomía se ve compensada con el motor de combustión interna.

Los HEV son vehículos eléctricos y no enchufables. No disponen de ningún punto de carga en el vehículo. Para poder cargar la batería suelen aprovechar la energía excedente del motor de combustión, dado que bajo ciertas circunstancias éstos generan más energía de la necesaria. Para la recarga de las baterías, al igual que ocurre en los BEV, se utiliza la frenada regenerativa.

Esta combinación de motores hace que se reduzca el consumo de combustible y que la eficiencia del vehículo sea mayor, sin embargo, este tipo de vehículos aún generan emisiones, aunque éstas no alcanzan niveles tan altos como los vehículos tradicionales de combustión interna.

- **PHEV – VEHÍCULO HÍBRIDO ENCHUFABLE**

Estos coches, al igual que los HEV, combinan un motor de combustión interna con uno o más motores eléctricos. La principal diferencia con los anteriores es que éstos sí que disponen de un punto de carga en el vehículo, pudiendo realizarse mediante una toma de corriente externa.

Otra diferencia con los anteriores es la autonomía de la batería. Este tipo de vehículos montan baterías de tamaños y capacidades mayores que los HEV. Estos vehículos pueden funcionar únicamente con el motor eléctrico, y en el momento en el que se agota la batería, el motor de combustión interna se activa, proporcionando una energía adicional y aumentando la autonomía de coche. Uno de los modelos más extendidos hoy en día de esta tipología de V.E es el que se muestra en la Figura 5.



*Figura 5. Modelo Toyota Prius. Fuente [8]*

- **EREV – VEHÍCULO ELÉCTRICO DE AUTONOMÍA EXTENDIDA**

Este tipo de vehículos son muy parecidos a los HEV o PHEV, puesto que emplean un motor eléctrico y un MCI. La principal diferencia entre los híbridos es que éstos se propulsan únicamente con el motor eléctrico. El MCI se utiliza únicamente para recargar las baterías o bien funcionan como generador para los motores eléctricos. Los motores eléctricos que emplean este tipo de vehículos tienen un tamaño más pequeño que los MCI tradicionales, puesto que se utilizan cuando la demanda del coche es pequeña. Si el vehículo necesita mayor potencia, se utilizan las baterías para poder alcanzar la demanda solicitada. Gracias a los diferentes modos de funcionamiento, como se observa en la Figura 6, es posible afrontar los problemas de autonomía de los BEV.

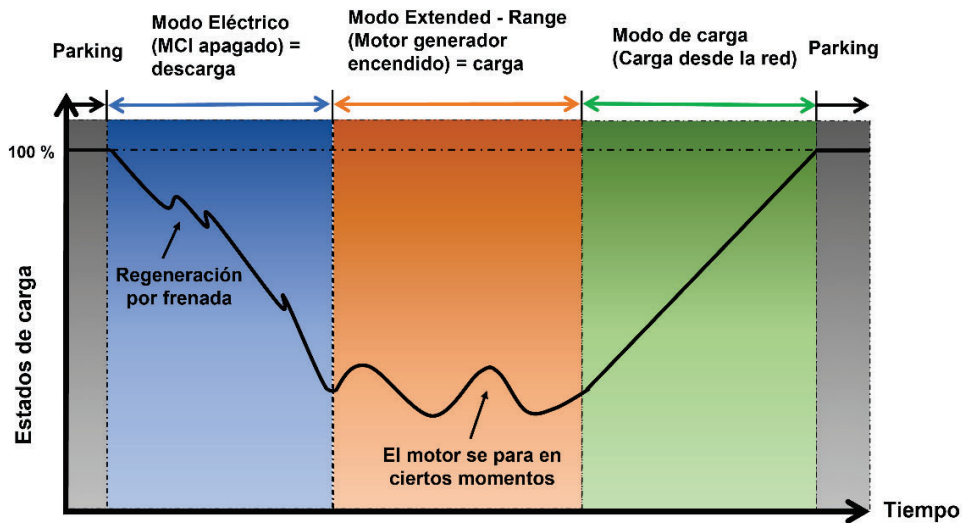
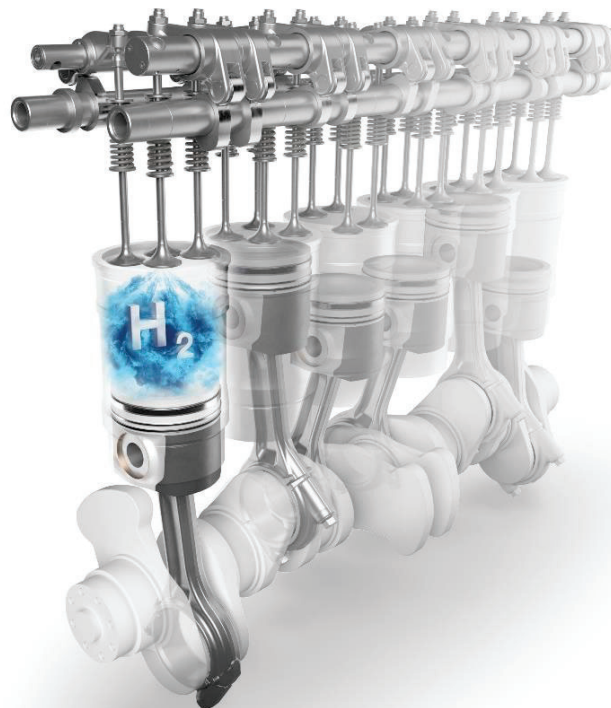


Figura 6. Modos de funcionamiento de un EREV. Fuente [9]

- **FCEV – VEHÍCULO ELÉCTRICO DE PILA DE HIDRÓGENO**

Otro tipo de vehículo eléctrico son los que funcionan con una pila de hidrógeno. El sistema de funcionamiento es muy parecido al de un BEV, pero en este caso, la forma de obtener energía eléctrica pasa por hacer reaccionar el hidrógeno almacenado en los depósitos del coche y el oxígeno que llega desde el exterior. De esta forma se obtiene la energía necesaria para cargar las baterías del vehículo. Este tipo de vehículos se elevan al rango de emisiones nulas debido a que la reacción que ocurre en el motor genera como emisiones únicamente vapor de agua. A pesar de la reducción de emisiones existen ciertos inconvenientes, como el precio de este tipo de combustible, o la falta de puntos de repostajes, puesto que es una tecnología que se ha puesto en funcionamiento desde hace relativamente poco tiempo.

A pesar de las desventajas que presentan ahora mismo este tipo de motores, ya existen empresas de renombre que apuestan por este tipo de tecnologías, como por ejemplo MAHLE, proveedor internacional dedicado al desarrollo y fabricación de tecnologías dentro del sector del automóvil. En recientes publicaciones [10], en las que se pueden ver esquemas de estos tipos de motores (Figura 7), han dejado claro que están preparados para este tipo de motores.



*Figura 7. Motor con combustión de hidrógeno. Fuente [10]*

## 2.4. PARTES DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO

Hasta el momento, se han establecido diversas tipologías de vehículos eléctricos, desde aquellos que emplean exclusivamente motores eléctricos (BEV) hasta los que integran motores eléctricos con motores de combustión interna (HEV o PHEV). Sin embargo, independientemente del tipo de vehículo eléctrico considerado, existen elementos comunes que los definen.

Entre estos elementos compartidos, dos destacan como fundamentales: la batería y el accionamiento eléctricos. Este último merece una atención especial, ya que se compone de tres componentes principales: el inversor, la máquina eléctrica y el sistema de control. Estos elementos esenciales conforman la base de la tecnología que permite el funcionamiento de los vehículos eléctricos, independientemente de su configuración específica.

- **Batería eléctrica**

La batería eléctrica es un sistema de almacenamiento de energía. Este elemento es fundamental dentro del funcionamiento de un vehículo eléctrico, puesto que la autonomía de éste depende directamente de la batería que monte el coche. La batería es la que va a proporcionar la energía eléctrica que esté solicitando el motor eléctrico. Existen diferentes tipos de baterías dependiendo del uso que se le dé dentro del vehículo. Ya se ha visto que según el tipo de vehículo eléctrico las baterías tienen distintos objetivos.

Para poder cumplir con los requisitos que se marcan, las baterías se seleccionan teniendo en cuenta una serie de características. Las principales propiedades que hay que tener en cuenta en las baterías son las siguientes:

- Densidad energética
- Peso
- Capacidad y potencia
- Consumo y eficiencia
- Autonomía
- Tiempo de carga
- Precio

Además de estos parámetros, las baterías pueden ser de diferentes tipos:

- Plomo – ácido
- Níquel – cadmio
- Níquel – hidruro metálico
- Ion – litio
- Polímero de litio

Teniendo en cuenta todas estas características, y dependiendo del tipo de vehículo eléctrico y del tipo de trabajo al que va a estar sometida la batería, se escogerá un tipo u otro de batería.

- **Sistema de carga**

Existen diferentes tipos de sistemas de carga de vehículos eléctricos. Se pueden encontrar sistemas de carga en los que se necesita algún tipo de cargador, ya sea mediante una estación de carga pública, también llamadas electrolinerías, o bien mediante carga nominal o doméstica. La principal diferencia entre estos dos tipos de cargas se encuentra en su velocidad, puesto que las electrolinerías están preparadas para poder tener una alta velocidad de carga, tanto por el cargador usado, como por el sistema de la estación de carga. La carga doméstica dependerá del tipo de conexión que se tenga a la red, y de la potencia contratada. En nuevas construcciones ya se están adecuando puntos de recarga de VE para que el proceso de carga se vea optimizado, sin embargo, en edificaciones antiguas o bien se invierte en un punto de carga, o se puede enchufar el cargador a tomas de corriente estándar, lo que conlleva a tiempos de carga mucho más lentos.

Si se habla de vehículos híbridos, pueden ser tanto enchufables como no enchufables. Los enchufables poseen un sistema de carga similar al de los vehículos eléctricos puros. También pueden disponer de sistemas de carga internos, aprovechando ciertas situaciones durante el uso del vehículo, como por ejemplo se aprovecha la energía generada durante la frenada. Los híbridos no enchufables basan su sistema de carga únicamente en este tipo de sistema. Debido a que las dimensiones y capacidades de las baterías que se montan en estos vehículos son más reducidas, no necesitan tener grandes velocidades de carga. Además, al disponer de un segundo motor ICE (Internal Combustion Engine), no afecta tanto a la autonomía del coche la descarga de las baterías, como sí que afecta en coches eléctricos puros.

- **Sistema de control**

El sistema de control asume la responsabilidad de ajustarse a las necesidades tanto del usuario como del estado presente de la máquina, ejecutando la generación precisa de señales que son transmitidas al inversor. Esta etapa es fundamental para cumplir con los requisitos específicos del sistema de propulsión eléctrica, respondiendo con precisión a las distintas situaciones de operación.

El proceso de control forma parte de la operatividad eficiente del vehículo eléctrico. Evalúa continuamente las condiciones de conducción y el rendimiento del motor, adaptando las señales del inversor en tiempo real. Por lo tanto, cuando se exige una mayor potencia para situaciones de aceleración o ascenso, el sistema de control coordina la respuesta del inversor para proporcionar la energía necesaria (Figura 8). Este enfoque adaptable y proactivo del sistema de control garantiza no solo una óptima eficiencia en la conversión y distribución de energía, sino también una experiencia de conducción suave y precisa. El sistema monitorea constantemente los datos del vehículo y las preferencias del conductor para ajustar de manera inteligente el flujo de energía del motor eléctrico, asegurando un equilibrio entre rendimiento y eficiencia en todo momento.



Figura 8. Esquema sistema de control

- **Convertidor**

La naturaleza de la energía eléctrica almacenada en la batería de los vehículos es completamente diferente a la que demanda la máquina eléctrica del mismo. Por ello, es necesario el empleo de un sistema que sea capaz de realizar esta adaptación de energía eléctrica. Este elemento es el convertidor electrónico de potencia. Este elemento conforma el actuador del accionamiento eléctrico. Este actuador, dependiendo de la situación en la que se encuentre el flujo de potencia podrá trabajar bien como inversor, o bien como rectificador.

En el momento que la máquina solicita la energía necesaria para poder operar, el convertidor trabajará como inversor. Su principal función será la de transformar la corriente continua (CC) en una corriente alterna (CA).

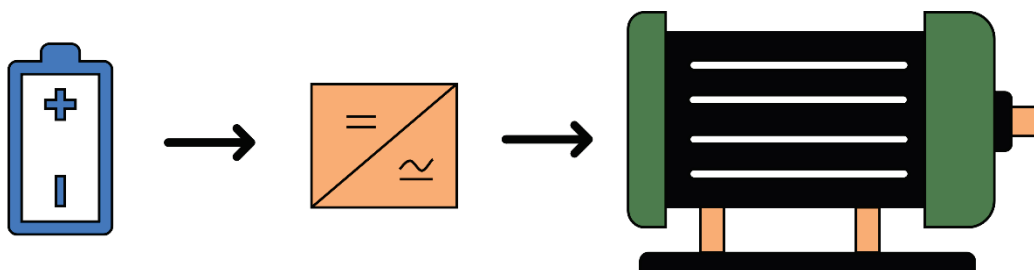


Figura 9. Esquema flujo energía batería - motor

En la Figura 9 se puede ver cómo la energía almacenada en la batería, la cual se encuentra en forma de CC, es transformada mediante el uso del inversor a CA, alimentando así a la máquina, la cual trabaja con CA. Además, el inversor es capaz de obtener una salida de frecuencia variable, de forma que se pueda variar la velocidad del motor eléctrico.

Si el vehículo entra en una situación de frenada el flujo de energía cambia de dirección (Figura 10). Aprovechando la energía cinética del mismo pasa de trabajar en modo motor a modo generador, y en este caso el convertidor pasa a funcionar como rectificador, es decir, ahora la transformación de la corriente se produce de CA a CC.

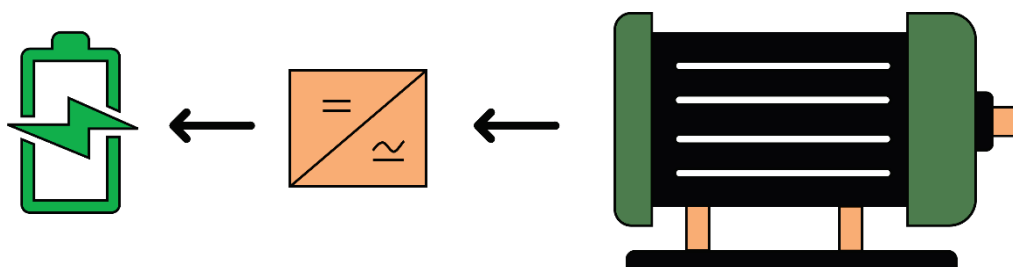


Figura 10. Esquema flujo energía motor - batería

Es por esta doble función del convertidor que es uno de los elementos más importantes dentro del accionamiento eléctrico, y por consiguiente, vital para el funcionamiento del vehículo eléctrico.

- **Máquina eléctrica**

Como último elemento en esta lista se encuentra la máquina eléctrica. Esta parte es el alma del vehículo. Gracias a la máquina eléctrica se puede conseguir la propulsión necesaria para que el coche se mueva. Este sistema permite transformar la energía eléctrica en energía mecánica de movimiento, de forma que el vehículo pueda moverse de forma eficiente y sostenible. Existen dos grandes tipos de máquinas eléctricas: asíncronas y síncronas.

La gran diferencia entre las máquinas asíncronas y las síncronas radica en cómo se relacionan la velocidad de giro del campo magnético del estátor y la velocidad del rotor de la máquina. Si estas dos velocidades están directamente relacionadas, estamos en presencia de una máquina síncrona. Y dentro de este grupo, encontramos las que funcionan con imanes permanentes y las que tienen un rotor bobinado.

Por otro lado, las máquinas asíncronas son aquellas donde no hay esa coincidencia entre la velocidad del campo magnético y la velocidad mecánica del rotor. Es decir, el campo magnético que se crea de manera fija no sigue el mismo ritmo que el rotor en movimiento. Esta falta de sincronización es lo que les da el nombre de máquinas asíncronas. Dentro de esta categoría, las más comunes son las máquinas con rotor de jaula de ardilla, que curiosamente siempre inducen corriente rotórica.

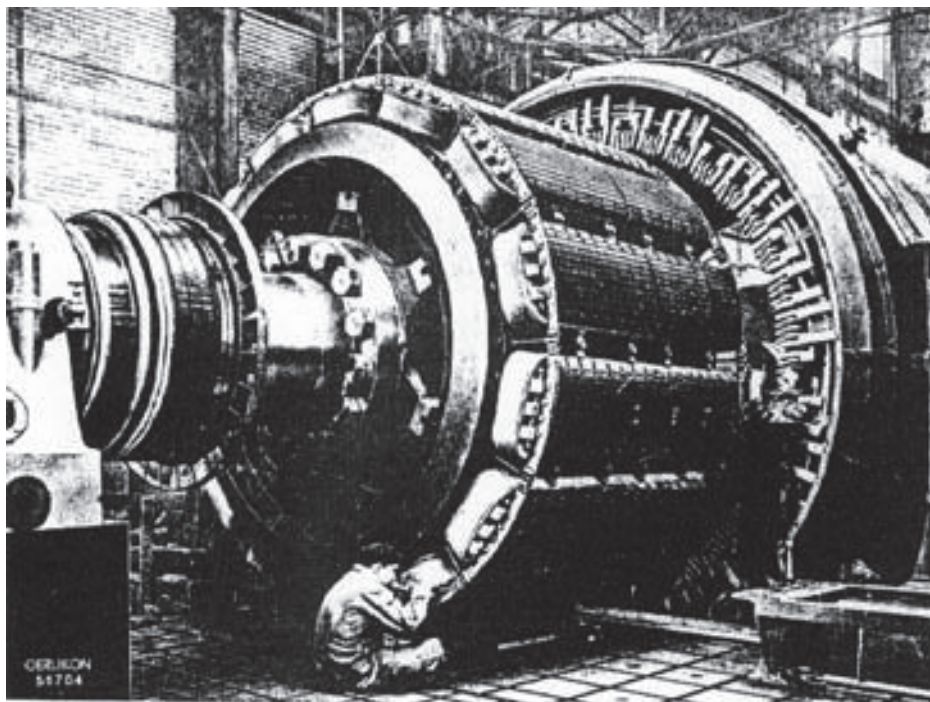
En definitiva, estas diferencias en las velocidades y la sincronización entre los componentes hacen que las máquinas síncronas y las asíncronas tengan comportamientos distintos y aplicaciones particulares en el campo de la ingeniería eléctrica. Tanto un tipo como otro tienen sus ventajas e inconvenientes dentro de los vehículos eléctricos. La elección de una u otra residirá en las necesidades particulares del vehículo o las preferencias de los fabricantes, en cuanto al coste, rendimiento y eficiencia.

## CAPÍTULO 3 - MÁQUINAS ELÉCTRICAS

---

### 3.1. INTRODUCCIÓN

Las máquinas eléctricas son dispositivos capaces de transformar la energía mecánica en eléctrica y viceversa, siendo posible esta transformación gracias al principio de reversibilidad electromagnética que poseen. Hoy en día este tipo de máquinas se utilizan en múltiples aplicaciones gracias a su versatilidad y capacidad de adaptación a cualquier tipo de ámbito, como se puede observar en la Figura 11, se pueden fabricar máquinas eléctricas de gran tamaño.



*Figura 11. Rueda polar de un alternador trifásico. Fuente [11]*

A lo largo de los años, estas máquinas se han ido perfeccionando, alcanzando una serie de objetivos dentro de la industria, el transporte y generación de energía entre otros. Tal y como se ha indicado en capítulos anteriores, la situación medioambiental actual ha propiciado que se investigue aún más este tipo de tecnología, sobre todo en el sector de generación de energía y de transporte.

## 3.2. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

Todas las máquinas siguen el mismo esquema, el cual se puede ver en la Figura 12. Los tres elementos principales son el rotor, estátor y los devanados, los cuales son el alma de la máquina eléctrica. También aparecen elementos mecánicos, como el eje o los cojinetes, y, por último, elementos estructurales como la carcasa y la tapa de la máquina.

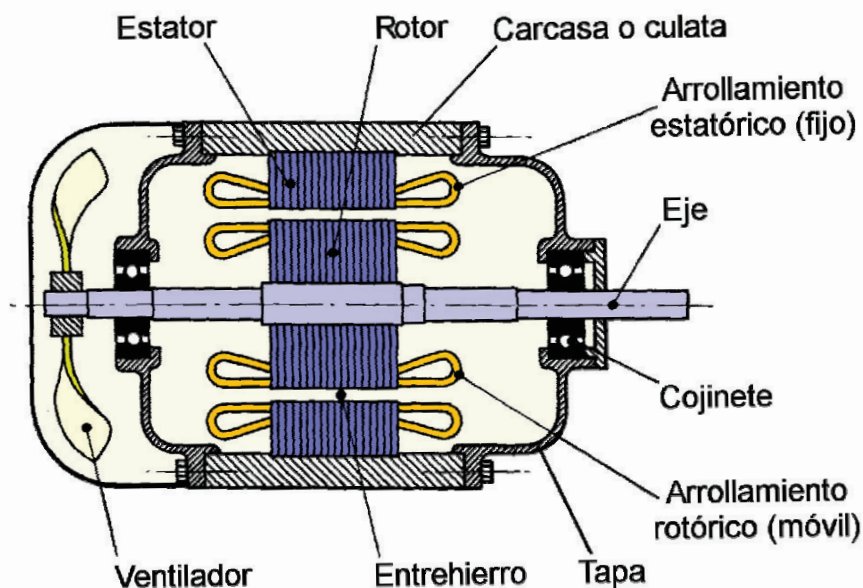


Figura 12. Esquema de elementos principales de las máquinas eléctricas rotativas. Fuente [12]

- **ESTATOR**

En el conjunto fundamental, el estátor se presenta como el componente estático y anclado. El propósito de éste, además de proporcionar estabilidad a la máquina, es albergar los devanados eléctricos, los cuales interaccionarán con el rotor para poder crear el movimiento de la máquina. El estátor, por lo general, tiene forma cilíndrica hueca. Su construcción se basa en el proceso de laminado con el cual facilita la alineación precisa de las láminas que lo conforman, lo que mejora la eficiencia del motor al reducir las pérdidas de Foucault (Figura 13). El hueco que queda en su interior se utilizará para colocar el rotor. Además del hueco central, a lo largo del perfil se disponen una serie de ranuras en las que se colocarán los devanados eléctricos.

El estátor puede ser de dos tipos, de polos lisos, o de polos salientes. La elección de una disposición u otra dependerá de las necesidades específicas de la aplicación a la que esté destinada la máquina.

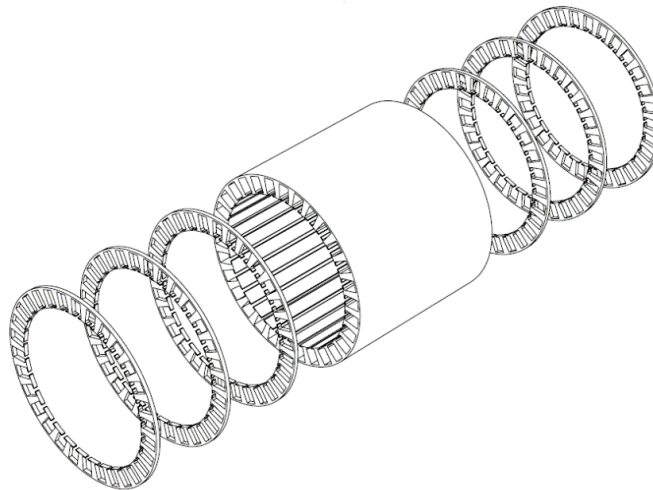


Figura 13. Explosionado estátor de polos lisos de una máquina eléctrica

- **ROTOR**

El rotor es otro de los elementos principales de la máquina eléctrica. Esta es la parte móvil de la máquina. Al igual que el estator, el rotor tiene forma cilíndrica, pero en este caso no tiene ningún hueco, y su diámetro debe ser inferior al del interior al del estator, de forma que quede un pequeño hueco entre ambos. Para construir el rotor también se realiza un proceso de laminado, de forma que se reduzcan las pérdidas de Foucault (Figura 14). El objetivo del rotor es albergar otro campo magnético que concatene con el campo del estátor.

El rotor también puede ser de polos salientes, o de polos lisos, y al igual que en el estátor, la elección de estas disposiciones dependerá del tipo de trabajo al que se enfrente la máquina.

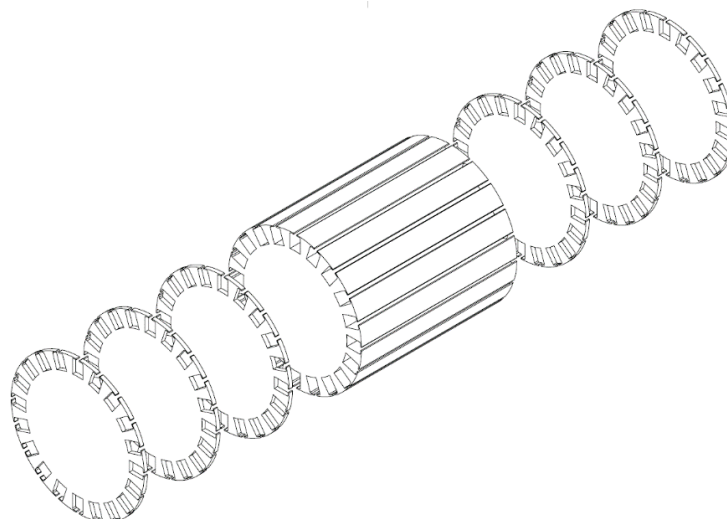


Figura 14. Explosionado rotor de polos lisos de una máquina eléctrica

- **ENTREHIERRO**

Se denomina entrehierro al espacio de aire existente entre el rotor y el estátor de la máquina. Este espacio provoca que el flujo magnético se vea interrumpido, de forma que se crea una reluctancia en el circuito. La forma que tengan tanto el rotor como el estátor hará que la reluctancia varíe, puesto que, si existe un espacio mayor entre el rotor y el estátor, la reluctancia será más grande. Por lo tanto, si el rotor o el estátor es de polos salientes, esto provocará que la reluctancia sea variable a lo largo del entrehierro. Si las dos partes son de polos salientes, la reluctancia será distribuida.

- **DEVANADOS**

Los devanados en una máquina eléctrica son un conjunto de conductores, generalmente de cobre, los cuales se disponen en forma de bobina. Para su colocación, tanto en el rotor como en el estátor se disponen una serie de ranuras en las que se enrollarán estos conductores. Dentro de la máquina, según la influencia del campo magnético, existen dos tipos de devanados: el inductor y el inducido. El devanado inductor será el encargado de crear el campo magnético. El devanado inducido, será aquél que concatene con el otro campo magnético.

Las interacciones del campo magnético entre el devanado inducido e inductor son esenciales para el funcionamiento de la máquina, puesto que el campo magnético que se crea, junto con la reacción que tiene el devanado inducido, provocarán la fuerza necesaria para generar el movimiento de la máquina.

Dependiendo del tipo de máquina, el devanado inductor puede encontrarse o en el rotor o en el estátor:

Superficies cilíndricas con entrehierro uniforme	{	- Máquinas síncronas de gran velocidad – Inductor en el rotor
		- Máquinas asíncronas – Inductor en el estátor
Con entrehierro no uniforme	{	- Máquinas síncronas de baja velocidad – Inductor en el rotor
		- Máquinas de corriente continua – Inductor en el estátor

### 3.3. CLASIFICACIÓN

Uno de los puntos importantes cuando se habla de las máquinas eléctricas es su clasificación. Dada la versatilidad de éstas, y su capacidad de poder adaptar sus elementos a las diferentes aplicaciones a las que estén destinadas, existen una gran variedad de estas máquinas, y, por ende, se pueden escoger diferentes caminos a la hora de establecer una clasificación de estas, desde el tipo de rotor o estator, hasta el tipo de devanado que presentan. Como el presente trabajo está enfocado al uso de las máquinas eléctricas en el sector del transporte se ha visto conveniente seguir una clasificación según el funcionamiento síncrono o asíncrono de las máquinas.

- **ASÍNCRONAS**

Las máquinas asíncronas son un tipo de máquina eléctrica en las que su principal característica distintiva se encuentra en las velocidades del rotor y del campo magnético generado. Como se ha explicado en puntos anteriores, las máquinas eléctricas basan su funcionamiento según el Teorema de Ferraris, cuyo desarrollo se puede ver en [13].

La Ley de Lenz establece que cualquier cambio en el flujo magnético que atraviesa las bobinas de la máquina, inducirá una corriente eléctrica en esas bobinas de forma que el campo magnético que se produce por esta corriente se opondrá al campo magnético original. En el caso de las máquinas asíncronas, al aplicar la tensión en el estator, se genera el campo magnético rotatorio, siguiendo el Teorema de Ferraris. Este campo magnético interactúa con el rotor, haciendo que circule una corriente, generando un campo magnético que se opone al campo del estator. La interacción entre los dos campos magnéticos provoca el par motor necesario para hacer girar el motor.

El título de asíncronas se lo asigna la diferencia que existe entre la velocidad de giro del rotor y la velocidad de giro del campo magnético del estator, puesto que la del rotor es ligeramente inferior a la del campo giratorio en modo motor. La diferencia entre estas velocidades se denomina deslizamiento.

Existen dos tipos principales de máquinas asíncronas:

- Asíncronas de rotor en jaula de ardilla (Figura 15b).
- Asíncronas de rotor bobinado (Figura 15a).

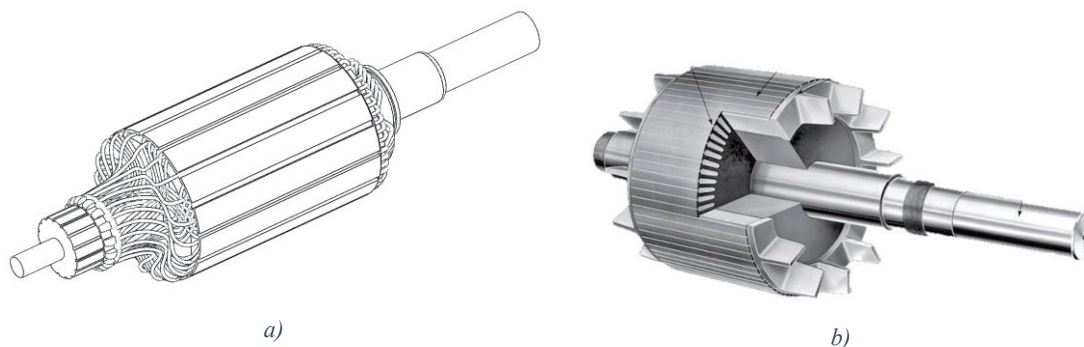


Figura 15. Tipos de rotor en máquinas síncronas. a) Rotor bobinado y b) Rotor jaula de ardilla. Fuente [14]

Este tipo de máquinas eléctricas presentan una serie de ventajas como:

- Robustez y bajo mantenimiento.
- Fabricación más económica.
- Arranques más suaves y graduales.
- Sirven para diversas aplicaciones gracias a su adaptabilidad.

## • SÍNCRONAS

Las máquinas síncronas presentan el mismo principio de funcionamiento que las máquinas asíncronas, con la diferencia de que, en este caso, la velocidad eléctrica del rotor sí coincide con la velocidad de sincronismo, es decir, con la velocidad del campo magnético giratorio.

El principio de funcionamiento es el mismo independientemente de que la máquina trabaje de modo motor o en modo generador. Si la máquina trabaja en modo motor, el devanado del estátor se alimenta a partir de un sistema trifásico de tensiones, creando un campo magnético giratorio. En el caso del rotor, si no es de imanes permanentes se encontrará alimentado por una corriente continua a partir de la cual se crea un campo magnético fijo. En el caso de que el rotor esté conformado por imanes permanentes no será necesario alimentarlo, puesto que son los imanes los encargados de generar el campo magnético. Entre estos dos campos se produce una interacción que crea un par haciendo que la máquina gire.

En el caso de que trabaje en modo generador, el devanado del estátor se conecta a la red que se quiere alimentar. El rotor en este caso se hace girar de forma externa, creando así el campo giratorio necesario para crear la FEM en el estátor, y por lo tanto, hacer que circule corriente por la carga, llegando a transformar de esta forma la energía mecánica externa, en energía eléctrica.

Un tipo de máquina síncrona muy empleada en los vehículos eléctricos son las de rotor de imanes permanentes. La ventaja de tener imanes permanentes reside en que la alimentación del rotor y el cableado de éste desaparecen, teniendo así un menor calentamiento y menores pérdidas, consiguiendo una mayor eficiencia. Esto también contribuye a que el tamaño de la máquina sea menor, al igual que su mantenimiento, puesto que se prescinde de todo el devanado rotórico. Además, una máquina síncrona de imanes permanentes tiene una mayor densidad de potencia. Al tener un campo magnético más estable y con mayor potencia, junto con la eficiencia de este, se puede conseguir tener una mayor potencia con un volumen mucho más pequeño. Este tipo de máquina tiene varias configuraciones del rotor dependiendo de la disposición de los imanes (Figura 16).

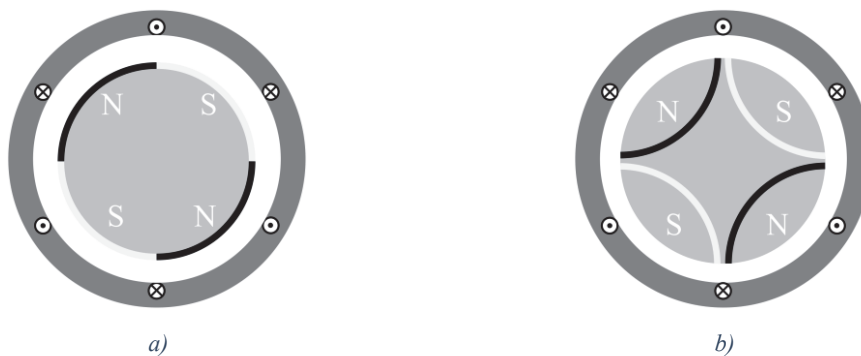


Figura 16. Tipos de disposición de los imanes en el rotor. a) En la superficie y b) Insertados. Fuente [15]

### 3.4. MÁQUINAS MULTIFÁSICAS

Las máquinas multifásicas son un tipo de máquina eléctrica que se caracterizan por tener un número de fases superior a tres. Desde que se planteó el uso de las máquinas eléctricas a mediados del siglo XX, las máquinas trifásicas han sido una mejor opción que las multifásicas. Esto se debía principalmente a las dificultades que se encontraban a la hora de usar las multifásicas, puesto que el desarrollo tecnológico de los microprocesadores y la electrónica de potencia era insuficiente para poder obtener una eficacia rentable y competir contra las máquinas trifásicas. Además, el uso generalizado de redes trifásicas para la distribución de energía eléctrica también contribuyó a la preferencia de las trifásicas sobre las multifásicas.

Esta falta de desarrollo tecnológico, y las máquinas trifásicas como mejor opción aplacó la falta de entusiasmo por parte del sector de la industria y la ciencia para apostar por máquinas con más de tres fases. No sería hasta la década de los ochenta, cuando el interés por este tipo de máquinas volvería a resurgir.

Durante los últimos años se han aumentado de manera considerable el número de investigaciones dentro del ámbito de las máquinas eléctricas. Los avances de la electrónica de potencia han propiciado que en diversas aplicaciones las máquinas multifásicas consigan mejores prestaciones que las máquinas trifásicas tradicionales. Es un sector que se encuentra en pleno crecimiento y que, seguramente, de aquí a pocos años se utilicen aún más las máquinas multifásicas en una amplia gama de aplicaciones.

Uno de los aspectos en los que se debe tener especial atención en las máquinas multifásicas es las diferentes posibilidades de distribuir las fases, y las posibles combinaciones de devanados. Por lo general, en las máquinas un número múltiplo de tres, las fases se agrupan en múltiples devanados trifásicos. Estas máquinas tienen la ventaja de poder mantener los beneficios de los sistemas multifásicos aplicando las técnicas de control ya existentes de los sistemas trifásicos. En el caso del desplazamiento entre las fases de este tipo de máquinas se pueden encontrar tres configuraciones: simétrica, asimétrica o coincidentes, como se puede observar en la Figura 17. Además, el diseño de estas configuraciones tienen la posibilidad de diseñarse utilizando “a” bobinados de fase separados por “k” neutros.

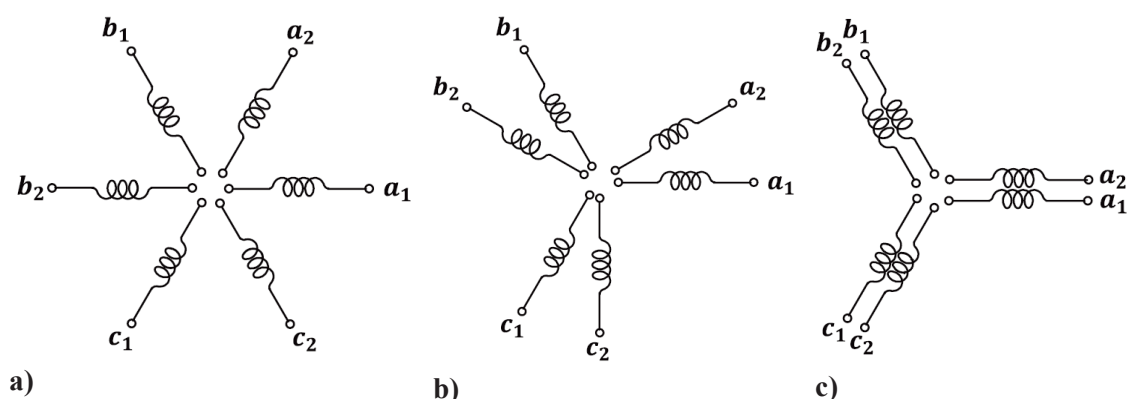


Figura 17. Diferentes configuraciones de desplazamiento de fases: a) Simétrica, b) Asimétrica, c) Coincidentes.

Fuente [16]

Otro tipo de máquinas multifásicas son aquellas que tienen un número que no es múltiplo de tres, como las máquinas de cinco o de siete fases. En este caso no se podrían utilizar las técnicas de control de los sistemas trifásicos tan fácilmente como en las anteriores, si no que se deberían adaptar a la máquina, o bien se crea una específica. Es por ello por lo que las máquinas más utilizadas son aquellas con múltiples bobinados trifásicos.

- **REDUCCIÓN DE LAS CORRIENTES DE FASE**

En una máquina trifásica convencional, la corriente debía de distribuirse entre tres fases, sin embargo, en máquinas multifásicas para una potencia dada, dicha corriente es menor al distribuirse por mayor número de fases. Esto conlleva a una reducción en las pérdidas por efecto Joule, dado que los conductores no se ven expuestos a temperaturas tan altas al estar la corriente más dividida.

- **MEJOR DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA**

Al tener un mayor número de fases, la potencia, al igual que las corrientes de fase, se distribuye en un número de fases mayor. Esto tiene como ventaja tener una mejor distribución de la potencia, consiguiendo una mejor utilización del espacio y los materiales dentro de la máquina.

Esta mejor distribución conlleva a tener un flujo magnético mucho más uniforme y suave, disminuyendo notablemente las pérdidas y el calentamiento de la máquina.

- **MAYOR NÚMERO DE GRADOS DE LIBERTAD**

Las máquinas multifásicas se distinguen por su inherente capacidad de ofrecer una mayor tolerancia frente a fallos. Cuando una máquina experimenta una falla, esta podría originarse debido a conexiones defectuosas en sus bornes, lo que resultaría en algún tipo de inconveniente en una de sus fases. En situaciones convencionales, como las máquinas trifásicas, tal escenario podría provocar interrupciones considerables. Sin embargo, en las máquinas multifásicas, se revela una virtud clave: el aumento en los grados de libertad de la máquina. Esta característica fundamental permite que la máquina continúe operando incluso en presencia de la falla, gracias al mayor número de fases. Esta capacidad intrínseca no requiere la incorporación de componentes adicionales y se traduce en una distribución más eficiente de la potencia por fase, una reducción en las variaciones en el par de torsión y una mayor eficacia en la utilización de la tensión de entrada de la máquina. Sumado a esto, con la implementación de un modelo de control sólido, es viable lograr una transición fluida desde el instante previo a la ocurrencia de la falla hasta la operación posterior a la misma.

## CAPÍTULO 4 – MODELO MÁQUINA SÍNCRONA DE IMANES PERMANENTES

---

### 4.1. INTRODUCCIÓN

En general, como se ha podido ver en capítulos anteriores, el funcionamiento de todas las máquinas eléctricas se basa en el mismo principio. La generación de un campo magnético giratorio. A partir de este campo se producirán reacciones entre el rotor y el estator, generando una fuerza magnetomotriz capaz de crear un par que haga que la máquina se mueva. Para poder estudiar de forma detallada el funcionamiento de las máquinas eléctricas es posible desarrollar un modelo matemático con el que caracterizar el comportamiento de ésta.

El modelo de la máquina estará compuesto por un conjunto de ecuaciones diferenciales. La precisión que el modelo es capaz de proporcionar dependerá de forma directa de la complejidad que este mismo presente, siendo necesario un equilibrio entre exactitud del modelo y el coste computacional asociado al mismo.

El modelo matemático de la máquina puede expresarse en variables de fase, no obstante, existen en la literatura diversas transformaciones y cambios de sistema de referencia que simplifican las ecuaciones diferenciales y permiten dotar a sus variables de un significado físico más claro. Entre las diferentes transformaciones existentes destaca la “*Vector Space Decomposition*” (VSD). Aplicando la técnica del VSD es posible presentar el modelo de la máquina en uno o más subespacios, los cuales serán ortonormales entre sí, de forma que las operaciones de control se realicen mucho más simple que sobre el modelo original de la máquina.

## 4.2. MODELO DE FASES

Para poder describir el comportamiento de una máquina eléctrica se usa un sistema de referencia de fases, en el que sus componentes se encuentran desfasadas  $120^\circ$ . Este sistema es útil a la hora de realizar una serie de cálculos y análisis, sin embargo, a la hora de establecer algoritmos de control, este sistema de referencia hace que las ecuaciones diferenciales sean demasiado complejas como para poder trabajar con ellas cómodamente. Es por ello por lo que para poder establecer el modelo matemático de la máquina se va a usar la técnica VSD mencionada en 4.1.

El presente TFG aborda el planteamiento del modelo de una máquina de imanes permanentes de nueve fases, sin embargo, para poder tener una mejor visualización y comprensión de la técnica VSD, el estudio se va a centrar en una máquina eléctrica trifásica de forma general, adaptando posteriormente la técnica a la máquina del presente TFG.

Por ello, para comenzar con el desarrollo, se usará un vector general  $\vec{x}$ , el cual puede representar cualquier parámetro de la máquina, ya sean corrientes, tensiones o flujos magnéticos. Dicho vector se encontrará girando respecto al sistema de referencia abc, a una velocidad arbitraria  $\omega$ .

El modelo de fases será el primer paso del desarrollo. Este modelo usa un sistema de referencia abc. El vector objeto de estudio puede descomponerse en cada uno de los tres ejes abc como se observa en la Figura 18.

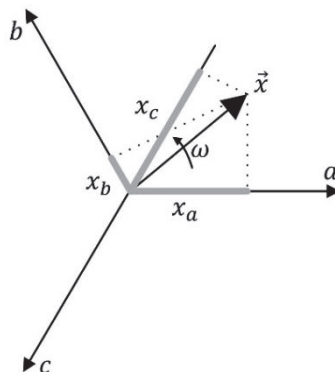


Figura 18. Sistema de referencia por fase. Fuente [15]

En la Figura 19 se muestra el comportamiento del vector en este sistema de referencia:

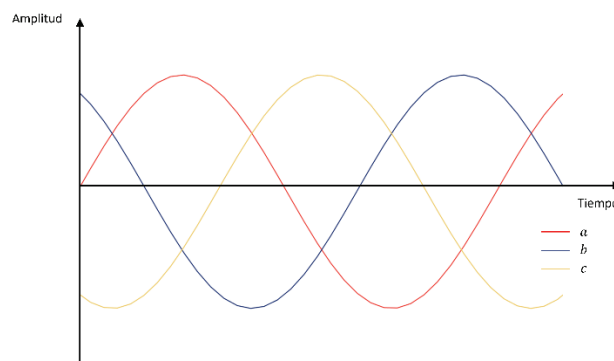


Figura 19. Comportamiento señal en sistema de referencia de fases

Para simplificar el sistema de referencia anterior, es posible definir el vector  $\vec{x}$  en un nuevo sistema de referencia estacionario que sea ortonormal. Esta transformación supone una primera variante de VSD.

### 4.3. MODELO EN $\alpha - \beta$ . TRANSFORMADA DE CLARKE

La técnica del VSD plantea un modelo de la máquina mucho más sencillo, compacto y con un mayor significado físico. Uno de los objetivos de esta técnica es pasar de un sistema de referencia de fases a otro sistema de referencia estático  $\alpha\beta$ . Esta transformación traerá consigo una disminución en el número de ecuaciones en el sistema.

Este nuevo sistema  $\alpha\beta$  será estático y ortonormal. De esta forma es posible descomponer el vector  $\vec{x}$  en sus componentes en el eje  $\alpha$  y  $\beta$  (Figura 20).

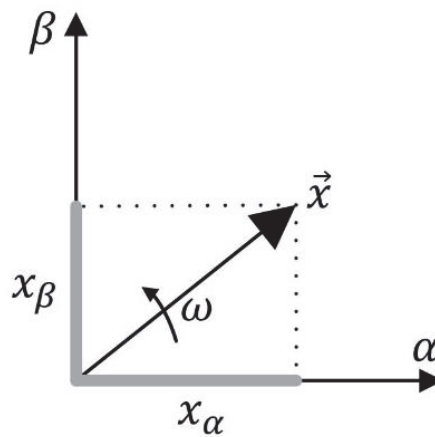


Figura 20. Sistema de coordenadas  $\alpha$ - $\beta$ . Fuente [15]

El vector inicial  $\vec{x}$  sigue girando a la velocidad  $\omega$ , pero en este caso, el vector tiene sólo dos componentes, una correspondiente al eje  $\alpha$  y otro al eje  $\beta$ .

$$\vec{x} = [x_\alpha, x_\beta]$$

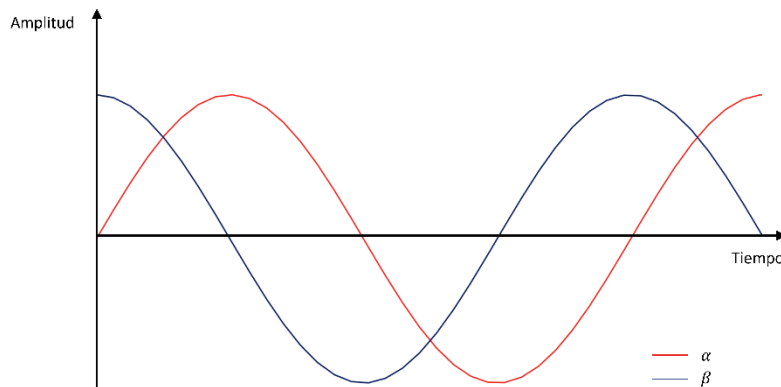


Figura 21. Comportamiento señal en sistema de referencia  $\alpha$ - $\beta$

Este cambio del marco de referencia se realiza aplicando la matriz de transformación de Clarke, de forma que teniendo como entrada el parámetro específico de la máquina trifásica, se obtiene en la salida su equivalente en las coordenadas  $\alpha$ - $\beta$ . El comportamiento del vector  $\vec{x}$  en este marco de referencia se puede observar en la Figura 21.

La matriz de Clarke se define en términos de parámetros geométricos de la máquina, siguiendo el siguiente modelo:

$$[C] = k \cdot \begin{bmatrix} \cos(0) & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ \text{sen}(0) & \text{sen}\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

Los ángulos que se aprecian en la matriz (4.1) corresponden con los ángulos de los devanados desfasados  $120^\circ$ . El parámetro  $k$  dependerá del modo de trabajo que se seguirá para realizar el control. Dependiendo de qué parámetro se quiera dejar invariante,  $k$  tomará el valor  $2/3$  cuando se quieran dejar invariantes las corrientes, tensiones y los flujos magnéticos de la máquina, o bien, si lo que se desea mantener invariante es la potencia del sistema, tomará el valor de  $\sqrt{2/3}$ .

Hay que remarcar que en la transformación de Clarke existe una tercera componente homopolar o de secuencia cero, sin embargo, si la máquina tiene el neutro aislado, esta componente se puede omitir.

En el caso de las máquinas multifásicas, como la que es objeto de estudio en este trabajo, la matriz de Clarke añade más información. Cuando se tienen más de tres fases, y se aplica la descomposición VSD, además de aparecer el subespacio  $\alpha$ - $\beta$ , se generan nuevos subespacios ortonormales y desacoplados del anterior. Dependiendo del número de fases que tenga la máquina, aparecerán uno o más subespacios adicionales. En el caso de que la máquina presente una configuración de devanados distribuidos, estos nuevos subespacios se corresponderán con las pérdidas de la máquina, mientras que el subespacio principal, en este caso  $\alpha$ - $\beta$ , se corresponderá con la creación de flujo y par de la máquina.

Este hecho demuestra los beneficios que presenta la descomposición VSD en este tipo de estudios, dado que la dificultad de establecer operaciones de control disminuye al existir la posibilidad de separar la generación de flujo y par de las pérdidas de la máquina.

La matriz (4.1) es válida para una máquina de tres fases. En el caso de una máquina de nueve fases como la del presente trabajo, será necesario modificarla para que sea válida.

$$[C_{9ph}] = k \cdot \begin{pmatrix} 1 & \cos(6\cdot\gamma) & \cos(12\cdot\gamma) & \cos(\gamma) & \cos(7\cdot\gamma) & \cos(13\cdot\gamma) & \cos(2\cdot\gamma) & \cos(8\cdot\gamma) & \cos(14\cdot\gamma) \\ 0 & \sin(6\cdot\gamma) & \sin(12\cdot\gamma) & \sin(\gamma) & \sin(7\cdot\gamma) & \sin(13\cdot\gamma) & \sin(2\cdot\gamma) & \sin(8\cdot\gamma) & \sin(14\cdot\gamma) \\ 1 & \cos(30\cdot\gamma) & \cos(60\cdot\gamma) & \cos(5\cdot\gamma) & \cos(35\cdot\gamma) & \cos(65\cdot\gamma) & \cos(10\cdot\gamma) & \cos(40\cdot\gamma) & \cos(70\cdot\gamma) \\ 0 & \sin(30\cdot\gamma) & \sin(60\cdot\gamma) & \sin(5\cdot\gamma) & \sin(35\cdot\gamma) & \sin(65\cdot\gamma) & \sin(10\cdot\gamma) & \sin(40\cdot\gamma) & \sin(70\cdot\gamma) \\ 1 & \cos(42\cdot\gamma) & \cos(84\cdot\gamma) & \cos(7\cdot\gamma) & \cos(49\cdot\gamma) & \cos(91\cdot\gamma) & \cos(14\cdot\gamma) & \cos(56\cdot\gamma) & \cos(98\cdot\gamma) \\ 0 & \sin(42\cdot\gamma) & \sin(84\cdot\gamma) & \sin(7\cdot\gamma) & \sin(49\cdot\gamma) & \sin(91\cdot\gamma) & \sin(14\cdot\gamma) & \sin(56\cdot\gamma) & \sin(98\cdot\gamma) \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4.2)$$

Al tener nueve fases, la matriz de Clarke debe ser de 9x9. Con respecto al parámetro k, se va a trabajar con la condición de que sea invariante tanto las corrientes de fase, así como las tensiones y los flujos magnéticos. Para estas condiciones el parámetro tomará un valor de 2/9. En este caso la matriz (4.2) deja abierta la posibilidad de aplicarse a una matriz simétrica o asimétrica en cuanto a la disposición de las fases se refiere. Esta posibilidad queda fijada al ángulo  $\gamma$ . En una máquina simétrica en devanados significa que en la disposición en la que se encuentran, el ángulo entre ellos es el mismo.

Esta transformación aplicada a la máquina nonafásica provoca que aparezcan tres subespacios:

- 1) Subespacio  $\alpha\beta$
- 2) Subespacio  $xy_1$
- 3) Subespacio  $xy_2$

Como consecuencia del aumento de fases, aparecen dos nuevos subespacios, a los que se les denominará  $xy_1$  y  $xy_2$ . En el contexto de una máquina trifásica, se pueden identificar componentes homopolares que corresponden a cada uno de los subespacios presentes en el sistema. No obstante, en este análisis se prescindirá de dichas componentes homopolares debido a que se asumirá que la máquina está compuesta por tres devanados con neutros independientes y aislados. Siguiendo los principios de la teoría trifásica, cuando los neutros están aislados, es posible obviar las componentes homopolares en las consideraciones y cálculos relacionados con la máquina.

#### 4.4. MODELO EN $d - q$ . TRANSFORMADA DE PARK

El desarrollo del modelo matemático de la máquina se encuentra en un punto en el que las variables cuentan con un significado físico claro gracias a la descomposición en VSD, trabajando en el sistema de referencia  $\alpha$ - $\beta$ . Tanto es así que en la actualidad existen numerosos estudios y artículos donde se trabaja en este marco de referencia. La capacidad de desacoplar en diferentes subespacios la generación de par y flujo de las pérdidas de la máquina presenta una gran ventaja con respecto al modelo por fases. Sin embargo, centrandolo en una máquina síncrona de imanes permanentes, es posible conseguir otra gran ventaja de la descomposición VSD.

Como se ha visto hasta ahora, la transformada de Clarke presenta un sistema de referencia estático, por lo que las señales que se obtienen siguen siendo sinusoidales. La cuestión se centra ahora en poder obtener un sistema de referencia móvil, el cual, siguiendo las características de las máquinas eléctricas rotativas, gire a la misma velocidad que el campo magnético rotórico de la máquina, como se muestra en la Figura 22. Este concepto consigue dar un paso más en la simplificación del modelo de la máquina.

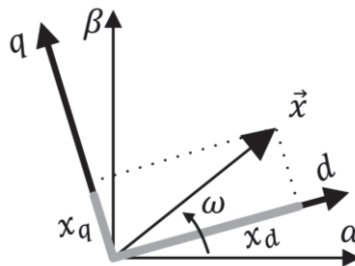


Figura 22. Sistema de referencia  $d$ - $q$ . Fuente [15]

En este punto, el resultado es un sistema de referencia giratorio el cual va a transformar las señales sinusoidales en dos señales continuas, como se puede observar en la Figura 23.

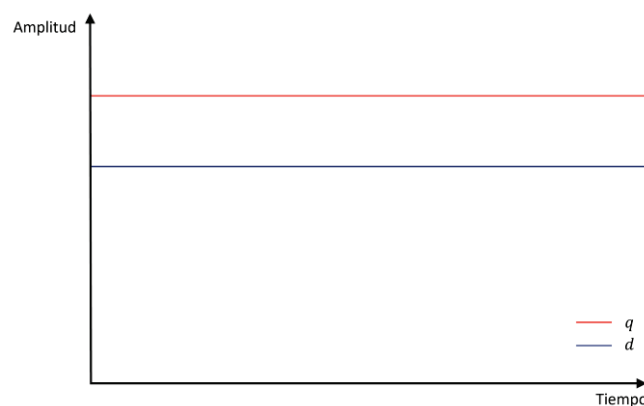


Figura 23. Comportamiento señal en sistema de referencia  $d$ - $q$

Un aspecto para tener en cuenta cuando se realiza el modelo de una máquina eléctrica rotativa es la posición del campo magnético giratorio. Una máquina de imanes permanentes tiene la peculiaridad del campo magnético del rotor se genera por los propios imanes, por lo que la posición de éste es conocida.

El sistema de referencia d-q presenta una particularidad cuando se alinea el eje d con el flujo magnético del rotor, adquiriendo un significado físico mucho más claro. El hecho de alinear el sistema de referencia con el flujo hace que se desacoplen la producción de par con respecto a la producción de flujo magnético.

La idea de trabajar con la descomposición VSD en el sistema de referencia d-q coge un peso muy importante, y en el caso de la máquina de imanes permanentes resulta innegable la gran ventaja que presenta, puesto que el cálculo de la posición del flujo magnético es trivial, pudiendo alinear el sistema de referencia con el flujo. Además, la corriente correspondiente al eje d encargada de generar el flujo, su corriente de referencia se fijará a 0, puesto que son los imanes los encargados de la generación del campo magnético.

Para poder pasar a este marco de referencia se va a utilizar la herramienta de la transformada de Park. Esta transformada se corresponde con proyecciones trigonométricas del vector que se ha visto con anterioridad  $\vec{x}$  en el nuevo sistema d-q. La matriz de la transformación sigue el siguiente modelo:

$$[D] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \text{sen } \theta \\ -\text{sen } \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

$$\vec{x}_{dq}^T = [D] \cdot \vec{x}_{\alpha\beta}^T, \quad (4.4)$$

En este caso el ángulo  $\theta$  se corresponde con el ángulo existente entre el sistema de referencia estático  $\alpha$ - $\beta$  y el rotórico d-q. Es decir, la transformación de Park se basa en la trigonometría para obtener sus componentes.

Como se ha comentado en el punto 4.3, en una máquina de más de tres fases, la representación de la máquina mediante la descomposición VSD hace que aparezcan más de un subespacio, sin embargo, estos subespacios son ortonormales entre sí, por lo que la transformada de Park se puede aplicar a cada uno de los subespacios por separado.

Por lo que la transformada de Park en una máquina de nueve fases, al igual que la de Clarke, genera seis componentes ortonormales dos a dos, junto con las tres homopolares, que según las hipótesis que se han determinado para el estudio de la máquina, no se van a tener en cuenta.

$$[P_{9ph}] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \text{sen } \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\text{sen } \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & \text{sen } \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\text{sen } \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \theta & \text{sen } \theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\text{sen } \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

## 4.5. MODELO VSD DE LA MÁQUINA

En este punto se plantearán las ecuaciones matemáticas que se usarán para modelar el comportamiento de la máquina multifásica objeto de estudio de este trabajo. Para ello será necesario especificar un punto de partida para el desarrollo de las ecuaciones. Es por ello por lo que se plantean las siguientes hipótesis:

- Se supondrá una máquina síncrona de polos lisos sin devanados amortiguadores.
- La máquina es simétrica y está eléctricamente equilibrada.
- El núcleo magnético tanto del rotor como del estátor es lineal y sus pérdidas son despreciables.
- No existe variación de la reluctancia en el entrehierro.

Como bien se ha explicado en puntos anteriores, una máquina síncrona dispone de un estátor y de un rotor. El estátor, que se compone de una serie de devanados, constituidos por conductores los cuales tienen una cierta resistencia  $R_s$ , y a su vez, al estar dispuestos en forma de bobina, también generan un campo magnético. Además, en el estator se producirá el efecto de reacción de inducido, debido al campo magnético que se crea en el rotor. Ambos fenómenos se recogerán en el término  $\vec{\lambda}_s$ . Con estas premisas, la ecuación de la tensión del estátor queda de la siguiente forma.

$$\vec{v}_s = R_s \cdot \vec{i}_s + \frac{d\vec{\lambda}_s}{dt}, \quad (4.6)$$

En el caso del rotor, tratándose de una máquina de polos lisos, se conformará de otro conductor, en este caso alimentado por corriente continua, y su comportamiento se puede expresar de la siguiente manera:

$$\vec{v}_r = R_f \cdot I_f + \frac{d\lambda_f}{dt}, \quad (4.7)$$

Donde  $I_f$  se corresponde con la corriente que recorre el devanado del rotor y  $\lambda_f$  con el campo magnético generado por este mismo. Tal y como se ha explicado en puntos anteriores, el objetivo de presentar un modelo matemático es poder trabajar con él de forma sencilla, y es por ello que a este modelo se le aplicarán las transformadas, primero de Clarke, y posteriormente de Park, de forma que se puedan aprovechar las ventajas que presenta definir este tipo de máquinas en el marco de referencia dq.

Si se expresan las ecuaciones anteriores en el sistema de referencia dq, se obtienen los siguientes resultados:

$$v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_r \cdot \lambda_{qs}, \quad (4.8)$$

$$v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_r \cdot \lambda_{ds}, \quad (4.9)$$

Las ecuaciones del flujo en el sistema de referencia d-q se pueden reescribir como:

$$\lambda_{ds} = L_d \cdot i_{ds} + L_{dm} \cdot I_f, \quad (4.10)$$

$$\lambda_{qs} = L_q \cdot i_{qs}, \quad (4.11)$$

En este caso se puede observar cómo aparece un término de velocidad. Esta velocidad corresponde con la velocidad arbitraria del sistema de referencia. En las máquinas síncronas expresadas en el marco de referencia dq, esta velocidad arbitraria se iguala a la velocidad eléctrica del rotor, de esta forma, si se alinea el eje d con el flujo magnético generado por el rotor, y además gira a la misma velocidad, es posible tener desacoplado el flujo del par, quedando ligados a los ejes d y q respectivamente.

A pesar de tener un modelo matemático bastante simplificado, es posible afinar un poco más y obtener otro modelo aún más simplificado. Para ello se deberá suponer que el campo magnético generado por el estátor de la máquina no va a variar con respecto al tiempo, de forma que las ecuaciones (4.8) y (4.9) quedarán de la siguiente forma:

$$v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} - \omega_r \cdot L_q \cdot i_{qs} + L_d \cdot \frac{di_{ds}}{dt}, \quad (4.12)$$

$$v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \omega_r \cdot L_d \cdot i_{ds} + \omega_r \cdot \lambda_r + L_q \cdot \frac{di_{qs}}{dt}, \quad (4.13)$$

Donde  $\lambda_r = L_{dm} \cdot I_f$ .

De esta forma, los circuitos equivalentes de cada una de las ecuaciones quedarían como se muestra en la Figura 24:

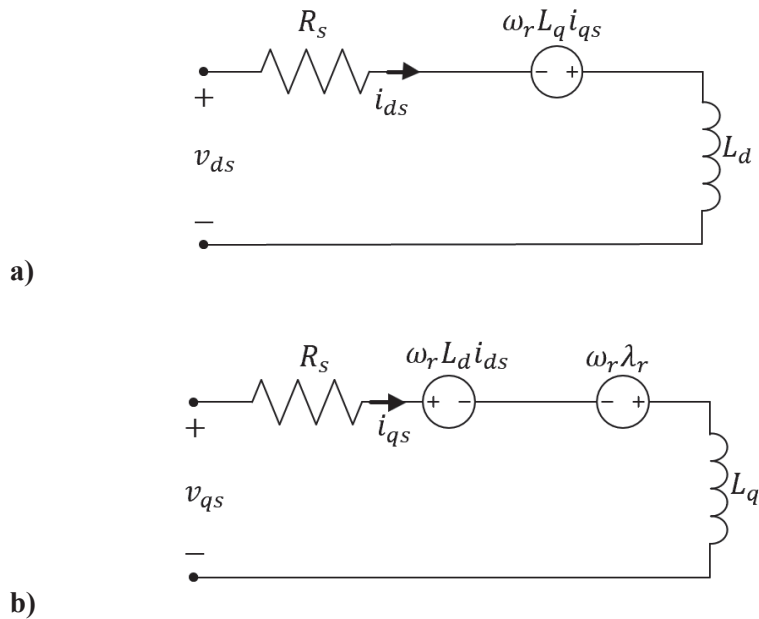


Figura 24. Circuito equivalente de una máquina síncrona: a) componente  $d$  y b) componente  $q$

Por último, para adecuar las ecuaciones anteriores una máquina de imanes permanentes se tiene que prestar atención en el rotor. En una máquina de imanes permanentes, el rotor carece de conductores ni de alimentación externa para la creación del campo magnético. En vez de eso, son los propios imanes dispuestos en el rotor los que van a generar el campo magnético por ellos mismos, por lo que para que el modelo matemático sea correcto es necesario cambiar el término  $\lambda_r$  por el término  $\lambda_f$ , el cual representará el flujo magnético creado por los imanes, tal y como se puede observar en la Figura 25.

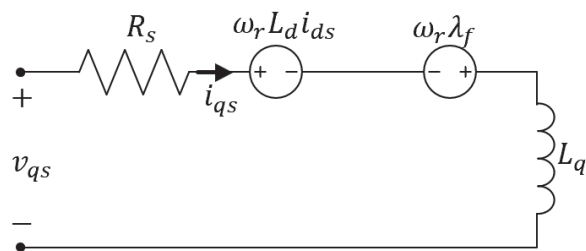


Figura 25. Circuito equivalente máquina síncrona de imanes permanente componente  $q$

Por último, se muestra la ecuación del par eléctrico generado por la máquina expresado en el marco de referencia dq:

$$T_e = \frac{3 \cdot p}{2} \cdot (i_{qs} \cdot \lambda_{ds} - i_{ds} \cdot \lambda_{qs}), \quad (4.14)$$

Sin embargo, esta ecuación se debe adaptar a una máquina de imanes permanentes de nueve fases, por lo que la ecuación del par quedará de la siguiente forma:

$$T_e = \frac{9 \cdot p}{2} \cdot (i_{qs} \cdot \lambda_f - i_{ds} \cdot (L_d - L_q)), \quad (4.15)$$

## 4.6. MODELO DEL CONVERTIDOR

### 4.6.1. FUNCIONAMIENTO

Uno de los objetivos del presente TFG se basa en el desarrollo de un modelo de control predictivo para la máquina en cuestión. Para poder realizar ese control es necesario disponer de algún tipo de actuador con el cual se puedan realizar controles sobre la máquina.

Es importante remarcar la tipología del convertidor que se va a usar para la máquina de imanes permanentes objeto de estudio de este trabajo. En el Punto 3.4 se comentó la combinación de devanados más habitual en máquinas con un número de fases múltiplo de tres, que es la agrupación en devanados trifásicos. Siguiendo esta disposición, se usará para cada devanado un convertidor trifásico de dos niveles. El esquema de estos convertidores se observa en la Figura 26. Esta es una de las grandes ventajas de utilizar este tipo de máquinas multifásicas, y es la de aprovechar tecnologías ya existentes para trifásicas.

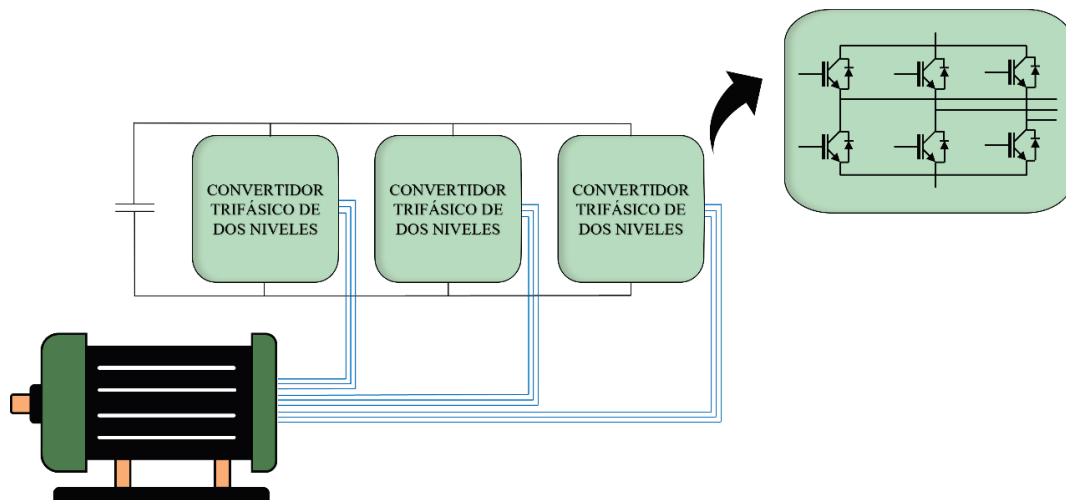


Figura 26. Topología del accionamiento eléctrico nonafásico empleado

Estos convertidores al ser de dos niveles se compondrán de dos interruptores IGBT por fase. El estado de conmutación de éstos se puede definir mediante una variable binaria,  $S_{ij}$ , de forma que  $S_{ij} = 0$  cuando el interruptor inferior está cerrado y el interruptor superior esté abierto, y en caso contrario,  $S_{ij} = 1$ .

La máquina de imanes permanentes de este trabajo se conforma de nueve fases, por lo que, si por cada fase se montan dos interruptores, uno superior y otro inferior, el número de estados de conmutación posibles son  $2^9 = 512$  estados. La aplicación de uno y otro estado de conmutación vendrá dada por el esquema de control empleado, aplicándose uno y otro estado dependiendo de las necesidades de la máquina en cada momento.

Los estados de conmutación disponibles pueden agruparse en un único vector  $[S] = [S_{a1}, S_{b1}, S_{c1}, S_{a2}, S_{b2}, S_{c2}, S_{a3}, S_{b3}, S_{c3}]$  cuyas componentes indican el estado de cada interruptor del convertidor.

## 4.6.2. MODELO MATEMÁTICO

Para desarrollar el modelo matemático del convertidor se partirá de una máquina trifásica y posteriormente se realizará la ampliación del modelo a una máquina multifásica. Se va a considerar que el accionamiento trifásico se va a encontrar en un estado de equilibrio, es decir, la suma de todas las tensiones de fase en la carga se pueden expresar como:

$$0 = v_{ab}(t) + v_{bn}(t) + v_{cn}(t), \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} v_{an} &= v_{aN} + v_{Nn}, \\ v_{bn} &= v_{bN} + v_{Nn}, \\ v_{cn} &= v_{cN} + v_{Nn}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Si se sustituye (4.17) en la condición de sistema equilibrado (4.16) se obtiene (4.18):

$$v_{aN} + v_{bN} + v_{cN} = -3 \cdot v_{Nn} = 0 = -\frac{1}{3} \cdot (v_{aN} + v_{bN} + v_{cN}), \quad (4.18)$$

Incluyendo la expresión (4.18) en cualquiera de las ecuaciones de (4.17), por ejemplo, en la fase a:

$$v_{an} = v_{aN} - \frac{1}{3} \cdot (v_{aN} + v_{bN} + v_{cN}) = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot v_{aN} - v_{bN} - v_{cN}), \quad (4.19)$$

Aplicando el procedimiento anterior a cada una de las fases se puede expresar el sistema de ecuaciones matricialmente de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}, \quad (4.20)$$

Finalmente se pueden expresar las tensiones de fase en función del estado de conmutación aplicado de la siguiente forma:

$$v_{iN} = S_i \cdot v_{dc} \rightarrow \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}, \quad (4.21)$$

Siendo:

- $v_{dc}$  la tensión de alimentación de la máquina

Se llamará [K] a la matriz que describe las tensiones de salida del convertidor (4.22)

$$[K] = \frac{v_{dc}}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}, \quad (4.22)$$



## CAPÍTULO 5 – MODELO DEL CONTROL PREDICTIVO

---

### 5.1. INTRODUCCIÓN

Una vez que se han establecido los modelos matemáticos de la máquina y del convertidor, junto con las herramientas que se van a usar para expresar las variables en otro sistema de referencia con el objetivo de realizar su control de manera más sencilla y dotar de mayor significado a las variables del modelo. En la actualidad existen diferentes estrategias de control para este tipo de máquinas. Por lo general, el objetivo principal de estas estrategias suele ser el mismo, el control de la velocidad de rotación de la máquina actuando sobre los interruptores del convertidor. El esquema de control que rigen estas estrategias se basa en el mismo principio: medir parámetros de salida de la máquina, como las corrientes y la velocidad, evaluar los resultados y generar una acción de control que se aplicará sobre el convertidor para poder alcanzar el objetivo marcado inicialmente.

A continuación, se desarrollará el esquema del modelo predictivo basado en el control de campo orientado, el cual es una de las diferentes estrategias de control que se han estado desarrollando durante las últimas décadas.

### 5.2. CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO

Durante los últimos años, los estudios en relación con el desarrollo de nuevos métodos de control para accionamientos eléctricos han estado encaminados a la adaptación de métodos de control trifásicos convencionales a las características de los sistemas multifásicos. Sin embargo, debido a la continua búsqueda de mejoras en las respuestas de los controles, han ido apareciendo nuevos métodos de control, y de entre ellos el control predictivo (MPC, por sus siglas en inglés), es uno de los más atractivos para tener respuestas rápidas pudiendo añadir restricciones a las acciones de control.

El esquema de control predictivo se basa en el empleo de un modelo discretizado de la máquina que le permite estimar el estado futuro de la misma. Gracias a esta predicción, es posible seleccionar aquellas acciones de control consideradas como óptimas en función del efecto que tendrán en la máquina, en cada instante de control. Este tipo de controles hacen que las respuestas dinámicas sean mucho más rápidas que otros controles. Es por ello por lo que el MPC es uno de los tipos de control más utilizados. Además de tener una respuesta mucho más rápida, es posible incluir varios objetivos dentro del control. Estos múltiples objetivos se verán reflejados en una única función objetivo, la cual se buscará minimizar, también llamada función de coste. La posibilidad de aplicar el control a máquinas de más de tres fases junto con la sencillez de su planteamiento hace que el control predictivo basado en modelo sea una de las opciones mejor vistas para controlar una máquina.

A pesar de los buenos resultados que presenta el MPC, existen ciertos puntos en los que se debe tener cuidado a la hora de elegir este tipo de control. Si bien es cierto que se consiguen buenos resultados en términos de respuesta dinámica, también es cierto que se necesita saber con cierta precisión el modelo de la máquina incluida en el accionamiento y de sus parámetros eléctricos, puesto que constituirán el punto de partida de las predicciones que se realizarán durante el control. Otro aspecto a tener en cuenta es su coste computacional. La posibilidad de aumentar el número de objetivos dentro de la función objetivo hace que el coste computacional también aumente de forma considerable. Como se verá en puntos posteriores, este coste se verá reducido realizando algunos ajustes dentro del control.

La Figura 27 muestra un esquema de control predictivo general aplicado a una máquina de tres fases:

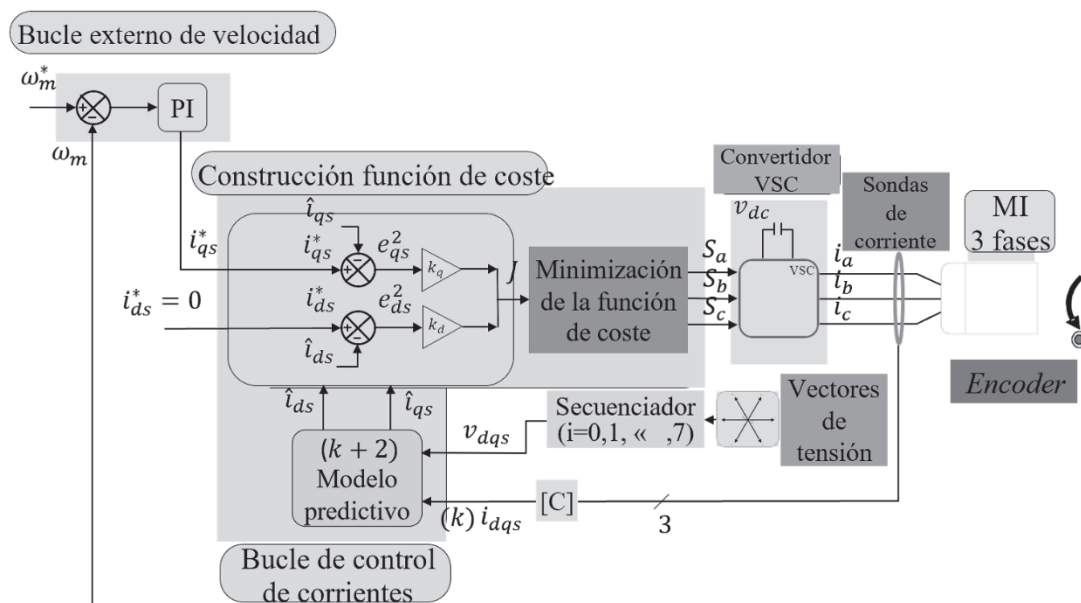
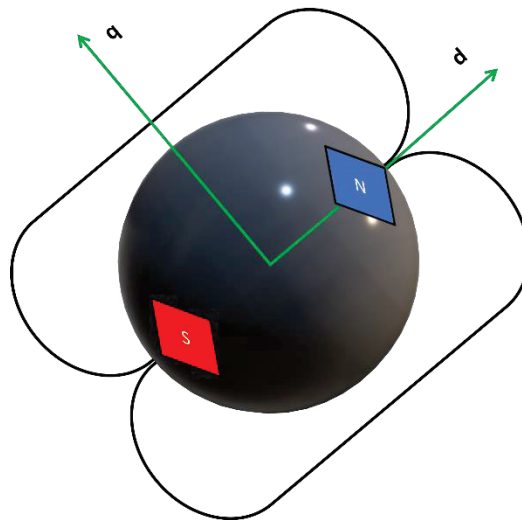


Figura 27. Esquema de control MPC en un accionamiento trifásico. Fuente [15]

Como se puede en la Figura 27, el esquema consta de dos partes bien diferenciadas. La primera de ellas se trata de un bucle externo de velocidad, y un bucle de control interno de corrientes.

- **BUCLE EXTERNO DE VELOCIDAD**

El lazo de control externo de velocidad está formado por un controlador de tipo Proporcional-Integral (PI). En dicho lazo, se emplea como señales de entrada la velocidad de consigna, definida por el usuario, y la velocidad rotórica mecánica. El resultado de este bucle de control es la corriente  $i_q$  de referencia que necesita proporcionar la máquina para asegurar el correcto funcionamiento del control. Por su parte, la corriente  $d$  de referencia será 0, puesto que el flujo magnético proviene de los propios imanes, y al alinear el eje  $d$  con el flujo magnético, tal y como se muestra en la Figura 28:



*Figura 28. Alineación del eje  $d$  con el flujo magnético*

Como la máquina objeto de estudio tiene nueve fases, además de establecer las corrientes de referencia  $d$ - $q$ , se deberán de establecer las corrientes de referencia del resto de subespacios. Como los otros dos subespacios  $x$ - $y$  corresponden con pérdidas de la máquina, sus corrientes de referencia se fijarán a 0, de forma que se intente conseguir un valor de pérdidas a fin de mejorar la eficiencia de la máquina.

- **LAZO INTERNO**

La segunda parte del esquema es el lazo de control interno. En este lazo se llevarán a cabo las estrategias predictivas de control definidas para la regulación de las corrientes de la máquina. La idea principal de este tipo de estrategias es la estimación a partir de un modelo discretizado de la máquina, de su estado futuro en base a una serie de parámetros de entrada.

Para poder realizar la estimación de estas corrientes será necesario recurrir a algún tipo de método de discretización. En este caso se va a optar por el método de “*Forward Euler*” (5.1), debido a que es uno de los métodos más simples de utilizar, y por consiguiente, tiene una gran eficiencia computacional en condiciones en las que se requiera una gran velocidad de respuesta. Para poder utilizarlo se usarán las ecuaciones definidas anteriormente que modelan el comportamiento de la máquina. No obstante, será necesario realizar una tarea de discretización para poder aplicar el método de estimación.

$$\frac{d}{dt}[X] = [A] \cdot [X] + [B] \cdot [U] + [E], \quad (5.1)$$

Para poder determinar las ecuaciones de la máquina en el espacio de estados, primero se despejarán las corrientes, puesto que serán estas los parámetros que se estimen en un instante futuro.

$$\begin{aligned} \frac{di_{ds}}{dt} \cdot L_d &= v_{ds} - R_s \cdot i_{ds} + \omega_r \cdot L_q \cdot i_q, \\ \frac{di_{qs}}{dt} \cdot L_q &= v_{qs} - R_s \cdot i_{qs} - \omega_r \cdot L_d \cdot i_d - \omega_r \cdot \lambda_f, \\ \frac{di_{xy}}{dt} \cdot L_{xy} &= v_{xy} - R_s \cdot i_{xy}, \end{aligned} \quad (5.2)$$

La expresión referente al subespacio x-y en (5.2), es válida para todas las componentes x-y de los dos subespacios que aparecen al aplicar la descomposición VSD. Una vez que se dispone de estas ecuaciones, se pueden discretizar, pasando al espacio de estados de la siguiente forma:

$$\frac{di_{ds}}{dt} \approx \frac{i_{d|k+1} - i_{d|k}}{\Delta T}, \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{i_{d|k+1} - i_{d|k}}{\Delta T} \cdot L_d &= v_{ds} - R_s \cdot i_{ds} + \omega_r \cdot L_q \cdot i_q, \\ \frac{i_{q|k+1} - i_{q|k}}{\Delta T} \cdot L_q &= v_{qs} - R_s \cdot i_{qs} - \omega_r \cdot L_d \cdot i_d - \omega_r \cdot \lambda_f, \\ \frac{i_{xy|k+1} - i_{xy|k}}{\Delta T} \cdot L_{xy} &= v_{xy} - R_s \cdot i_{xy}, \end{aligned} \quad (5.4)$$

Despejando de las ecuaciones (5.4):

$$\begin{aligned}
 i_d|_{k+1} &= i_{d_k} + (v_{ds} - R_s \cdot i_{ds} + \omega_r \cdot L_q \cdot i_q) \cdot \frac{\Delta T}{L_d}, \\
 i_q|_{k+1} &= i_{q_k} + (v_{qs} - R_s \cdot i_{qs} - \omega_r \cdot L_d \cdot i_d - \omega_r \cdot \lambda_f) \cdot \frac{\Delta T}{L_q}, \\
 i_{xy}|_{k+1} &= i_{xy_k} + (v_{xy} - R_s \cdot i_{xy}) \cdot \frac{\Delta T}{L_{xy}},
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

Una vez que se encuentra despejadas las corrientes de cada uno de los circuitos en un instante  $k+1$ , se procede a plantear las matrices que regirán las ecuaciones (5.5). En este caso, se puede observar que existen dos partes diferenciadas a la derecha de la ecuación. La primera corresponde a las corrientes en el instante  $k$ , y los parámetros del circuito equivalente de la máquina. Por lo que la matriz  $[A]$  quedará de la siguiente forma:

$$[A] = ([I] + [A_p]), \tag{5.6}$$

Siendo:

$$[I] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{5.7}$$

$$[A_p] = \begin{bmatrix} -R_s/L_d & (L_q \cdot \omega_r)/L_d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(L_d \cdot \omega_r)/L_q & -R_s/L_q & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_s/L_{xy} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_s/L_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -R_s/L_{xy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_s/L_{xy} \end{bmatrix}, \tag{5.8}$$

Tal y como se muestra en (5.1), se han separado los términos que multiplicaban a las corrientes de los términos de las tensiones. Es por ello por lo que la matriz [B] sigue la misma estructura que [A], pero en este caso los coeficientes serán los siguientes:

$$[B] = \begin{bmatrix} 1/L_d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_q & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/L_{xy} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/L_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/L_{xy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/L_{xy} \end{bmatrix}, \quad (5.9)$$

Por último, la matriz [E] corresponde con la influencia del campo magnético de los imanes:

$$[E] = \begin{bmatrix} 0 & -(\lambda_f \cdot \omega_r)/L_q & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad (5.10)$$

La matriz [X] se corresponde con las corrientes, y la matriz [U] con las tensiones, quedando de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} [X] &= [i_d \quad i_q \quad i_{x1} \quad i_{y1} \quad i_{x2} \quad i_{y2}]^T, \\ [U] &= [v_d \quad v_q \quad v_{x1} \quad v_{y1} \quad v_{x2} \quad v_{y2}]^T, \end{aligned} \quad (5.11)$$

Finalmente, para obtener el vector  $[X]_{k+1}$  de las corrientes, la ecuación matricial queda de la siguiente forma:

$$[X]_{k+1} = ([I] + [A_p] \cdot \Delta T) \cdot [X]_k + [B] \cdot \Delta T \cdot [U] + [E] \cdot \Delta T, \quad (5.12)$$

Con esta serie de pasos se llegan a estimar las corrientes para un instante de tiempo futuro en  $k+1$ , sin embargo, debido a las pequeñas magnitudes que tienen los tiempos de control, es necesario tener en cuenta los retrasos que se producen a la hora de realizar los cálculos necesarios en las predicciones. Si no se tuviesen en cuenta es posible que en ciertos instantes del control se estén utilizando estados de conmutación correspondiente con instantes de tiempo anteriores, este hecho recibe el nombre de *One Step Delay Compensation*. Para poder solucionar este problema una técnica muy común es realizar las predicciones de las corrientes para un instante de tiempo futuro en  $k+2$ .

Para ello, a las corrientes ya estimadas en  $k+1$  se les volverá a aplicar el método de estimación, obteniendo finalmente las corrientes en el instante temporal de  $k+2$ , las cuales servirán como retroalimentación del lazo interno del modelo predictivo.

La siguiente parte del lazo interno es la función de coste del problema. A partir de la minimización de ésta será posible determinar el estado de conmutación óptimo para los parámetros de corrientes estimados, en este caso, en un instante de tiempo futuro de  $k+2$ . Para determinar ese estado de conmutación óptimo en la función de coste se evaluarán las diferencias entre las corrientes estimadas y las corrientes medidas, haciendo que su error sea el mínimo posible. En el caso del presente TFG sólo se va a considerar un objetivo en la función de coste, sin embargo, al haber aplicado un control predictivo basado en modelo, sería posible añadir más objetivos a la función de coste, siendo esta una de las grandes ventajas de utilizar esta tipología de control.

Por lo que la función de coste se construye de la siguiente forma:

$$J = k_d \cdot e_d + k_q \cdot e_q + k_{xy1} \cdot e_{xy1} + k_{xy2} \cdot e_{xy2}, \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} e_d &= (i_d^* - \hat{i}_d)^2, \\ e_q &= (i_q^* - \hat{i}_q)^2, \\ e_{xy1} &= (i_x^* - \hat{i}_x)|_1^2 + (i_y^* - \hat{i}_y)|_1^2, \\ e_{xy2} &= (i_x^* - \hat{i}_x)|_2^2 + (i_y^* - \hat{i}_y)|_2^2, \end{aligned} \quad (5.14)$$

Donde:

- $k_d, k_q, k_{xy1}$  y  $k_{xy2}$  serán los pesos que se les dará a cada uno de los errores cometidos en las corrientes
- $i_d^*, i_q^*, i_x^*, i_y^*$  son las corrientes de referencia
- $\hat{i}_d, \hat{i}_q, \hat{i}_x, \hat{i}_y$  son las corrientes estimadas en un periodo  $k+2$

### 5.3. SELECCIÓN DE ESTADOS DE CONMUTACIÓN

El control predictivo basado en modelo presenta una serie de ventajas interesantes, haciendo que sea uno de los modelos más utilizados en los últimos estudios. No obstante, aplicarlo en máquinas con un mayor número de fases supone que su coste computacional aumente de forma considerable.

Si se centra la atención en el funcionamiento del modelo predictivo, es necesario analizar todos los estados de conmutación posibles del convertidor para poder determinar el óptimo para el instante de tiempo evaluado. En máquinas de seis fases en las que se usan convertidores de dos niveles, el número de estados de conmutación posibles asciende a la cifra de 64, con la relación de  $2^6$ , debido a la configuración del convertidor. Cuando se aumentan las fases, este número aumenta de forma que  $2^9 = 512$ . Evaluar 512 estados de conmutación en fracciones de segundo supone un coste computacional demasiado grande. Para poder paliar esta dificultad, es posible aplicar alguna técnica que permita disminuir esta cifra.

En puntos anteriores se ha explicado que al definir la máquina de nueve fases mediante la descomposición VSD se generan tres subespacios, que, con la configuración de los devanados de la máquina, uno de ellos corresponde con la generación de flujo y par, y los otros dos se corresponden con las pérdidas de la máquina. Los 512 estados de conmutación se representan en los tres subespacios a la vez, por lo que, para reducir el número de estados se definirá un criterio para escoger los estados que más interesen para el funcionamiento de la máquina.

Además, el uso de estados de conmutación con una baja producción en  $\alpha\beta$  y alta en  $xy$  provoca una degradación significativa en la calidad de las corrientes de fase obtenidas. Este es otro de los motivos por los que se procede a la selección de estados de conmutación.

Para ello, los vectores representados en los subespacios se pueden agrupar en coronas de mayor a menor módulo. Para que esta selección de vectores sea efectiva es necesario escoger vectores de las coronas más grandes, y de las intermedias en el plano  $\alpha\beta$ , mientras que en los planos  $xy$  lo ideal es que sean las coronas de menor módulo.

Para este procedimiento de selección se representarán las diferentes coronas de vectores en cada uno de los subespacios generados por la descomposición. Después de ver los diferentes módulos de las coronas se opta por escoger la corona de vectores más exterior (puntos marcados en rojo en la Figura 29a), la cual tiene un módulo pequeño en los subespacios  $xy$  (Figura 29b y Figura 29c). La segunda corona escogida tiene un tamaño medio, para poder tener un equilibrio entre vectores de gran tamaño con otros más pequeño, puesto que si en un momento dado, la máquina necesita un nivel de tensión más bajo, escogiendo únicamente los vectores de mayor tamaño no se podrá conseguir el valor buscado. Es por ello por lo que la corona de vectores seleccionados corresponde con una en la que su módulo coincide en los tres subespacios (vectores en color verde en la Figura 29).

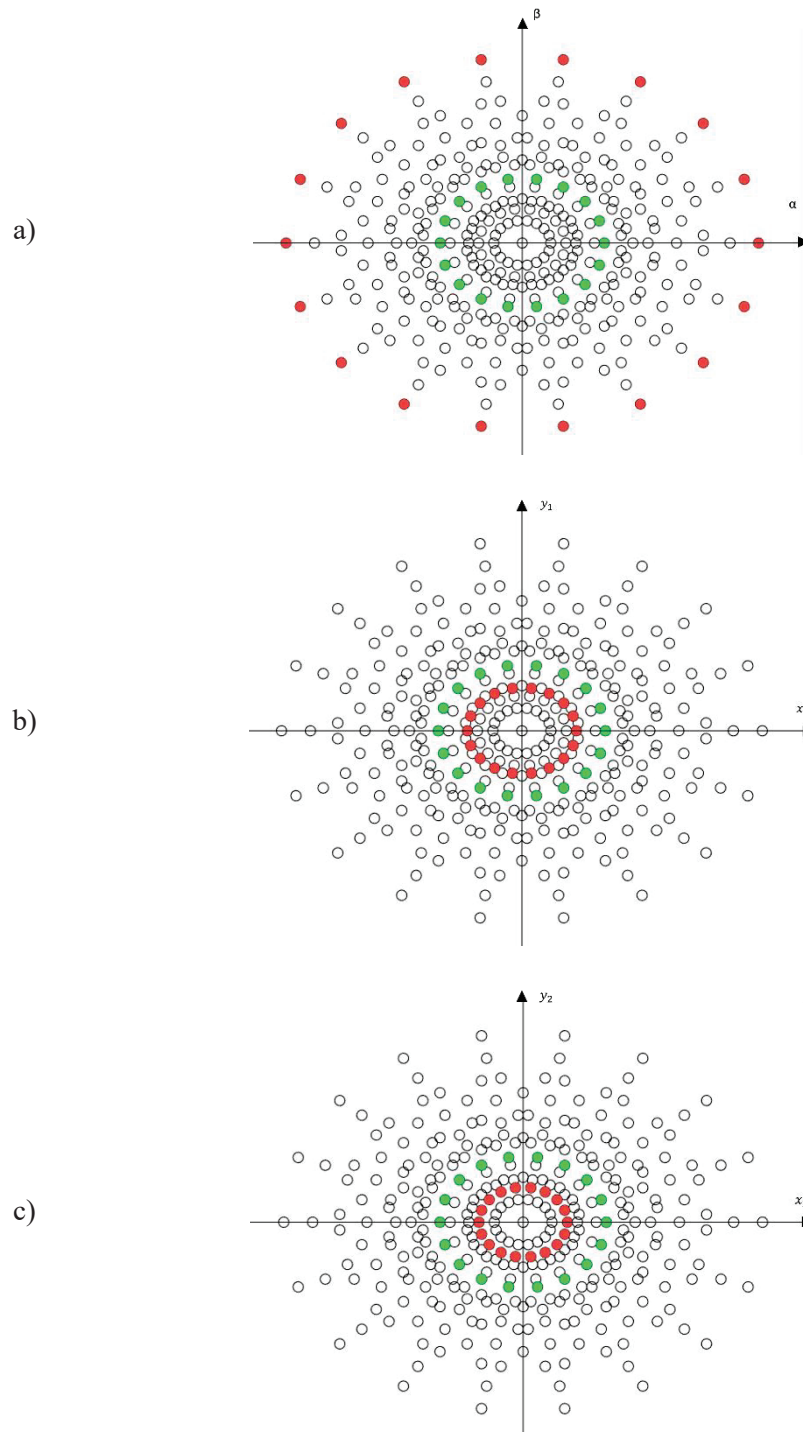


Figura 29. Vectores de tensión en el subespacio a)  $\alpha\beta$ , b)  $xy_1$ , c)  $xy_2$

## CAPÍTULO 6 – SIMULADOR

---

### 6.1. INTRODUCCIÓN

Hasta el momento, se han establecido las bases teóricas de los conceptos empleados en la creación del modelo de una máquina síncrona de imanes permanentes. Estos fundamentos se han presentado en su forma teórica, haciendo uso de ecuaciones, circuitos equivalentes y diversos teoremas. Además, se ha introducido el modelo de control predictivo que se implementará. Sin embargo, para adentrarnos en la complejidad de este sistema, es necesario dar un paso más allá.

Es aquí donde entra en juego Simulink. Esta herramienta constituye una parte integral del entorno de programación Matlab, desarrollado por MathWorks. A través de Simulink, las ecuaciones previamente formuladas adquieren un sentido físico más profundo, ya que posibilita la visualización de los resultados que estas ecuaciones generan una vez que se aplican en la práctica.

En este capítulo, se procederá a realizar una descripción exhaustiva de cada uno de los bloques y conexiones que se emplearán en el entorno de Simulink para la construcción del simulador. De esta manera, se podrá abordar con precisión la creación de un modelo virtual que simule el comportamiento de la máquina síncrona de imanes permanentes.

## 6.2. BLOQUE MODELO DE LA MÁQUINA

Primero se analizará el bloque que recoge todo lo referente al modelo de la máquina. Este bloque incluirá desde las transformadas que se realicen para pasar de un sistema de referencia a otro, como las ecuaciones que rigen el funcionamiento de la máquina.

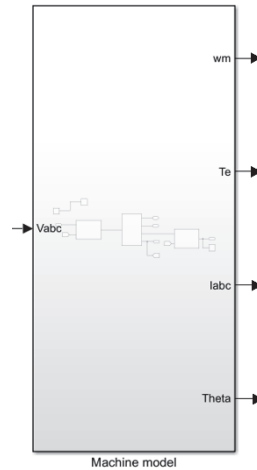


Figura 30. Entradas y salidas del bloque del modelo de la máquina

Como se ve en la Figura 30, la única entrada a este bloque son las tensiones de fase. Estas tensiones de fase, como se verá en puntos posteriores, provendrán del modelo predictivo, pasando por el convertidor, y por último llegarán a este bloque.

En las salidas aparecen:

- Velocidad del rotor ( $\omega_m$ ). A partir de esta velocidad mecánica se podrá determinar la velocidad de rotación, que en el entorno de Simulink se ha denominado  $\omega_e$ , y que en las ecuaciones se corresponde con  $\omega_r$ .
- Par eléctrico ( $T_e$ ). Este será el par electromagnético producido por la máquina.
- Corrientes de fase ( $I_{abc}$ ).
- Ángulo  $\theta$ . Este ángulo corresponde con el ángulo de la posición del flujo magnético del rotor.

## 6.2.1. SUBSISTEMAS TRANSFORMADAS

Una vez que se accede al interior del bloque se pueden ver tres subsistemas como los que se muestran en la Figura 31.

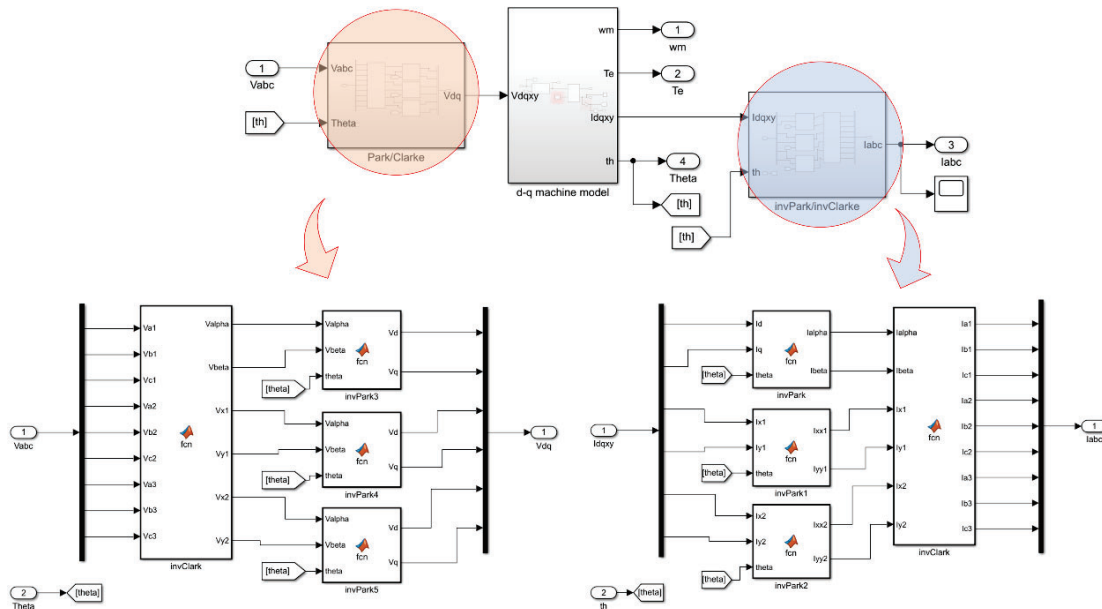


Figura 31. Bloques de las transformadas de Clarke, Park y sus inversas

El primer subsistema remarcado corresponde con la aplicación de las transformadas de Clarke y posteriormente de Park. Como se puede apreciar en la Figura 31, la entrada a este subsistema son las tensiones de fase aplicadas a la máquina. Una vez que se le aplican la matriz de Clarke, estas tensiones pasan a estar representadas en el sistema de referencia  $\alpha$ - $\beta$ . Como el resultado de esta transformación son tres subespacios ortogonales, es posible realizar la transformada de Park a cada subespacio individualmente, transformando las señales de dos a dos:

- $\alpha\beta \rightarrow dq$
- $xy|_1 \rightarrow xy|_1'$
- $xy|_2 \rightarrow xy|_2'$

De esta forma se obtienen las tensiones en el sistema de referencia rotórico d-q. Una vez que se han realizado las correspondientes operaciones en el bloque central del modelo en d-q de la máquina, para poder visualizar las corrientes de fase es necesario volver a aplicar las transformadas, sin embargo, en este caso serán sus inversas, puesto que pasamos de d-q a  $\alpha$ - $\beta$ . En este caso, las entradas son las corrientes calculadas en d-q, procedentes del bloque del modelo, y la salida son las corrientes de fase.

### 6.2.2. SUBSISTEMA MODELO EN $d$ - $q$

En el interior del subsistema central se encuentran por un lado las ecuaciones de voltaje y por otro las ecuaciones mecánicas de la máquina, tal y como aparece en la Figura 32.

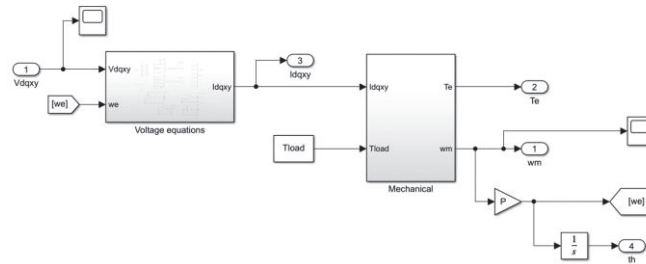
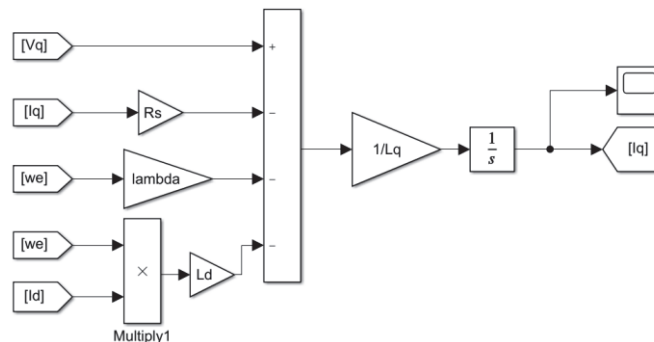


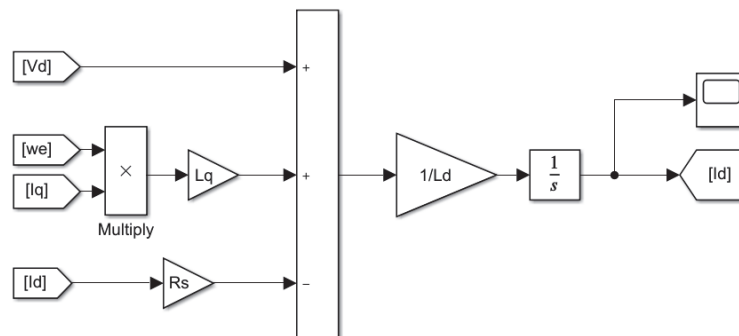
Figura 32. Subsistema del modelo en  $d$ - $q$

- **ECUACIONES DE TENSIONÍ**

Para poder incluir las ecuaciones de la máquina definidas en capítulos anteriores, será necesario expresarlas en el espacio de estados, tal y como se ha mostrado en el Punto 5.2. En este subsistema se busca que a partir de las tensiones de entrada se puedan determinar las corrientes de la máquina, que para el modelo predictivo servirán para las llamadas corrientes medidas de la máquina.



a)



b)

Figura 33. Modelo en Simulink de los circuitos equivalentes en a) componente  $d$  y b) componente  $q$

Como se puede observar en la Figura 33, mediante un bloque de suma, se integran cada uno de los componentes de las ecuaciones (4. 12) y (4. 13). De forma que si se despeja la derivada de la corriente  $i_d$ , se obtiene el sistema de la Figura 33, que al integrarlo mediante el bloque  $\frac{1}{s}$ , se obtiene la corriente medida. Para el caso del eje q se realiza de la misma forma. También hay que indicar que la velocidad  $\omega_e$  se calcula multiplicando la velocidad mecánica del rotor por el número de pares de polos, tal y como se puede ver en la Figura 32.

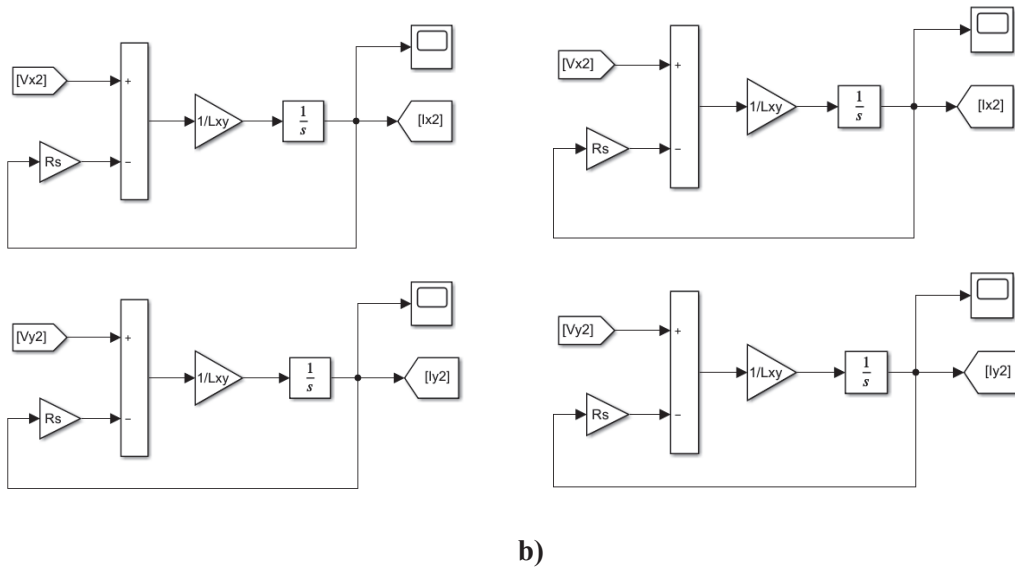


Figura 34. Modelo en Simulink de los circuitos equivalentes en a) componentes  $xy|I$  y b) componente  $xy|I$

Para el caso de las componentes de los subespacios denominados x-y se procede de igual forma, despejando sus corrientes, e integrando el resto de la ecuación, formando el conjunto de bloques de la Figura 34. Con este bloque se han calculado todas las corrientes en d-q de la máquina. En la Figura 35 se muestra el siguiente subsistema donde se utilizarán estas corrientes para calcular el par electromagnético de la máquina.

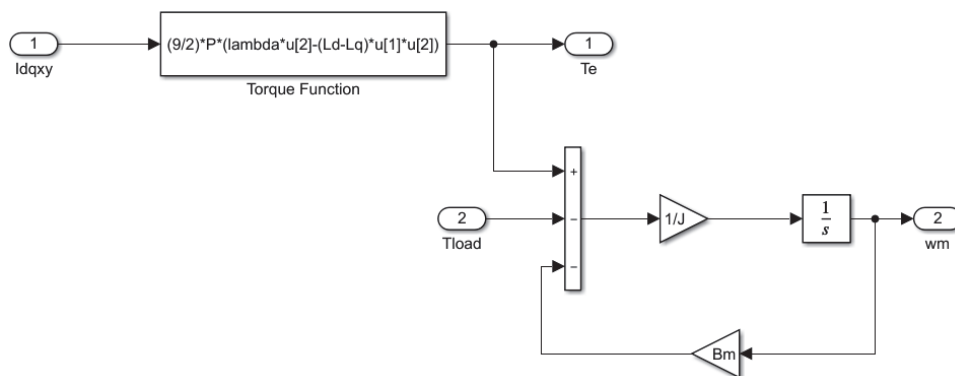


Figura 35. Modelos en Simulink de la ecuación del par electromagnético y cálculo de la velocidad mecánica

En este subsistema además de tener como entrada las corrientes calculadas anteriormente, también tiene como entrada el par de carga ( $T_{load}$ ), y el coeficiente de pérdidas por fricción  $B_m$ . De este bloque se obtienen tanto el par electromagnético como la velocidad mecánica del rotor, la cual se usará para la velocidad eléctrica de éste, como se ha visto anteriormente.

### 6.3. BLOQUE MODELO CONTROL PREDICTIVO

El segundo bloque principal del simulador se trata del bloque del modelo predictivo. En este caso, el bloque se trata de una función de Matlab, en la que a través de un código de programación se han establecido las operaciones necesarias para llevar a cabo el control predictivo basado en modelo.

En el interior de la función de Matlab se encontrarán las siguientes partes:

- **BUCLE EXTERNO PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD**

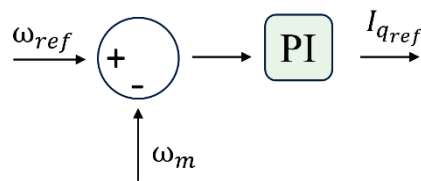


Figura 36. Bucle externo de velocidad

En la Figura 36, la cual corresponde con el controlador PI del bucle externo, se realiza una comparación entre la velocidad de referencia y la velocidad real medida de la máquina. Esta diferencia será la entrada para el controlador PI a partir del cual se determinará la corriente  $I_{qref}$ .

Para poder definir el controlador PI se hará uso del teorema de la suma de Riemman (Figura 37).

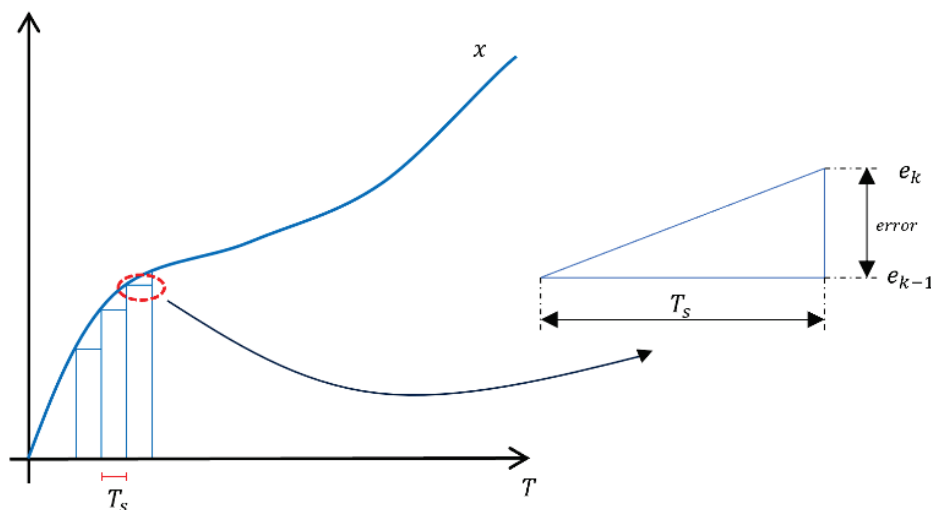


Figura 37. Esquema suma de Riemman

$$suma_k = suma_{k-1} + \frac{1}{2} \cdot T_s \cdot (e_k - e_{k-1}) \quad (6.1)$$

Por lo que, cuando se ejecute la simulación, para cada instante de simulación se realizará el cálculo del error de velocidad. Inicialmente, el valor de  $e_{k-1}$  será 0, al igual que el valor de  $suma_{k-1}$ . Una vez que se calcule por primera vez el valor de  $suma_k$ , se calculará la corriente de referencia de la siguiente forma:

$$I_{q_{ref}} = k_p \cdot (\omega_{error} + k_i \cdot suma_k) \quad (6.2)$$

Posteriormente se actualizará el error  $e_{k-1}$  igualándolo a  $\omega_{error}$ .

Además, se impondrá la condición de que la corriente de referencia no pueda superar la corriente nominal, puesto que, si lo hiciese, los conductores de la máquina sufrirían demasiado, limitando considerablemente su vida útil.

El resto de las corrientes de referencia, tanto la corriente de la componente d, como el resto de las corrientes de los subespacios x-y se fijarán a un valor 0. La corriente d se fija a 0 debido a lo explicado en el punto 5.2, y evidentemente, como los subespacios x-y hacen referencia a las pérdidas de la máquina, sus corrientes de referencia interesan que sean 0.

Una vez que se han establecido las corrientes de referencia, el siguiente paso es determinar las corrientes medidas. Las corrientes medidas provienen del bloque del modelo de la máquina. Los datos de salida de las corrientes de fase en el bloque descrito en el punto anterior servirán como entrada para el bloque del modelo predictivo. Al igual que se hiciera en el otro bloque, se deberán transformar estas corrientes y expresarlas mediante la descomposición VSD en el sistema de referencia móvil d-q. Para ello se aplicará la matriz de transformación de Clarke, y posteriormente la de Park.

En este momento ya se han determinado tanto las corrientes de referencia como las corrientes medidas, por lo que es hora de dar otro paso más, y aplicar el concepto de “*Forward Euler*” explicado en puntos anteriores.

Para la primera estimación se usará un vector de tensiones  $u_k$  inicializado a 0, el cual una vez que se estimen las corrientes en el instante k+2, y se calcule la función de coste, obteniendo la combinación de tensiones óptimas, actualizará sus valores a estos últimos calculados.

La segunda estimación se realizará mediante un bucle, puesto que es en este momento donde se determinará la combinación de las conmutaciones de los interruptores IGBT óptima para la función de coste dada. En este caso, en vez de usar el vector de tensiones  $u_k$  se utilizará otro

vector de tensiones el cual contendrá cada uno de los estados de conmutación utilizados para realizar el control ( $V_{dq}$ ).

Finalmente, este bloque del modelo predictivo tendrá como salidas tanto los estados de conmutación ( $S_{out}$ ), como los datos de las corrientes en d-q y  $\alpha$ - $\beta$ , como se observa en la Figura 38.

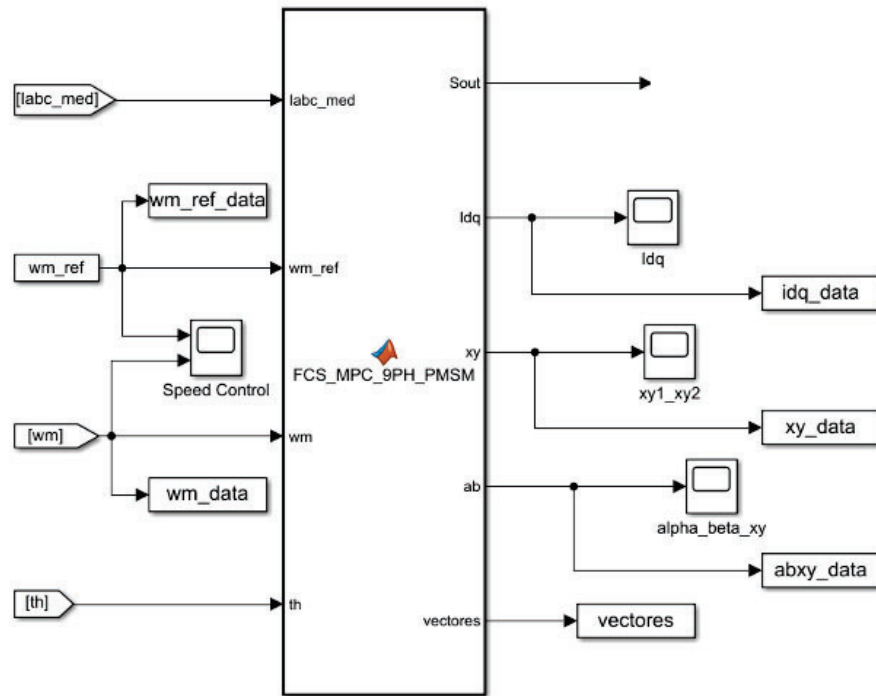


Figura 38. Bloque modelo control predictivo

## 6.4. BLOQUE CONVERTIDOR

Por último, el tercer bloque principal del simulador: el convertidor (Figura 39). De los bloques vistos hasta ahora, éste es el más sencillo, puesto que en su interior únicamente se encuentra un bloque de ganancia. La entrada a este bloque es el estado de conmutación óptimo calculado en el bloque del modelo predictivo. Tal y como se ha desarrollado en el punto 4.6, se utilizará la matriz del convertidor (4. 23).

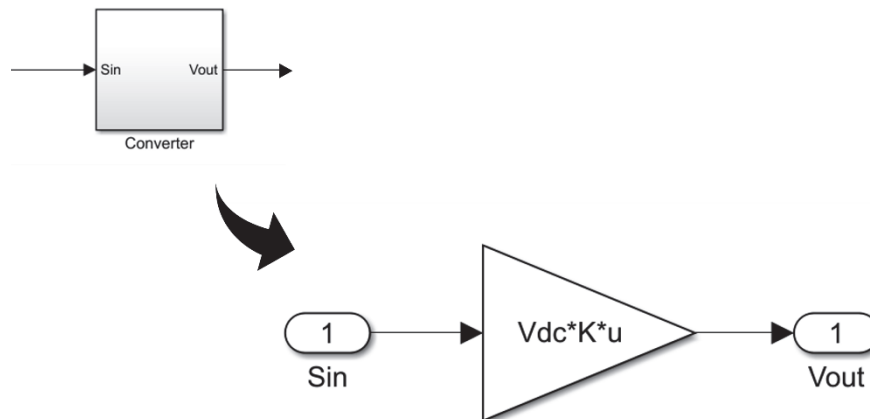


Figura 39. Bloque del convertidor

La función de este bloque es la de multiplicar los estados de conmutación de cada uno de los interruptores IGBT por la tensión del bus de continua y además, para trabajar con las tensiones de fase será necesario aplicar la matriz K del convertidor. Es por ello que este bloque hace de conexión entre los dos anteriores, por lo que su aplicación es fundamental a la hora de que el simulador funcione correctamente.

Con este bloque se completa el simulador. Adicionalmente, también se han utilizado en el simulador ventanas de osciloscopio para poder tener una imagen visual de los parámetros que se han considerado importantes a la hora de determinar si el control de la máquina es correcto. Además de tener una imagen visual, también se han incluido bloques con los que sacar la información del entorno en Simulink e incluirlas en los scripts de Matlab utilizados para el análisis de los resultados obtenidos por el simulador.

## 6.5. SIMULADOR COMPLETO

Para terminar este capítulo se mostrará el conjunto del simulador completo, para poder observar las conexiones realizadas entre los tres bloques principales.

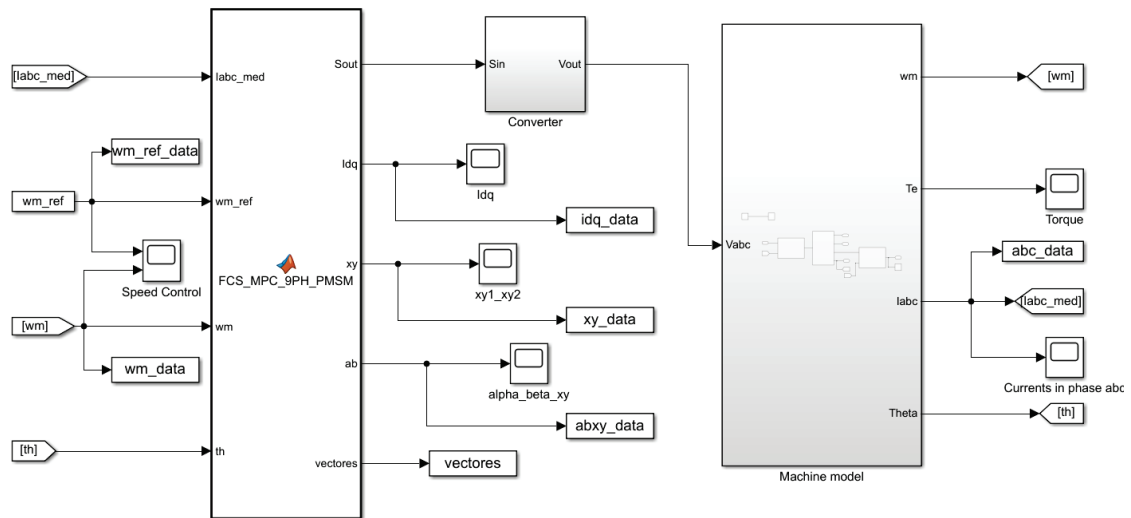


Figura 40. Conjunto simulador completo

Como se puede observar en la Figura 40, el bloque del convertidor hace de actuador entre el bloque del modelo predictivo y el modelo de la máquina. De ahí que sea uno de los bloques más importantes dentro del simulador, y aun así, es el bloque más simple de los tres que se ven en la Figura 40.

## CAPÍTULO 7 – RESULTADOS DE SIMULACIÓN

### 7.1. VALORES PARÁMETROS UTILIZADOS

Con el propósito de llevar a cabo las diversas simulaciones, se han establecido los valores correspondientes a los parámetros de la máquina que incorpora imanes permanentes. Esta elección se basa en los parámetros previamente definidos para una máquina trifásica con imanes permanentes, como se documenta en la referencia [17]. Para el cálculo de las inductancias en los ejes  $xy$ , se ha seguido un proceso de dividir las magnitudes de las inductancias previamente evaluadas en el sistema de referencia  $dq$ , dividiéndolas posteriormente por un factor de 10.

El conjunto de parámetros se recoge en la siguiente tabla:

Símbolo	Nombre	Valor
$V_{dc}$	Tensión nominal	220 V
$P$	Número de pares de polos	4
$R_s$	Resistencia del estátor	2.875 $\Omega$
$\lambda_f$	Flujo de los imanes	0.175 Wb-vuelta
$L_q$	Inductancia eje q	8.5 mH
$L_d$	Inductancia eje d	8.5 mH
$L_{xy1}$	Inductancia plano $xy_1$	0.85 mH
$L_{xy2}$	Inductancia plano $xy_2$	0.85 mH
$J$	Inercia	0.0001 kg m <sup>2</sup>
$B$	Coefficiente de fricción	0.001 Nms
$I_n$	Corriente nominal	10 A

## 7.2. RESULTADOS SIMULACIÓN BAJA VELOCIDAD

En esta primera simulación se obtendrán los resultados de diferentes variables importantes en la máquina para una velocidad determinada. En este caso se ha fijado la velocidad de referencia a 1000 rpm, y el objetivo final es que el conjunto de la máquina y controlador pueda alcanzar y mantener esa velocidad de referencia.

Como se puede observar en la Figura 41a, la máquina es capaz de seguir la velocidad impuesta sin ningún tipo de problema. Si se centra la atención en las corrientes de fase (Figura 41b), se puede ver cómo tienen un comportamiento sinusoidal, obteniendo un valor de rms de 4.42 A. Además, las corrientes correspondientes con los subespacios generados en la descomposición VSD se puede apreciar cómo las corrientes medidas siguen perfectamente a las corrientes de referencia, tanto en el plano  $dq$  como en los planos  $xy$ . Por último, en el seguimiento del par de carga también se obtienen resultados correctos.

El THD obtenido para esta simulación tiene un valor entorno al 51%. Otros resultados obtenidos de esta simulación han sido los valores de varianza de las corrientes en los planos  $xy$ , obteniéndose los siguientes valores:

$$\sigma_{xy1} = 1,77$$

$$\sigma_{xy2} = 1,66$$

Además, también se ha calculado la frecuencia de conmutación del control, obteniéndose un resultado de 2181 Hz.

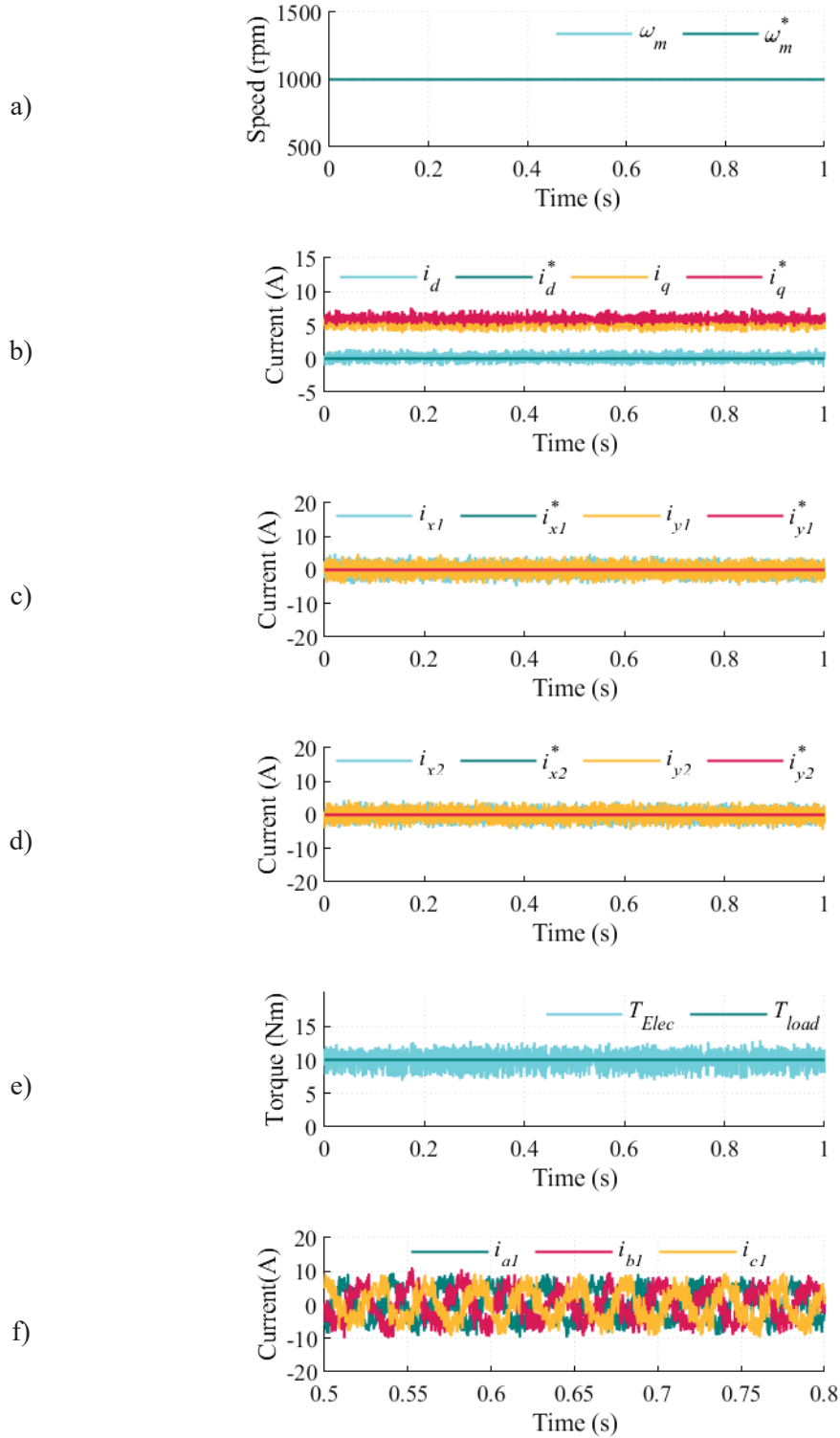


Figura 41. Simulación a baja velocidad: a) velocidad del motor, b) corrientes dq, c) corrientes  $x1$ , d) corrientes  $x2$ , e) par electromagnético, f) corrientes de fase en el devanado a1, b1 y c1

### 7.3. RESULTADOS SIMULACIÓN ALTA VELOCIDAD

En esta segunda simulación se va a cambiar la velocidad de referencia por una más elevada, en este caso, 2000 rpm. Al igual que en la simulación anterior, la máquina realiza un correcto seguimiento de esta velocidad, como se puede apreciar en la Figura 42a.

Al aplicar una velocidad de referencia mayor, en este caso se obtienen una mayor frecuencia en las corrientes de fase. En el caso de las corrientes  $dq$  se puede observar un pequeño aumento en la amplitud en comparación con la simulación anterior. El resto de las corrientes en los planos  $xy$  se mantiene su amplitud sin observar muchos cambios. En el caso del par, al igual que en la simulación anterior, su seguimiento es correcto por parte de la máquina.

Para esta simulación se ha obtenido un valor de rms de las corrientes de fase de 4.48 A, un valor muy parecido al de la simulación con una menor velocidad. Los valores de las varianzas de las corrientes de los planos  $xy$  no sufren cambios significativos, manteniéndose entorno a 1.71 en el plano  $xy_1$ , y 1.65 en  $xy_2$ .

El parámetro que sí sufre un cambio más notable es la frecuencia de conmutación, bajando a un valor de 920 Hz.

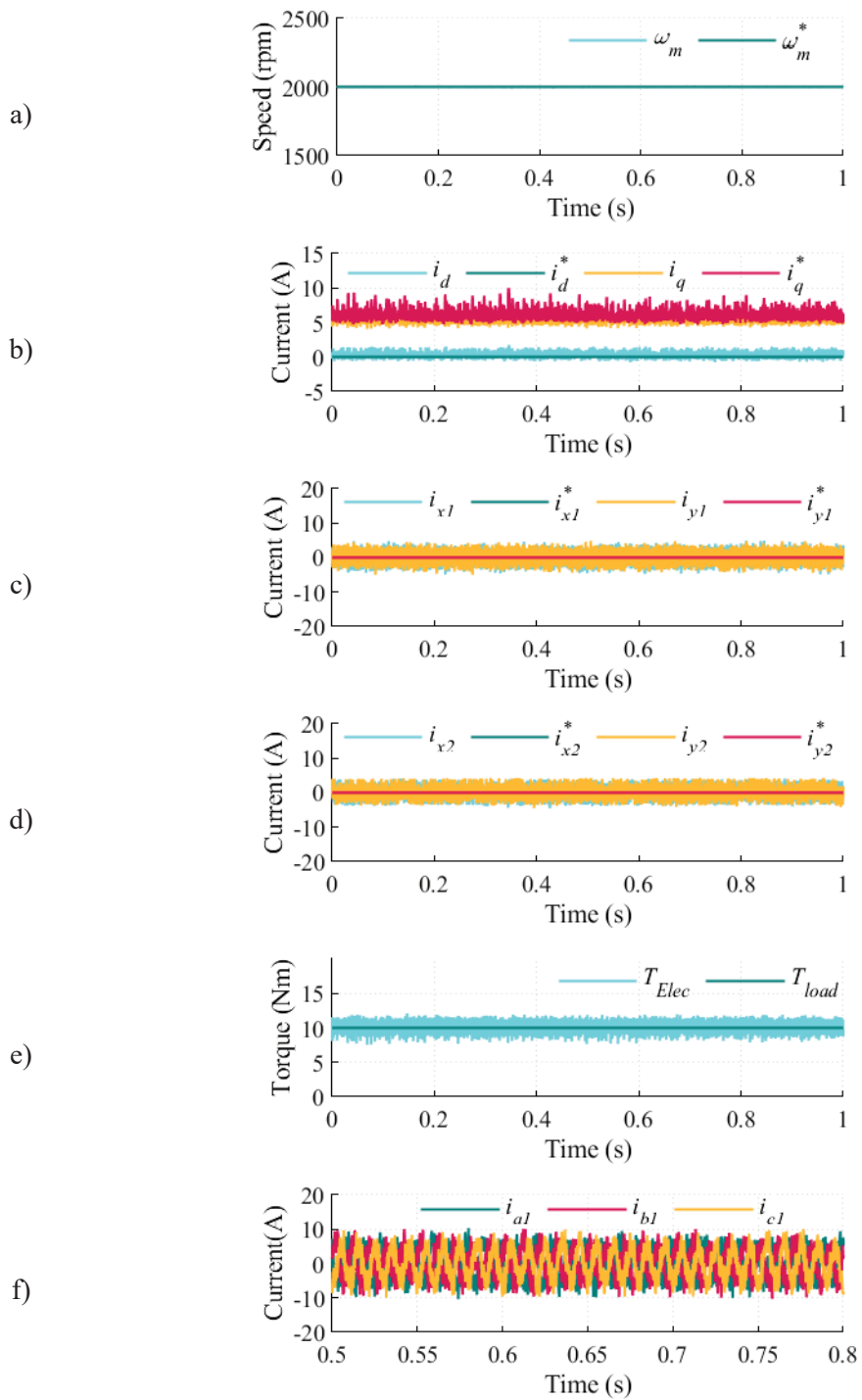


Figura 42. Simulación a alta velocidad: a) velocidad del motor; b) corrientes dq, c) corrientes xy1, d) corrientes xy2, e) par electromagnético, f) corrientes de fase en el devanado a1, b1 y c1

## 7.4. RESULTADOS SIMULACIÓN DINÁMICA

En esta última simulación, se implementará un cambio de velocidad en la máquina en medio del proceso de análisis. se llevará a cabo una transición de velocidad, aumentando de 1000 rpm a 2000 rpm. Este cambio se efectuará con el objetivo de evaluar la capacidad de la máquina para adaptarse a variaciones sustanciales en su operación.

La Figura 43a proporciona una visión detallada del seguimiento de la velocidad de la máquina durante este proceso. Se destaca que la máquina logra mantener un seguimiento adecuado de la velocidad, aunque se presentan algunas alteraciones de gran amplitud en las corrientes, tanto en el plano dq como en las corrientes de fase.

Es relevante señalar que, tras el cambio de velocidad, se observa un fenómeno similar al que se experimentó en la segunda simulación, donde las corrientes de fase muestran un aumento en la frecuencia. Al igual que en la simulación anterior, este aumento de frecuencia se debe a la velocidad de la máquina.

Además, a pesar de aplicar un cambio considerable en la velocidad de referencia, se puede observar cómo el control predictivo aplicado se desempeña de manera eficiente, ofreciendo una respuesta rápida y precisa ante cambios significativos en la velocidad y las condiciones de funcionamiento de la máquina. Estos resultados respaldan la robustez y el desempeño del sistema en un rango variable de condiciones de operación.

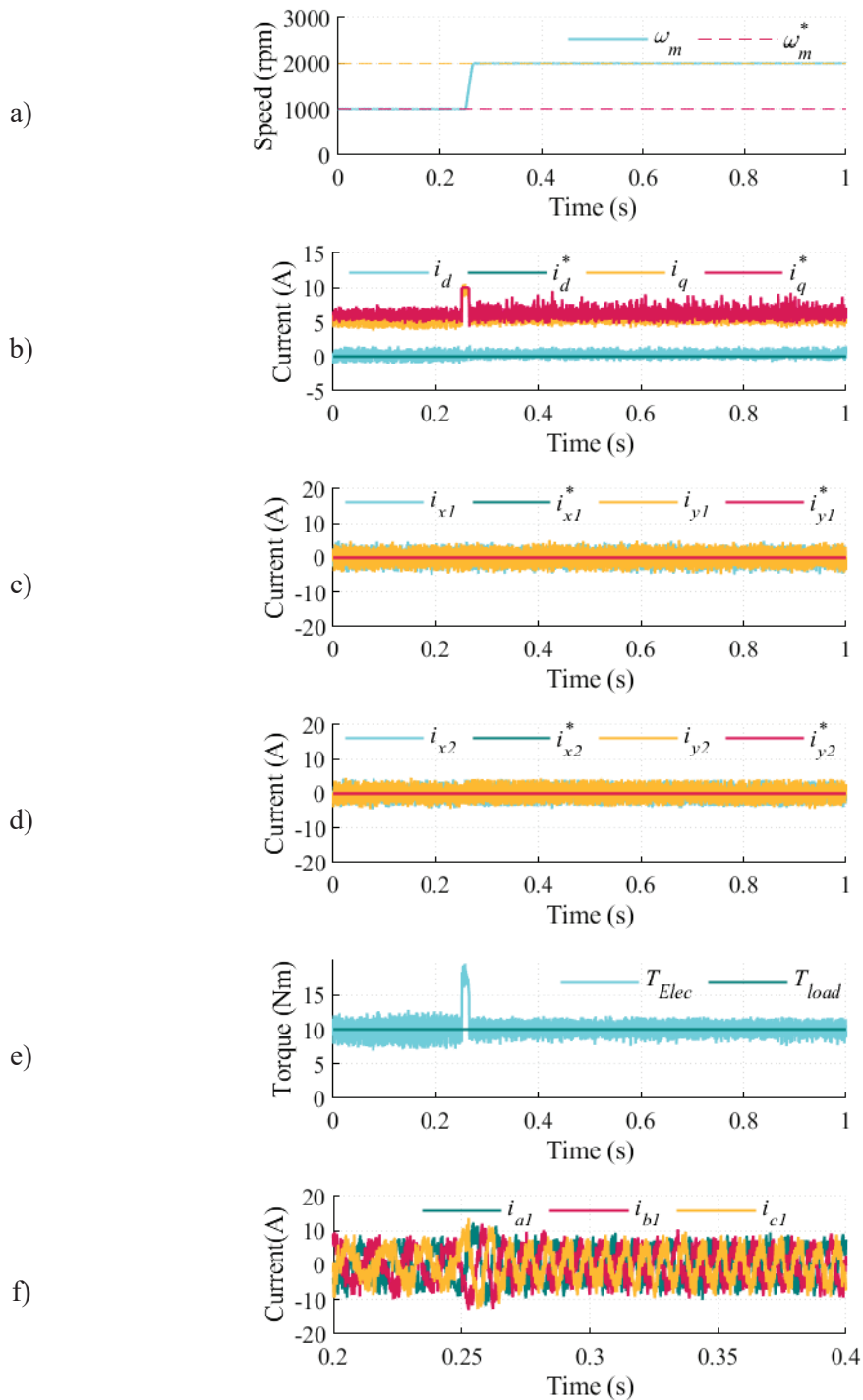


Figura 43. Simulación con cambio de velocidad: a) velocidad del motor, b) corrientes dq, c) corrientes  $xy1$ , d) corrientes  $xy2$ , e) par electromagnético, f) corrientes de fase en el devanado a1, b1 y c1

## CAPÍTULO 8 – CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

---

### 8.1. CONCLUSIONES

Uno de los motivos por los que se inició este trabajo fue el de seguir avanzando en tecnologías limpias, para poder contrarrestar el impacto medioambiental que está provocando la generación de energía. Es por ello por lo que nace la idea de este trabajo. Aprovechando las ventajas que presentan las máquinas eléctricas multifásicas con respecto a otros sistemas eléctricos, se ha estudiado la posibilidad de crear un simulador de una máquina multifásica de imanes permanentes.

Gracias a las características de las máquinas multifásicas, junto con el número de fases que tiene, hace que sea un tipo de máquina con características adecuadas para poder integrarse en un vehículo eléctrico, de forma que, si se consigue obtener unas buenas prestaciones de la máquina, existe la posibilidad de que pueda competir con otro tipo de vehículos más tradicionales, y contribuir así a la transición energética que se está realizando hoy en día.

Pasando por el estudio de cada detalle de las máquinas eléctricas y de sus diferentes tipos se ha podido comprobar cómo la máquina de imanes permanentes puede ser una buena candidata a la hora de implementarse en un vehículo eléctrico, dada la gran cantidad de flujo de potencia que presentan, además de reducir el número de componentes, puesto que el devanado del rotor es sustituido por los imanes.

Además, el hecho de que sea una máquina multifásica multiplica las posibles aplicaciones en las que se puede usar este tipo de máquina, puesto que al presentar una mejor tolerancia al fallo es posible realizar su implementación en alguna aplicación en la que se requiera un mayor grado de seguridad. Esta ventaja, junto con el menor número de pérdidas por efecto Joule que se puede conseguir, al tener un mayor número de fases, hace que este tipo de máquinas sea bastante atractivo para el sector, tanto de generación de energía como en el de transporte.

A lo largo del trabajo se han ido desarrollando todas las ecuaciones del modelo dinámico de la máquina. Además, se han estudiado técnicas como las transformadas de Clarke y de Park las cuales han ayudado a que el tratamiento de las ecuaciones de la máquina sea mucho más dinámico y simple.

Junto con el desarrollo del modelo de la máquina se ha conseguido plantear un modelo de control predictivo, que ayudará a que la máquina sea capaz de responder rápidamente ante cualquier requerimiento externo. Este modelo basado en la discretización de “*Forward Euler*”, en el que se estiman ciertos valores de la máquina, de forma que se puedan tomar las acciones de control pertinentes previniendo estados posteriores de la máquina.

## 8.2. *LÍNEAS FUTURAS*

Este Trabajo Fin de Grado se define desde el desarrollo matemático de los comportamientos físicos de una máquina de imanes permanentes hasta el desarrollo de un modelo de simulación al que se le aplica un control predictivo para a partir de ciertas necesidades se pueda obtener una respuesta correcta de la máquina. No obstante, este trabajo es solo el principio de toda una serie de desarrollos. A continuación, se detallan una serie de posibles líneas futuras de investigación:

- Implementación en sistema real experimental.
- Uso de otras técnicas de control como el control de campo orientado
- Diseño e implementación de controles predictivos a altas frecuencias
- Extensión a mayor número de fases
- Extensión a otras topologías máquina-convertidor

## REFERENCIAS

---

- [1] Unión Europea, «Comisión Europea,» [En línea]. Available: [https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change\\_es](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_es). [Último acceso: Junio 2023].
- [2] Parlamento Europeo, «Noticias Parlamento Europeo,» [En línea]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20200618STO81513/pacto-verde-europeo-clave-para-una-ue-climaticamente-neutral-y-sostenible>. [Último acceso: Junio 2023].
- [3] Vicepresidencia tercera del gobierno, «Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico,» [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/>. [Último acceso: Junio 2023].
- [4] International Energy Agency, «IEA,» [En línea]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-car-registrations-and-sales-share-in-china-united-states-and-europe-2018-2022>. [Último acceso: Junio 2023].
- [5] H. O. Neubauer, Die Chronik des Automobils, Chronik Verlag, 1994.
- [6] TESLA, «TESLA,» [En línea]. Available: [https://www.tesla.com/es\\_es](https://www.tesla.com/es_es). [Último acceso: Julio 2023].
- [7] AUDI, [En línea]. Available: <https://www.audi.es/es/web/es/electromovilidad/tecnologias-electricas/e-tron.html>. [Último acceso: Julio 2023].
- [8] Toyota, [En línea]. Available: <https://www.toyota.es/>. [Último acceso: Julio 2023].
- [9] Elsevier, «ScienceDirect,» [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/extended-range-electric-vehicle>. [Último acceso: Julio 2023].
- [10] MAHLE, [En línea]. Available: <https://www.mahle.com/en/news-and-press/press-releases/mahle-is-ready-for-the-hydrogen-engine-99200>. [Último acceso: Julio 2023].
- [11] Electrical Testing Group, «INDUCOR,» [En línea]. Available: <https://www.inducor.com.ar/academicos/calculo-de-maquinas-electricas/maquinas-electricas-apendice20.html>. [Último acceso: Julio 2023].
- [12] Universidad de Málaga, *Apuntes de la asignatura Máquinas 1*, 2022.
- [13] J. F. Mora, Máquinas Eléctricas, Garceta.

- [14] RENAME, «Reconstructora Nacional de Motores Eléctricos,» [En línea]. Available: <https://renamecr.com/index.php/2020/09/24/el-rotor-de-jaula-de-ardilla/>. [Último acceso: Agosto 2023].
- [15] Á. G. Prieto, J. J. A. Gallardo, I. G. Prieto y M. J. D. Martínez, ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS, Fundamentos, control y aplicaciones, Ediciones Paraninfo, 2022.
- [16] J. G. Webster, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering.
- [17] I. Castillo, Universidad Tecnológica de Panamá, [En línea]. Available: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/prisma/article/view/418/html>. [Último acceso: Julio 2023].
- [18] Á. G. Prieto, J. J. A. Gallardo, I. G. Prieto y M. J. D. Martínez, «The evolution of model predictive control in multiphase electric drives,» *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2022.
- [19] I. Zoric, M. Jones y E. Levi, «Vector Space Decomposition Algorithm for Asymmetrical Multiphase Machines,» 2017.
- [20] Y. L. N. Z. S. K. Bin Wu, Power Conversion and Control of Wind Energy System, JOHN WILEY & SONS, INC, 2011.