



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

| **uma.es**



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Área de Ingeniería Eléctrica

TRABAJO DE FIN DE GRADO

HORIZONTE EXTENDIDO DE PREDICCIÓN PARA EL CONTROL MULTIVECTORIAL DE ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS MULTIFÁSICOS

Autor: Jorge Montenegro Navarro

Tutor: Ignacio González Prieto

Cotutor: Ángel González Prieto

Titulación: Grado en Ingeniería Electrónica

MÁLAGA, septiembre de 2023



ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	5
PALABRAS CLAVE	6
ABSTRACT.....	7
KEYWORDS.....	8
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. ANTECEDENTES DE LOS ACCIONAMIENTOS MULTIFÁSICOS.	9
1.2. OBJETIVO.....	11
CAPÍTULO 2: VEHÍCULOS ELÉCTRICOS DE COMPETICIÓN.....	12
2.1. CONTEXTO HISTÓRICO.....	12
2.2. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS.	12
CAPÍTULO 3: MÁQUINAS MULTIFÁSICAS	20
3.1. INTRODUCCIÓN.....	20
3.2. TOPOLOGÍA.....	20
3.3. CARACTERÍSTICAS.....	21
3.4. APLICACIONES.....	22
3.5. CONVERTIDOR ELECTRÓNICO DE POTENCIA.	24
CAPÍTULO 4. MODELADO MATEMÁTICO DE LOS ACCIONAMIENTOS MULTIFÁSICOS.....	25
4.1. INTRODUCCIÓN.....	25
4.2. CASO TRIFÁSICO.....	25
4.2.1. TRANSFORMADA DE CLARKE ($abc/\alpha\beta$).	25
4.2.2. TRANSFORMADA DE PARK ($\alpha\beta/dq$).....	27



4.3.	CASO HEXAFÁSICO.....	28
4.4.	MODELO DE LA MÁQUINA MULTIFÁSICA.....	29
4.5.	MODELO DEL CONVERTIDOR DE TENSIÓN.....	30
CAPÍTULO 5: CONTROL DE LAS MÁQUINAS MULTIFÁSICAS.....		33
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	33
5.2.	EVOLUCIÓN DE LOS CONTROLADORES.....	33
5.2.1.	CONTROL PREDICTIVO ESTÁNDAR (MPC).....	33
5.2.2.	CONTROL PREDICTIVO CON VECTORES VIRTUALES (VV-MPC).....	37
5.3.	ESQUEMA DE CONTROL PROPUESTO.....	38
5.3.1.	CONTROL PREDICTIVO MULTIVECTORIAL (MV5-MPC).....	38
5.3.2.	CONTROL PREDICTIVO CON HORIZONTE EXTENDIDO.....	41
CAPÍTULO 6: RESULTADOS DE SIMULACIÓN		45
6.1.	INTRODUCCIÓN.....	45
6.2.	SIMULADOR.....	45
6.2.1.	CONTROL.....	46
6.2.2.	CONVERTIDOR DE TENSIÓN.....	47
6.2.3.	MÁQUINA DE INDUCCIÓN DE 6 FASES.....	47
6.3.	RESULTADOS.....	48
6.3.1.	TEST 1: ANÁLISIS DE LA CALIDAD Y SEGUIMIENTO DE LAS CORRIENTES.....	48
6.3.2.	TEST 2: ANÁLISIS DINÁMICO DEL CONTROL.....	50
CAPÍTULO 7 – RESULTADOS EXPERIMENTALES		55
7.1.	INTRODUCCIÓN.....	55
7.2.	ELEMENTOS DE LA BANCADA.....	55
7.3.	RESULTADOS.....	61
7.3.1.	TEST 1: ANÁLISIS DE LA CALIDAD Y SEGUIMIENTO DE LAS CORRIENTES.....	61
7.3.2.	TEST 2: ANÁLISIS DINÁMICO DEL CONTROL.....	63
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....		66
8.1.	CONCLUSIONES.....	66
8.2.	LÍNEAS FUTURAS.....	66
REFERENCIAS.....		68



RESUMEN

En la última década se están realizando importantes esfuerzos de cara a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero con el objetivo de alcanzar un desarrollo sostenible. Dentro de este escenario, los vehículos eléctricos están adquiriendo una gran importancia al ofrecer una alternativa eficiente y no contaminante a los tradicionales vehículos de combustión. De entre los sistemas de propulsión disponibles para los vehículos eléctricos, los accionamientos eléctricos multifásicos se posicionan como una opción a considerar gracias a las ventajas que estos nuevos sistemas de propulsión presentan frente a los sistemas convencionales. Entre estas ventajas puede destacarse su mayor eficiencia o mejor tolerancia al fallo.

Tal es la importancia del uso de máquinas eléctricas multifásicas en vehículos eléctricos que su uso se está extendiendo incluso al campo de los vehículos de competición, como la Fórmula E, de la Federación Internacional del Automóvil (FIA). En este campo, las máquinas eléctricas multifásicas son especialmente apropiadas por las propias exigencias de competición en términos de potencia, rendimiento y fiabilidad.

Tradicionalmente, para regular estas máquinas han existido una gran variedad de esquemas de control, siendo uno de los más empleados el control de campo orientado (FOC, por sus siglas en inglés *Field-Oriented Control*) gracias a su gran calidad de corrientes y robustez. A pesar de esto, en la actualidad existe un gran número de grupos de investigación que trabajan en el desarrollo de sistemas de control de altas prestaciones que puedan competir con el tradicional FOC, empleando algunos de ellos modelos de predicción para el control. Este tipo de control, denominado control predictivo (MPC, por sus siglas en inglés *Model Predictive Control*), parte de un modelo discretizado de la máquina, el cual se emplea para predecir sus estados futuros de corrientes. De entre las ventajas de este tipo de control frente al resto de técnicas de regulación destacan su mejor respuesta dinámica o su gran capacidad para incluir restricciones en el control.



En el presente Trabajo de Fin de Grado se propone implementar una variante del control predictivo estándar con horizonte de predicción extendido, empleando adicionalmente una solución multivectorial compuesta por vectores virtuales de tensión. Por un lado, al añadir un horizonte de predicción adicional se espera mejorar la respuesta dinámica de la máquina, el seguimiento de las variables de referencia del sistema y el rizado de las corrientes. Mientras que, por su parte, los vectores virtuales permiten asegurar una inyección reducida de corrientes x - y , lo que se espera que permita mejorar la calidad de las corrientes de fase y reducir las pérdidas medias del sistema.

PALABRAS CLAVE

Accionamientos multifásicos, control predictivo con horizonte extendido, control predictivo con vectores virtuales, control predictivo multivectorial, máquina de inducción, modelo de control predictivo, vehículos eléctricos de competición.



ABSTRACT

In the last decade, significant efforts have been made to reduce greenhouse gas emissions in order to achieve sustainable development. Within this scenario, electric vehicles have gained great importance by offering an efficient and environmentally friendly alternative to traditional combustion vehicles. Among the available propulsion systems for electric vehicles, multiphase electric drives are considered as an option to take into account due to their high reliability and power capabilities. This is possible thanks to their inherent features, such as natural fault tolerance and good current distribution among phases.

The use of multiphase electric drives in electric vehicles is so important that they have been extended to competitive racing, such as Formula E, by the International Automobile Federation (FIA). In this field, multiphase electric drives are particularly suitable due to the demanding requirements of competition, such as power, efficiency, and reliability.

Traditionally, a wide variety of control schemes have been used to regulate these drives. Among these control schemes, one of the most well-known is the Field-Oriented Control (FOC) due to its high current quality. However, nowadays there are many research groups working on the development of high-performance control systems using predictive models that can compete with the traditional FOC. This type of control, known as Model Predictive Control (MPC), makes use of a discretized model of the machine that is used to predict the future states of it. Furthermore, this control scheme offers some advantages over conventional controllers as it provides a better dynamic response and the ability to incorporate restrictions into the control strategy.

In this Final Degree Project, a variant of the standard Model Predictive Control with an extended prediction horizon, specifically three horizons, and virtual voltage vectors is proposed. The use of an additional prediction horizon is expected to improve the dynamic response of the machine, the tracking of reference variables, and reduce current ripple. Whereas, on the other hand, virtual voltage vectors are expected to reduce the injection of x - y currents, enhancing the quality of phase currents and reducing the average system losses.



KEYWORDS

Electric competition vehicles, induction machine, model predictive control, multiphase drives, multistep predictive control, virtual vector predictive control.



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes de los accionamientos multifásicos.

Desde hace más de 60 años [1], el cambio climático lleva siendo uno de los mayores desafíos a los que se ha enfrentado la sociedad. En el año 1910, el científico sueco Svante Arrhenius realizó estudios sobre la influencia de la actividad humana en el clima terrestre [2]. En este trabajo, se llegó a la conclusión de que los combustibles fósiles podrían dar lugar a un aumento de la temperatura media terrestre debido, principalmente, a la emisión masiva de gases de efecto invernadero a la atmósfera. A lo largo del siglo XX, la actividad humana ha provocado un aumento significativo en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, provocando, como consecuencia, un aumento de la temperatura media del planeta. Esto ha desembocado en una serie de cambios en el clima, como la desertificación de selvas y bosques, o el deshielo en los casquetes polares [3].

Como respuesta al cambio climático, en 1988, se formó el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) [4], dedicado al análisis de las causas, repercusiones y posibles actuaciones frente al cambio climático. Posteriormente, en 1994, de cara a abordar este problema se creó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [5], en la que tres años más tarde se produjo uno de los eventos históricos más reseñables relacionado con el cambio climático, la firma del Protocolo de Kyoto. El objetivo de este tratado era reducir un 5% las emisiones de gases de efecto invernadero en 2008 respecto a las de 1990. Sin embargo, algunos países no llegaron a cumplir con los objetivos de emisiones, lo que supuso que los esfuerzos para combatir el cambio climático fueran insuficientes [6]. Años más tarde, como medida para reforzar estas acciones, en 2016 se firmó el Protocolo de París [7], en el que se estableció un objetivo mundial de limitar el aumento de la temperatura global a menos de 2 °C por encima de los niveles preindustriales. Para conseguir esto, todos los países acogidos a este protocolo deben reducir las emisiones de gases de efecto invernadero antes de finales del siglo XXI, para conseguir así un clima neutro.

De cara a abordar el cambio climático, uno de los principales puntos que se deben tener en cuenta son sus causas. De entre todas las causas expuestas en [4], una de las que afecta en mayor medida al cambio climático es el uso de vehículos de combustión interna como principal medio desplazamiento. Según [8], el transporte de persona y mercancías supone una tercera parte de las emisiones al medio ambiente. En este contexto, los vehículos eléctricos se presentan como una solución sostenible y eficiente para reducir la huella de carbono.

Es tal el interés que a día de hoy suscitan los vehículos eléctricos que se está promoviendo el desarrollo de accionamientos eléctricos cada vez más sofisticados [9], [10]. En este sentido, el uso de máquinas eléctricas multifásicas, las cuales fueron descubiertas en la década de los setenta [11], se presentan como una solución prometedora para tal fin. Estas máquinas se caracterizan por poseer más de tres fases estáticas, lo que les brinda una serie de ventajas frente a las máquinas trifásicas convencionales. Entre estas ventajas destacan una mejor distribución de potencia por fase, lo que les permite soportar mayores corrientes para una potencia determinada. Además, estas máquinas cuentan con una menor fluctuación del par y mayor número de grados de libertad adicionales, lo que les permite desarrollar tolerancia ante fallos.

La gran variedad de aplicaciones en las que las máquinas eléctricas multifásicas resultan de utilidad ha despertado un gran interés en la comunidad científica y tecnológica debido a sus ventajas en términos de eficiencia y robustez. Esto ha llevado a que diversos grupos de investigación se encuentren trabajando en el desarrollo de esquemas de control cada vez más eficientes y precisos para estas máquinas. De entre la gran variedad de controles en investigación, el control predictivo (MPC, por sus siglas en inglés *Model Predictive Control*) se está posicionando como uno de los que cuentan con mayor proyección [7], [12] debido a su rápida respuesta dinámica y flexibilidad a la hora de incluir restricciones en el control. Esta técnica de regulación basa su funcionamiento en predecir el comportamiento del sistema, utilizando para ello un modelo discretizado de la máquina.

Tales son los avances en el control de máquinas eléctricas y las prestaciones que ofrecen los vehículos eléctricos que, en 2014, se comenzó a usar en vehículos de competición de Fórmula 1 Eléctrica, también conocida como Fórmula E [13], de la Federación Internacional del Automóvil (FIA). Dadas las propias exigencias de este tipo de competiciones, las máquinas eléctricas multifásicas junto al control predictivo se posicionan como una gran opción de uso en términos de potencia, rendimiento y fiabilidad. Por contraparte, para su correcta integración en el campo de la Fórmula E es necesario solventar los problemas con los que históricamente ha contado el control predictivo, como son la pobre calidad de corrientes o el seguimiento de las corrientes a controlar [7].

1.2. Objetivo.

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como doble objetivo mejorar la velocidad de respuesta, así como minimizar el error en el seguimiento de las variables de control de un accionamiento multifásico. Para ello se desarrollará un control predictivo con horizonte de predicción extendido, empleando adicionalmente vectores virtuales de tensión como acciones de control. Gracias a la implementación de un mayor horizonte de predicción, se espera mejorar su respuesta ante cambios de velocidad, el seguimiento de las variables de referencia del sistema y el rizado de las corrientes de la máquina. Además, se espera que el empleo de vectores virtuales de tensión asegure una inyección reducida de armónicos de bajo orden, contribuyendo así a mejorar la calidad de las corrientes de fase y reducir las pérdidas medias del sistema.

Una vez desarrollado el esquema de control propuesto, se validará su comportamiento en el entorno software *MATLAB/Simulink* para obtener una respuesta preliminar a la de un sistema real. Adicionalmente, se realizarán experimentos en un sistema real para comprobar la operación del control, para lo que se empleará la bancada experimental del laboratorio 3507LII del grupo de investigación ACE-TI de la Escuela de Ingenierías Industriales (Universidad de Málaga).

Además del objetivo principal, durante el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado, se plantean una serie de objetivos transversales que también se espera alcanzar:

- Actualización del estado del arte del control predictivo (FCS-MPC).
- Estudio de las características y últimos avances en el área de los vehículos eléctricos de competición.
- Adquisición de competencias en la simulación de sistemas reales.
- Adquisición de competencias en el control de sistemas en tiempo real.
- Adquisición de competencias en el análisis crítico de resultados simulados y experimentales.

CAPÍTULO 2: VEHÍCULOS ELÉCTRICOS DE COMPETICIÓN

2.1. CONTEXTO HISTÓRICO.

Un vehículo eléctrico [7] se define como aquel que utiliza la energía eléctrica como fuente de propulsión para moverse, tanto de forma autónoma como en combinación con combustibles fósiles. Dentro de este escenario, un vehículo de Fórmula 1 Eléctrica o Fórmula E es un tipo de vehículo eléctrico diseñado específicamente para participar en competiciones organizadas por la FIA [14]. A diferencia de los vehículos eléctricos convencionales destinados al transporte, los vehículos de Fórmula E están diseñados para alcanzar velocidades superiores a los 300 km/h [15] con unos requerimientos más exigentes en cuanto a maniobrabilidad, rendimiento y tiempos de respuesta [14]. Aunque en la actualidad la Fórmula E está experimentando un renovado interés, sus orígenes se remontan una década atrás.

En torno al año 2011, el empresario español Alejandro Agag y Jean Todt [13], el entonces presidente de la FIA, anunciaron la creación de una nueva serie de competiciones de vehículos eléctricos. El objetivo de estas competiciones era fomentar el desarrollo de estas tecnologías y demostrar que los vehículos eléctricos suponen una alternativa real para el transporte [13], [15]. Posteriormente, en el año 2014 la Fórmula E realizó su primer debut en el Circuito del Parque Olímpico de Pekín, China, lo que supuso un cambio de paradigma en las competiciones de vehículos.

2.2. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS.

En cualquier vehículo eléctrico, así como en los de Fórmula E, se pueden diferenciar cinco partes: el cargador junto al convertidor AC/DC, la batería, el convertidor electrónico de potencia, la máquina eléctrica y el sistema de control. La topología de un vehículo de Fórmula E [16] empleando una máquina eléctrica multifásica para su tracción se muestra en la *Figura 1*.

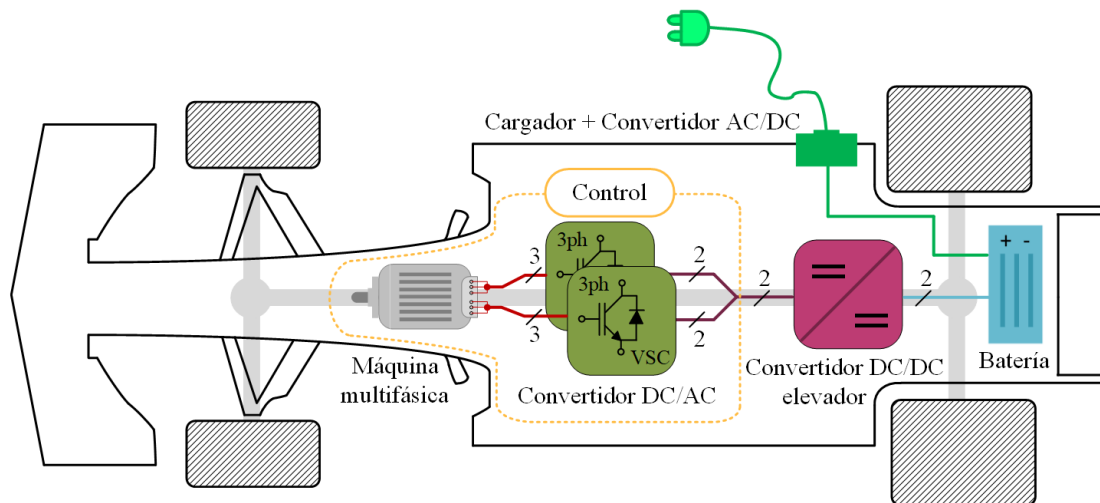


Figura 1 - Topología de un vehículo de Fórmula E

- **ESTACIÓN DE CARGA.**

Este es uno de los componentes esenciales del vehículo que permite conectarlo a la red con el fin de suministrar energía eléctrica a la batería del vehículo y permitir su recarga. Internamente, está compuesto por una base de carga estandarizada, que según [12] puede ser de tipo *CHAdeMO*, *Yazaki*, *Mennekes* o *Schuko* junto a un convertidor de corriente alterna a continua, también conocido como rectificador para almacenar energía eléctrica en la batería. Según [17], los sistemas de carga pueden variar desde los más básicos que se conectan a la red eléctrica por medio de una base de carga hasta los sistemas más avanzados que utilizan tecnologías como la carga inalámbrica.

Recientemente la compañía ABB [18], socio de la Fórmula E, ha realizado aportaciones en este ámbito con el diseño de un cargador destinado a vehículos de Fórmula E. Este es capaz de entregar una potencia de 160 kW si se conecta un único vehículo o 80 kW, en el caso de que se requiera cargar dos vehículos simultáneamente. Esta característica permite reducir significativamente la huella de carbono del cargador ya que no es necesario tener una unidad por vehículo. El esquema de dicho cargador se muestra en la *Figura 2*.

ABB Formula E Race charger

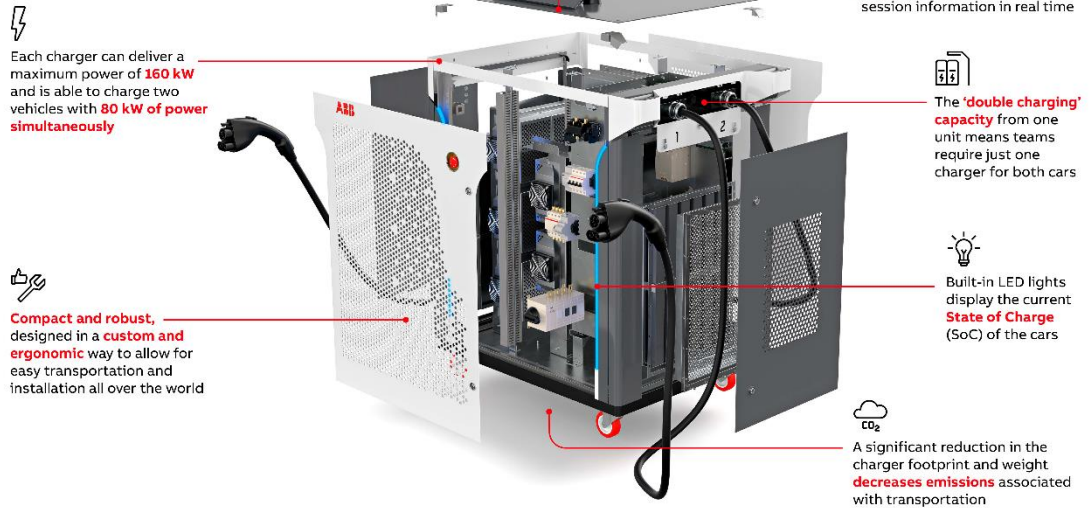


Figura 2 - Diseño de un cargador de Fórmula E [18]

- **BATERÍA.**

Este elemento tiene una doble funcionalidad. Por un lado, cuando el vehículo se encuentra parado en carga, se encarga de almacenar la energía eléctrica necesaria para la propulsión del vehículo. Por otro lado, cuando el vehículo se encuentra en funcionamiento, entrega la energía necesaria a la máquina eléctrica para su correcto funcionamiento. Los tres principales tipos de baterías empleadas en vehículos eléctricos son [19].

- Baterías de plomo-ácido: Cuenta con un bajo coste y un reducido número de ciclos de carga.
- Baterías de níquel-hidruro metálico: Cuentan con un precio algo superior a la anterior y una vida útil mayor, en torno a los 1000 o 2000 ciclos de carga, lo que las convierte en una gran opción para vehículos eléctricos convencionales.
- Baterías de ion-litio: Estas tienen una vida útil superior a las anteriores con un número de ciclos de carga cercano a los 7000 y cuentan con la mejor proporción capacidad-peso [19], lo que las convierte en una gran opción para los vehículos de Fórmula E, donde el peso tiene gran relevancia. Sin embargo, hay que tener en cuenta que estas requieren de un sistema de control de la batería (BMS, por sus siglas en inglés *Battery Management System*) dado que estas baterías tienden a degradarse e inflamarse a altas temperaturas.

En el ámbito de la Fórmula E, uno de los principales fabricantes de baterías es McLaren [20], el cual ya ha realizado baterías para diferentes generaciones de vehículos. Algunos valores orientativos [21], [22] de las características de estas baterías para el caso de la segunda generación son los que se muestran en la *Tabla 1*, mientras que en la *Figura 3* se muestra dicha batería.

Generación 2 – Mc Laren	
Tipo	Ión-Litio
Tensión de alimentación	900 V
Capacidad de la batería	54 kWh
Potencia de la batería	600 kW

Tabla 1 - Características de la batería de segunda generación de McLaren



Figura 3 - Batería de segunda generación de McLaren [23]

Finalmente, de forma interna la batería de segunda generación de McLaren está compuesta por varias celdas de batería intercaladas con placas de refrigeración [23]. Esto permite que la temperatura de las celdas no sea ni demasiado baja, lo que reduciría la eficiencia de la misma, ni demasiado elevada, lo que provocaría una inflamación de la batería. Por último, estas baterías están gestionadas por un sistema BMS que monitoriza las temperaturas y tensiones de la batería para evitar fallos en las mismas. En la *Figura 4*, se muestra un esquema de la composición interna de la batería anteriormente citada.

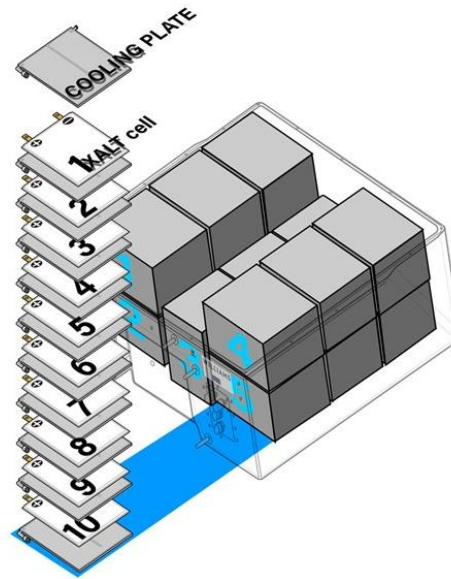


Figura 4 - Composición interna de la batería de segunda generación de McLaren [23]

- **CONVERTIDOR ELECTRÓNICO DE POTENCIA.**

Este es un componente clave del sistema del accionamiento eléctrico, cuya principal función es la de actuar sobre la máquina eléctrica adaptando la tensión que recibe de entrada a las condiciones de salida requeridas. Se trata de un elemento altamente versátil al contar con diversos modos de funcionamiento. Puede por ejemplo transformar corriente continua en corriente alterna, proporcionando a la salida una señal con amplitud y frecuencia variable. Se dice en este caso que el convertidor está funcionando como inversor. También es posible proporcionar un nivel de tensión continua específico a partir de una señal de tensión alterna dada, en cuyo caso, el convertidor actuaría como rectificador. Esta característica es la que permite que dicho convertidor sea adecuado tanto para controlar la máquina eléctrica como, en algunos casos, para cargar la batería del vehículo [7].

Dentro del ámbito de la Fórmula E, la topología usada [23] para el convertidor de continua-alterna (VSC, por sus siglas en inglés *Voltage Source Converter*) se muestra en la *Figura 5*, donde se aprecia que internamente está formada por una placa con los dispositivos de potencia junto a una placa de refrigeración para evacuar el calor generado por los semiconductores. El comportamiento de estos semiconductores es regulado por medio de una etapa de control.

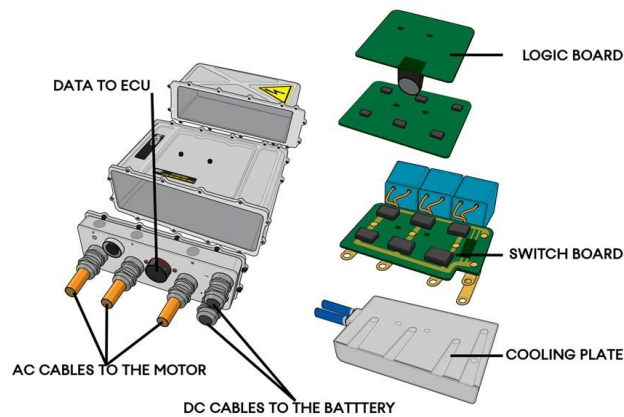


Figura 5 - Topología del convertidor continua-alterna [23]

Una de las compañías que más está apostando por los convertidores electrónicos de potencia aplicados a la Fórmula E es Audi, con su modelo “Audi MGU05” [24], que está formado por una topología convertidor continua-continua elevador en serie con un convertidor continua-alterna como el expuesto en la *Figura 1*. Dicho convertidor se muestra en la *Figura 6*, mientras que sus características [24] se recogen en la *Tabla 2*.

Audi MGU05	
Peso	< 35 kg
Número de fases	6
Eficiencia	97%
Velocidad rotórica	20000 rpm

Tabla 2 - Características del convertidor electrónico de potencia "Audi MGU05"

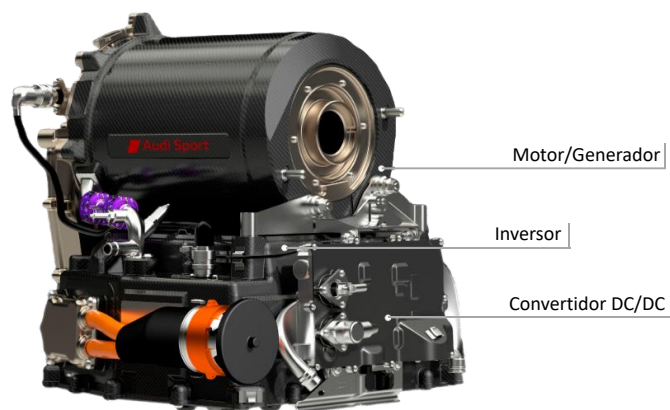


Figura 6 – Máquina eléctrica junto al convertidor electrónico de potencia "Audi MGU05" [24]

- **MÁQUINA ELÉCTRICA.**

Este elemento es el encargado de transformar la energía eléctrica en energía mecánica o viceversa. Así, gracias al principio de reversibilidad electromagnética [25] la máquina eléctrica puede funcionar como motor o como generador. Las máquinas eléctricas se componen de dos partes principales, que reciben el nombre de estátor y rotor. Por una parte, al trabajar como motor, el estátor es la parte de la máquina que se alimenta de la red o, en el caso de un vehículo eléctrico, de su batería y genera el campo magnético inductor. Por otra parte, el rotor es la parte móvil y su función consiste en mover el eje de la máquina a partir del campo magnético generado por el estátor. Sin embargo, al trabajar como generador los papeles de inductor-inducido se intercambian entre rotor y estátor. En función del tipo de corriente utilizada para alimentar el estátor, las máquinas eléctricas pueden clasificarse en dos tipos [25]: las de corriente continua y las de corriente alterna. Estas últimas se pueden clasificar a su vez en otras dos categorías: las síncronas, que frecuentemente son de imanes permanentes (PMSM, por sus siglas en inglés *Permanent Magnet Synchronous Machine*) y las asíncronas o de inducción (IM, por sus siglas en inglés *Induction Machine*). Las máquinas síncronas son aquellas en las que la frecuencia de giro del rotor coincide con la frecuencia de la corriente que alimenta al estátor mientras que, en el caso de que estos parámetros no coincidan, se tienen máquinas asíncronas.

A la hora de elegir el tipo de motor para un vehículo se tienen en cuenta diversos factores como son la potencia, rendimiento, limitaciones del vehículo o el precio, entre otros [26]. Actualmente, de los tres tipos de motores mencionados anteriormente, los de corriente continua han quedado relegados a un segundo plano debido a su baja fiabilidad y constante mantenimiento de las escobillas, mientras que los más usados en automoción son los asíncronos o de inducción y los síncronos de imanes permanentes [7]. Dado que vehículos eléctricos de competición de Fórmula E, como la serie “Audi E-Tron FE” o del rally de Dakar, como la serie “Audi RS Q-E-Tron” incorporan máquinas de inducción para su tracción, esta será la utilizada para el desarrollo del presente TFG.

Las máquinas asíncronas o de inducción son aquellas que se caracterizan porque la velocidad de giro del rotor difiere de la velocidad de giro del campo magnético en el entrehierro y destacan por su gran fiabilidad, robustez, bajo coste y mantenimiento. El principio de funcionamiento de estas máquinas se basa en la generación de un campo magnético rotatorio en el entrehierro de la máquina por parte del estátor, de acuerdo con el Teorema de Ferraris. Este campo magnético variable en el tiempo inducirá una fuerza electromotriz en el rotor de la máquina, de acuerdo con la ley de Faraday. En dichas máquinas, como el rotor está comúnmente formado por una serie de barras

cortocircuitadas entre sí (véase la *Figura 7*), según la ley de Lorentz esto genera unas fuerzas de sentido contrario que permite el giro del rotor.

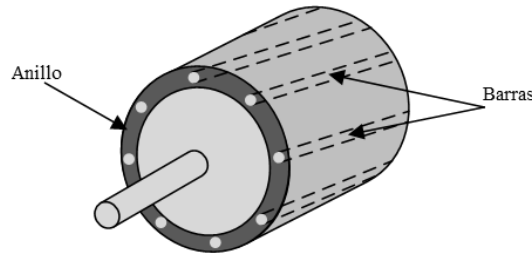


Figura 7 - Esquema del rotor en jaula de ardilla de una máquina asíncrona [27]

La búsqueda de accionamientos eléctricos cada vez más competitivos y que cuenten con mejores prestaciones ha propiciado el desarrollo de sofisticadas máquinas eléctricas, como las denominadas máquinas multifásicas que cuentan con notables ventajas frente a las máquinas asíncronas trifásicas convencional, lo cual se tratará con mayor profundidad en el Capítulo 3.

- **SISTEMA DE CONTROL.**

El sistema de control se compone de dos partes: una tangible y otra intangible. La parte tangible se denomina *hardware* y está formada tanto por el controlador del accionamiento como por los diferentes sensores que conforman el sistema de medición. Este se encarga de captar las variables a emplear en el control. Dentro de la parte intangible, denominada *software*, se encuentra el algoritmo de control, cuya finalidad es proporcionar los estados de conmutación óptimos al inversor en función de las variables medidas por los sensores. Un esquema del sistema de control se muestra en la *Figura 8*.

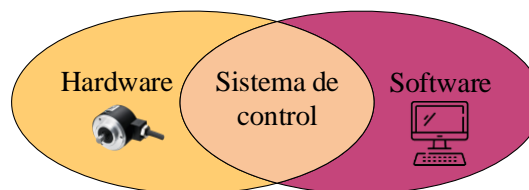


Figura 8 - Esquema del sistema de control

CAPÍTULO 3: MÁQUINAS MULTIFÁSICAS

3.1. INTRODUCCIÓN.

Las máquinas eléctricas multifásicas son aquellas que cuentan con más de tres fases en su devanado estático. Sus orígenes se remontan al año 1969 [11], cuando se propuso el primer inversor diseñado para actuar sobre una máquina eléctrica de cinco fases. Sin embargo, este tipo de máquinas no contó con gran apoyo de la comunidad científica e investigadora debido a la complejidad de su control, así como al desarrollo de etapas de modulación que mejoraron de manera considerable las prestaciones proporcionadas por las máquinas trifásicas convencionales [11]. En la actualidad, gracias a los recientes avances en el campo de los procesadores digitales de señal (DSP, por sus siglas en inglés Digital Signal Processor), así como de la electrónica de potencia ha propiciado que el uso de las máquinas eléctricas multifásicas se extienda a diversas aplicaciones [7].

3.2. TOPOLOGÍA.

Las máquinas eléctricas multifásicas pueden obtenerse mediante la incorporación de devanados adicionales a una máquina trifásica, modificando el conexionado entre estos. Sin embargo, al rediseñar una máquina para convertirla en multifásica, se deben tener en cuenta limitaciones físicas como las dimensiones del estátor de la máquina.

Dependiendo de la topología del rotor, las máquinas eléctricas multifásicas pueden clasificarse en dos tipos: las de inducción y las síncronas, que frecuentemente son de imanes permanentes. Por un lado, las máquinas eléctricas multifásicas de inducción requieren poco mantenimiento y cuentan con una construcción robusta, y una tecnología estudiada en profundidad, lo que aumenta la fiabilidad de estas [11]. Por otro lado, las máquinas eléctricas multifásicas síncronas de imanes permanentes proporcionan una mayor densidad de corriente [11].

Atendiendo a la distribución de los devanados de las máquinas eléctricas, estas pueden contar con distribución asimétrica, cuando los devanados no están desfasados el mismo ángulo (véase la *Figura 9a*), distribución simétrica, cuyos devanados cuentan con el mismo ángulo de desplazamiento entre fases (véase la *Figura 9b*) o ser coincidente en el caso de que los devanados no estén desfasados entre sí (véase la *Figura 9c*).

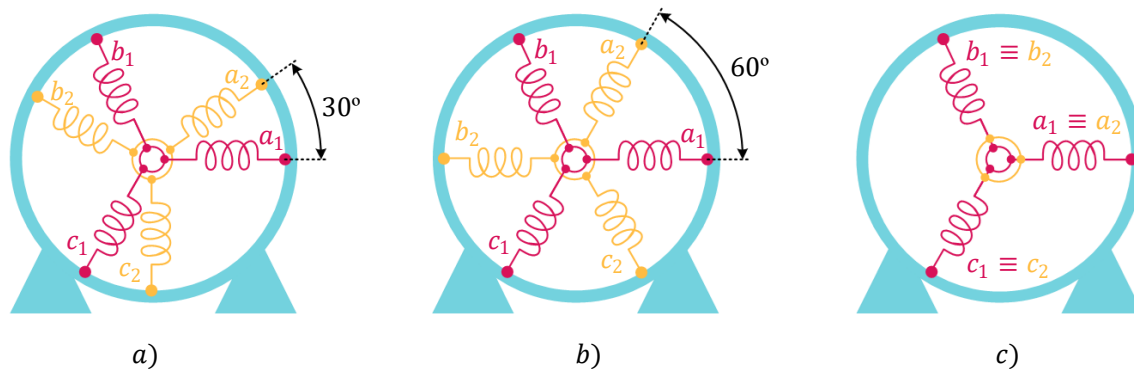


Figura 9 - Configuraciones de devanados de una máquina hexafásica

En la actualidad, aquellas máquinas multifásicas que cuentan con múltiples devanados trifásicos, como son las máquinas de seis, nueve y doce fases están siendo especialmente objeto de investigación [8] dado que permiten reutilizar en gran medida la tecnología trifásica. Una topología que ha sido ampliamente utilizada es la máquina de inducción de doble devanado trifásico asimétrico, mostrada en la *Figura 9a*) [8]. Dicha topología cuenta con un par de devanados trifásicos desfasados 30° entre sí y con sus neutros aislados, accionada desde dos convertidores de tensión trifásicos de dos niveles. Este último tipo de máquina ha sido la seleccionada para el estudio del control propuesto en el presente Trabajo de Fin de Grado.

3.3. CARACTERÍSTICAS.

Las máquinas multifásicas cuentan con una serie de ventajas respecto a las máquinas trifásicas convencionales que las hacen posicionarse como una alternativa real en aquellas aplicaciones donde la fiabilidad y la robustez sean primordiales [7]. En primer lugar, estas máquinas cuentan con tolerancia al fallo, lo que les permite seguir operando incluso en situaciones de post-falta originadas tanto en la propia máquina o como en el convertidor. Además, dado que se distribuye la potencia en un mayor número de fases, se reducen las corrientes del estátor por fase para una misma tensión y potencia total, lo que reduce las pérdidas de la máquina y mejora su eficiencia. En cuanto al par, el uso de estas máquinas disminuye su rizado y aumenta su producción. Finalmente, las máquinas multifásicas también ofrecen un mayor número de grados de libertad en comparación con las máquinas de tres fases, lo que las hace más flexibles y

adaptables a un amplio abanico de aplicaciones. Es por ello que, en competiciones tan exigentes, como es el caso de la Formula E, estas máquinas están siendo cada vez más empleadas por diferentes equipos de competición.

3.4. APLICACIONES.

Como se ha comentado anteriormente, las máquinas eléctricas multifásicas destacan por su fiabilidad, lo que las hace especialmente adecuadas en aplicaciones donde la seguridad sea un factor crítico. Sus aplicaciones se extienden a diversos campos, como son la aeronáutica, la generación de energía eólica, y la propulsión de vehículos eléctricos, tanto utilitarios como para competición, que es sobre la que se centrará el presente Trabajo de Fin de Grado. Las aplicaciones más relevantes relacionadas con vehículos de competición que han implementado máquinas eléctricas multifásicas para su tracción se muestran a continuación.

- **AUDI RS Q-ETRON E1.**

El vehículo eléctrico Audi RS Q-Etron E1 [28] es un ejemplo de aplicación de la tecnología de las máquinas eléctricas multifásicas en la industria automovilística de competición. Este vehículo, diseñado para competir en el rally de Dakar, cuenta con la propulsión del motor “Audi MGU 05”, compuesto internamente por una máquina de seis fases, similar a la empleada para este Trabajo de Fin de Grado. Algunas de las características [28] que ofrece este motor se muestran en la *Tabla 3* y en la *Figura 10* se muestra dicho vehículo.

Audi RS Q-Etron E1	
Aceleración (0 – 100 km/h)	4.5 s
Velocidad máxima	170 km/h
Potencia total	263 kW
Número de fases del motor eléctrico	6
Tipo de batería	Ión-litio
Capacidad de carga de la batería	52 kWh
Peso mínimo	2100 kg

Tabla 3 - Características del vehículo de competición "Audi RS Q-Etron E1"



Figura 10 - Audi RS Q-Etron E1 [28]

- **AUDI E-TRON FE07.**

El vehículo eléctrico Audi Q-ETRON FE07, mostrado en la *Figura 11* es un destacado competidor en la categoría de Fórmula E que cuenta, al igual que el Audi RS Q-Etron, con el motor “Audi MGU 05” de seis fases. Este vehículo destaca por contar con el doble de eficiencia que un motor de combustión interna con una potencia de 250 kW [24].



Figura 11 - Audi Q-ETRON FE07 [24]

3.5. CONVERTIDOR ELECTRÓNICO DE POTENCIA.

El convertidor electrónico de potencia, tal y como se comentó en el Capítulo 2, desempeña un papel fundamental dentro del accionamiento, pues representa el actuador del mismo. En el contexto de las máquinas multifásicas, gracias a la versatilidad y flexibilidad de los convertidores electrónicos de potencia es posible implementar diferentes topologías que proporcionan mejoras significativas al sistema en términos de rendimiento y eficiencia.

En el presente Trabajo de Fin de Grado, en el que la máquina a controlar es de doble devanado trifásico asimétrico, es posible aprovechar e implementar la tecnología de los convertidores trifásicos en accionamientos multifásicos, controlando cada devanado de forma independiente. El esquema de dicho convertidor se muestra en la *Figura 12*, donde el inversor queda alimentado por la batería del vehículo. Finalmente, esta adaptación de la tecnología existente a la configuración multifásica permite aprovechar la experiencia acumulada y simplificar el diseño e implementación del sistema de control, ofreciendo una solución simple para el control del accionamiento multifásico del presente Trabajo de Fin de Grado [7].

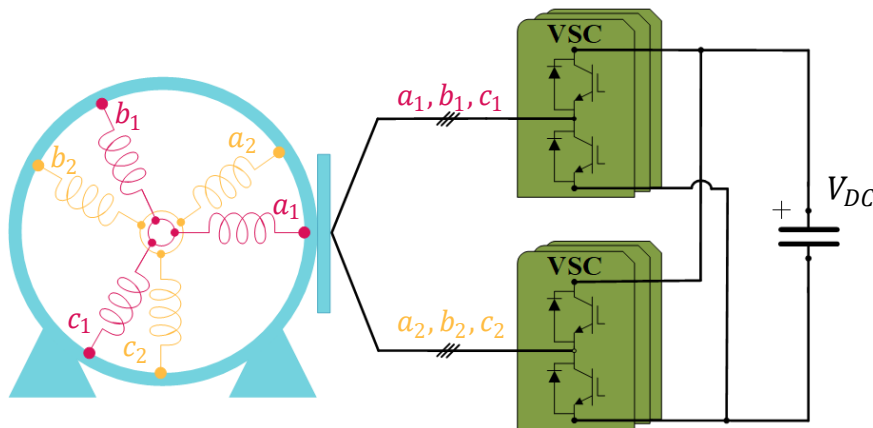


Figura 12 - Esquema del convertidor electrónico de potencia

CAPÍTULO 4. MODELADO MATEMÁTICO DE LOS ACCIONAMIENTOS MULTIFÁSICOS

4.1. INTRODUCCIÓN.

Uno de los primeros pasos necesarios para el estudio y desarrollo de esquemas de control, es la obtención del modelo matemático del accionamiento. Dicho modelo emplea una serie de ecuaciones que describen el comportamiento del sistema de la forma más realista posible. Sin embargo, hay que destacar que mientras más preciso sea el modelado matemático, este será más complejo. Es por ello por lo que, a la hora de diseñar un esquema de control para un sistema, es de vital importancia comenzar desarrollando un modelo matemático que represente su respuesta lo más fielmente posible a la realidad sin que sea excesivo su coste computacional.

En el caso de las máquinas, su comportamiento se puede definir haciendo uso de un conjunto de ecuaciones diferenciales que vienen expresadas en el sistema de referencia de variables de fase. A pesar de la posibilidad de trabajar con estas ecuaciones diferenciales, se puede hacer uso de ciertas herramientas matemáticas que expresen dichas ecuaciones en nuevos sistemas de referencia, que permitan simplificar su estudio y dotar a las variables de un mayor significado físico.

En primer lugar, se presentarán dichas herramientas matemáticas para el caso de una máquina trifásica, con el objetivo de comprender mejor su funcionamiento y luego se extenderán para el caso de máquinas multifásicas. Finalmente se presentarán las ecuaciones diferenciales que rigen el funcionamiento de una máquina de doble devanado trifásico asimétrico.

4.2. CASO TRIFÁSICO.

4.2.1. TRANSFORMADA DE CLARKE ($abc/\alpha\beta$).

En la *Figura 13* se muestra una representación gráfica del sistema de referencia estacionario de variables de fase compuesto por tres ejes abc . Además, en este sistema de referencia se puede representar un vector genérico \vec{x} que gira a una determinada velocidad ω , pudiendo representar tensiones, flujos o corrientes de las máquinas [29]. Este vector \vec{x} es posible proyectarlo sobre los ejes abc , descomponiéndose en tres valores x_a , x_b y x_c .

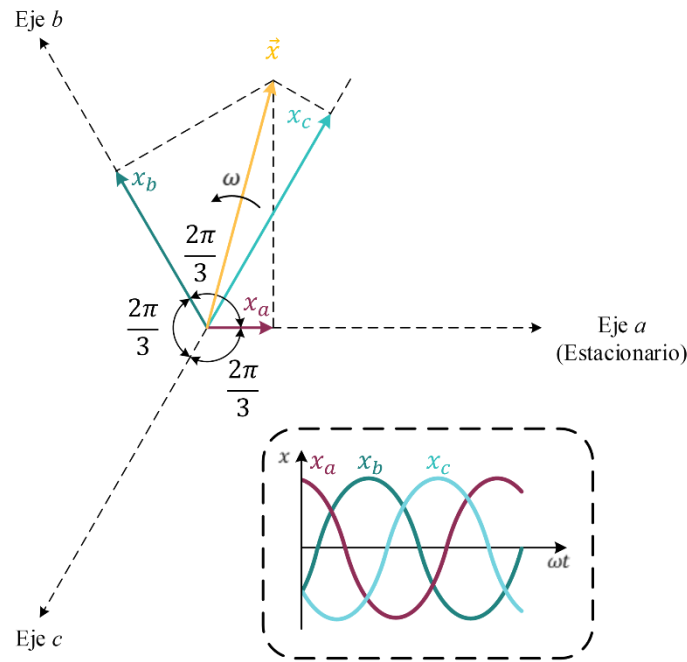


Figura 13 - Representación del vector \vec{x} en el sistema de referencia abc [7]

Sin embargo, para simplificar el estudio, se puede definir un nuevo sistema de referencia estacionario ortonormal α - β . Dicho sistema de referencia se puede obtener empleando para ello una matriz de transformación y se puede representar junto al vector \vec{x} como se muestra en la Figura 14.

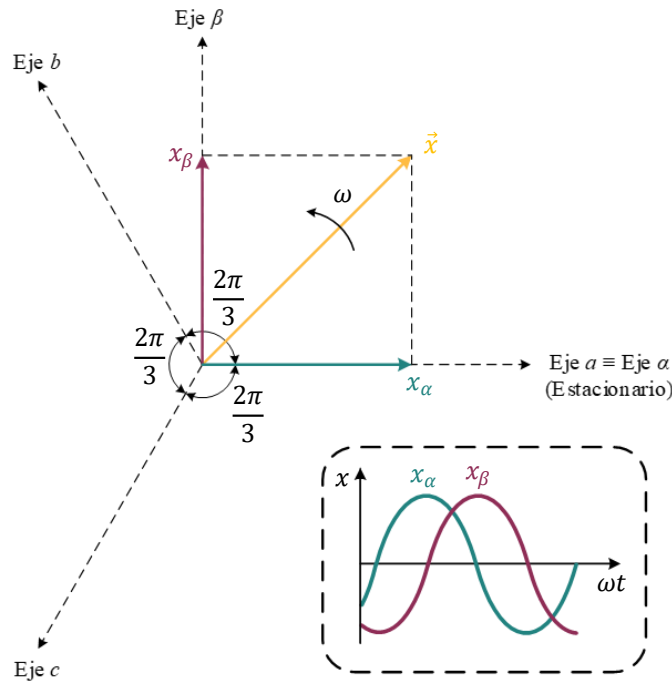


Figura 14 - Representación del vector \vec{x} en el sistema de referencia α - β [7]

Esta transformación del sistema de referencia abc al $\alpha\beta$, se denomina transformada de Clarke [29], y se puede expresar como se muestra en la ecuación (1):

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

siendo k un parámetro que, puede tomar el valor de $2/3$ en caso de mantenerse invariante la amplitud de las tensiones, flujos magnéticos y corrientes de la máquina invariantes o, $\sqrt{2/3}$ si se desea mantener invariante la potencia eléctrica de la máquina [29].

De esta manera es posible transformar un sistema de referencia de tres fases estacionario en otro sistema de dos variables $\alpha\beta$ junto a una componente homopolar. Sin embargo, el control de la máquina sigue siendo complejo ya que el vector \vec{x} gira a una determinada velocidad con respecto a un sistema de referencia estacionario. Es por ello que, para solucionar esto, se emplea una nueva transformación del sistema de referencia, denominada transformada de Park.

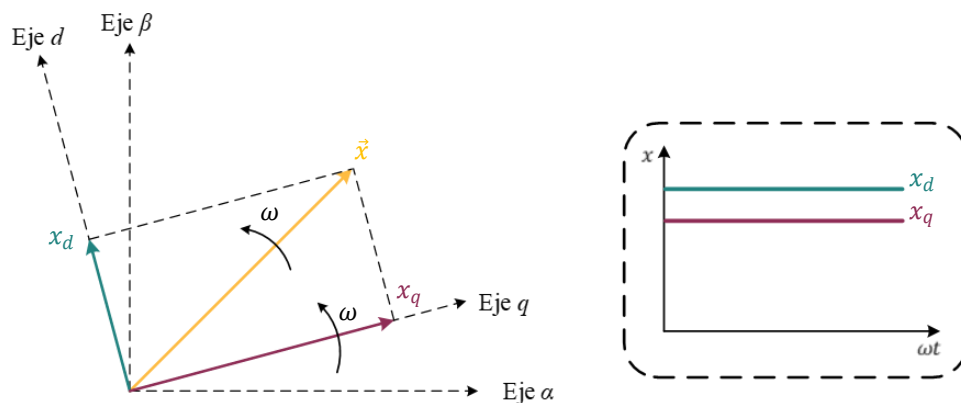


Figura 15 - Representación del vector \vec{x} en el sistema de referencia $d-q$ [7]

4.2.2. TRANSFORMADA DE PARK ($\alpha\beta/dq$).

En el apartado anterior se ha visto cómo, por medio de la transformada de Clarke, se ha conseguido pasar de un sistema de referencia de tres variables a otro de dos variables e igualmente estacionario. Sin embargo, debido al carácter senoidal de las variables x_α y x_β , el control sigue siendo complejo. Es posible, definir un nuevo sistema de referencia síncrono, denominado $d-q$, que gira de manera solidaria al vector \vec{x} . Esto tiene una doble implicación en términos del control. Por un lado, se elimina el carácter senoidal que presentaban las variables $\alpha\beta$. Por otro lado, es posible desacoplar la producción de flujo y par en la máquina alineando el eje d con el flujo rotórico de la máquina. El nuevo sistema de referencia se muestra en la Figura 15.

De forma matemática, en la ecuación (2) se expresa la transformada de Park [14].

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Si se alinea el flujo magnético de la máquina con la componente d de la corriente, esta será la responsable de la generación de flujo magnético, consiguiéndose así desacoplar la producción de flujo y par electromagnético de la máquina [29].

4.3. CASO HEXAFÁSICO.

De entre las ventajas de las máquinas multifásicas, en este apartado destaca que todas las herramientas matemáticas expuestas anteriormente para el control de máquinas trifásicas son extensibles al caso de máquinas multifásicas. Esto proporciona una serie de ventajas adicionales, como la aparición de nuevos subespacios con significados físicos concretos que responden a los grados de libertad adicionales de dichas máquinas. Por último, cabe destacar que, aunque los desarrollos matemáticos que se mostrarán a continuación se han obtenido para una máquina de inducción de seis fases de devanados distribuidos y con dos neutros aislados, estos desarrollos también se podrían extender para el caso de máquinas de cualquier número de fases.

Si se considera una máquina de seis fases, como es el caso de estudio del presente trabajo, el sistema de referencia de variables de fase estará compuesto por seis ejes, denominados $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$. Al aplicar la transformada de Clarke sobre este sistema, no solo se obtiene el subespacio α - β , sino que aparecen dos subespacios adicionales ortonormales entre sí, denominados x - y y 0^+ - 0^- . Por una parte, el subespacio x - y está directamente relacionado con las pérdidas por efecto Joule en el estátor de la máquina para máquinas con devanados distribuidos. Por otra parte, el subespacio 0^+ - 0^- , denominado comúnmente homopolar, no tiene efecto alguno sobre el control de la máquina si los neutros de la máquina se encuentran aislados, como es el caso de la máquina que se pretende controlar en este Trabajo de Fin de Grado. Como se puede observar, para el caso de máquinas multifásicas la transformada de Clarke tiene una mayor relevancia que para el caso trifásico dado que aparecen subespacios adicionales, que aportan un mayor significado físico al sistema.

Al particularizar la transformada de Clarke al caso de una máquina de inducción de seis fases asimétrica con sus dos devanados trifásicos desfasados 30° se obtiene la matriz mostrada en la ecuación (3) [12].

$$[C] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & 0 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & 1/2 & 1/2 & -1 \\ 1 & -1/2 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 & 0 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 & 1/2 & 1/2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Dado que al aplicar la transformada de Clarke se obtienen dos subespacios independientes α - β y x - y , es posible aplicar la transformada de Park a cada subespacio por separado. Por un lado, se obtiene un nuevo subespacio denominado d - q al aplicar la transformada de Park al subespacio α - β . Por otro lado, de forma análoga se obtiene un nuevo subespacio denominado x' - y' al aplicar la transformada de Park al subespacio x - y . Dado que la máquina a emplear es asimétrica, si se altera el sentido de giro del subespacio x' - y' es posible compensar posibles asimetrías de la máquina [30]. Finalmente, al aplicar la transformada de Park a los subespacios α - β y x - y se obtienen las ecuaciones (4) y (5).

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x_{x'} \\ x_{y'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_x \\ x_y \end{bmatrix}. \quad (5)$$

4.4. MODELO DE LA MÁQUINA MULTIFÁSICA.

Tras haber introducido las transformadas de Clarke y Park, es posible aplicar dichas herramientas matemáticas al conjunto de ecuaciones diferenciales que modelan el comportamiento de la máquina. Tras aplicar la transformada de Clarke a dichas ecuaciones diferenciales se obtienen las ecuaciones [29] mostradas en (6):

$$\begin{aligned} v_{\alpha s} &= \left(R_s + L_s \cdot \frac{d}{dt} \right) \cdot i_{\alpha s} + M \cdot \frac{d}{dt} i_{\alpha r}, \\ v_{\beta s} &= \left(R_s + L_s \cdot \frac{d}{dt} \right) \cdot i_{\beta s} + M \cdot \frac{d}{dt} i_{\beta r}, \\ v_{x s} &= \left(R_s + L_{ls} \cdot \frac{d}{dt} \right) \cdot i_{x s}, \\ v_{y s} &= \left(R_s + L_{ls} \cdot \frac{d}{dt} \right) \cdot i_{y s}, \\ 0 &= \left(R_r + L_r \cdot \frac{d}{dt} \right) \cdot i_{\alpha r} + \omega_r \cdot L_r \cdot i_{\beta r} + M \cdot \frac{d}{dt} i_{\alpha s} + \omega_r \cdot M \cdot i_{\beta s}, \\ 0 &= \left(R_r + L_r \cdot \frac{d}{dt} \right) \cdot i_{\beta r} + \omega_r \cdot L_r \cdot i_{\alpha r} + M \cdot \frac{d}{dt} i_{\beta s} - \omega_r \cdot M \cdot i_{\alpha s}, \\ T_e &= p \cdot M \cdot (i_{\beta r} \cdot i_{\alpha r} - i_{\alpha s} \cdot i_{\beta s}), \end{aligned} \quad (6)$$

siendo:

$$\begin{aligned} L_s &= L_{ls} + 3L_m, \\ L_r &= L_{lr} + 3L_m, \\ M &= 3L_m, \\ \omega &= P \cdot \omega_r, \end{aligned} \quad (7)$$

donde cada variable representa:

$v_{\alpha s}, v_{\beta s}$	Tensión del estátor en el plano α - β .
$v_{x s}, v_{y s}$	Tensión del estátor en el plano x - y .
$i_{\alpha s}, i_{\beta s}$	Corriente del estátor en el plano α - β .
$i_{x s}, i_{y s}$	Corriente del estátor en el plano x - y .
$i_{\alpha r}, i_{\beta r}$	Corriente del rotor en el plano α - β .
T_e	Par electromagnético.
P	Número de pares de polos.
R_r	Resistencia del rotor.
R_s	Resistencia del estátor.
L_r	Autoinductancia del rotor.
L_s	Autoinductancia del estátor.
L_{lr}	Inductancia de fuga del rotor.
L_{ls}	Inductancia de fuga del estátor.
L_m	Inductancia mutua.

4.5. MODELO DEL CONVERTIDOR DE TENSIÓN.

Tal como se comentó anteriormente, el convertidor de tensión es el elemento que actúa directamente sobre la máquina eléctrica. Internamente, está compuesto por un conjunto de semiconductores que actúan como interruptores. Combinando la apertura y el cierre de estos, se consigue obtener una señal eléctrica de salida alterna de frecuencia y amplitud variable. Para alimentar la máquina eléctrica seleccionada para este TFG se han empleado dos inversores trifásicos de dos niveles alimentados por un único bus de continua, donde cada inversor actúa sobre cada uno de los devanados trifásicos del accionamiento. Estos inversores se encuentran conectados a la máquina tal como se muestra en la *Figura 16*.

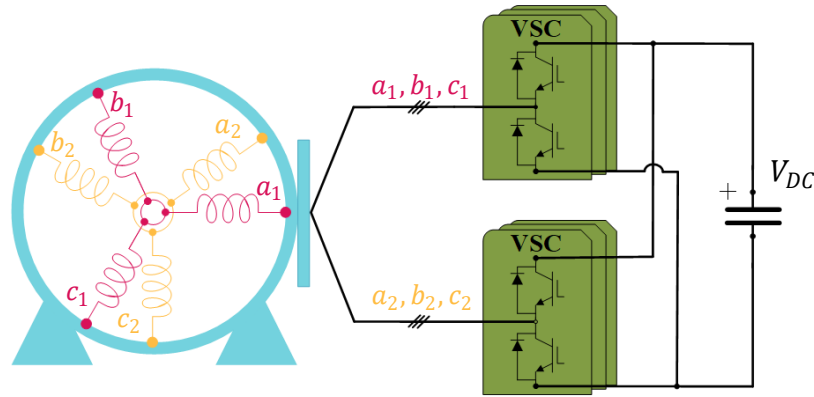


Figura 16 - Esquema del convertidor electrónico de potencia [7]

El estado de conmutación de las fases del inversor se puede modelar a partir de una variable S_{ij} , que podrá tomar únicamente dos valores: un valor unitario en el caso de que el semiconductor superior de una fase esté conduciendo y un valor nulo en el caso de que el semiconductor inferior sea el que esté conduciendo.

Partiendo de la tensión del bus de alimentación de continua V_{DC} y de los diferentes estados de conmutación de cada semiconductor, es posible obtener las tensiones de fase [29] que alimentan a la máquina eléctrica, como se muestra en la ecuación (8):

$$\begin{bmatrix} v_{a1} \\ v_{b1} \\ v_{c1} \\ v_{a2} \\ v_{b2} \\ v_{c2} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \\ S_{a2} \\ S_{b2} \\ S_{c2} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Al aplicar la transformada de Clarke a las tensiones de fase obtenidas en la ecuación (8), es posible representarlas tanto en el subespacio α - β como en el x - y , como se muestra en la Figura 17. La expresión de la transformada de Clarke se muestra en la ecuación (9).

$$[v_{\alpha s} \ v_{\beta s} \ v_{x s} \ v_{y s} \ v_{0+} \ v_{0-}]^T = [C] \cdot [v_{a1} \ v_{b1} \ v_{c1} \ v_{a2} \ v_{b2} \ v_{c2}]^T. \quad (9)$$

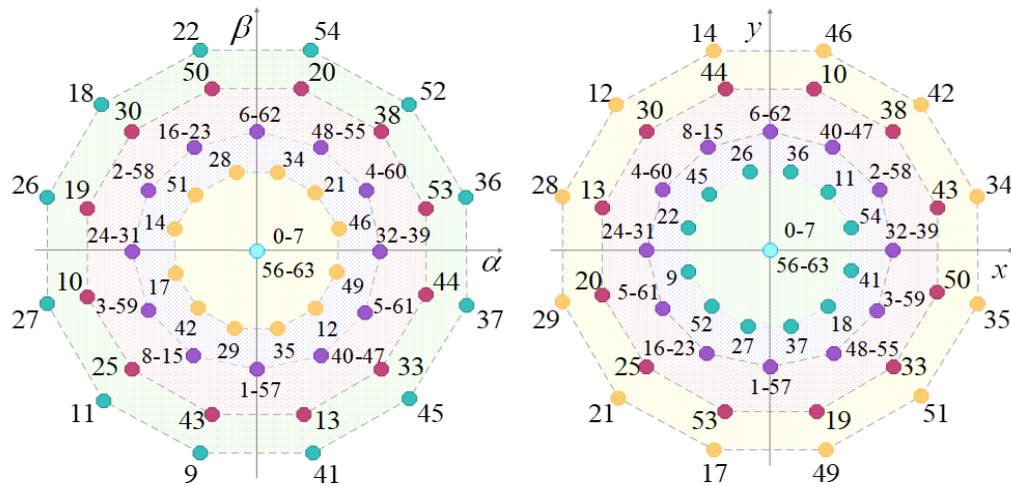


Figura 17 - Proyecciones de las tensiones de fase en los subespacios α - β y x - y [7]

La representación de la *Figura 17* indica los diferentes vectores de tensión obtenidos al expresar las variables de fase en los sistemas α - β y x - y . Cabe destacar que es posible clasificar estos vectores, atendiendo a su módulo en el plano α - β , en cinco tipos:

- **Largos:** Estos se muestran por el color turquesa y destacan por una gran contribución en el plano α - β y una pequeña aportación en el plano x - y .
- **Medianos-largos:** Estos se muestran por el color magenta y destacan por una gran aportación en ambos planos, generando tantas pérdidas como flujo y par.
- **Medianos:** Estos se muestran por el color morado y destacan, como en el caso anterior, por producir tantas pérdidas como flujo y par, pero en este caso, con menor magnitud.
- **Pequeños:** Estos se muestran por el color amarillo y destacan por una pequeña producción de flujo y par y una gran producción de pérdidas en el plano x - y .
- **Nulos:** Estos se muestran por el color cian y destacan por no producir flujo/par ni pérdidas en el plano secundario.

CAPÍTULO 5: CONTROL DE LAS MÁQUINAS MULTIFÁSICAS

5.1. INTRODUCCIÓN.

En respuesta a los cada vez mayores requerimientos exigidos en la actualidad a los accionamientos eléctricos multifásicos, está surgiendo la necesidad de desarrollar esquemas de control cada vez más sofisticados capaces de sacarle el máximo partido a las diferentes características de las máquinas multifásicas. Una vez introducida la topología de los vehículos de Fórmula E, las máquinas multifásicas y el convertidor de tensión junto su modelado matemático se procederá a realizar un barrido por el esquema de control predecesor al diseñado. Esto permitirá poner en contexto y desarrollar en mayor profundidad la estrategia de control propuesta para el presente Trabajo de Fin de Grado.

5.2. EVOLUCIÓN DE LOS CONTROLADORES.

5.2.1. CONTROL PREDICTIVO ESTÁNDAR (MPC).

El control predictivo es una técnica de control que ha sido objeto de estudio e investigación por parte de diversos grupos de investigación desde la década de los 70 [8]. Entre sus ventajas, destaca su gran flexibilidad para incluir restricciones en su control o a su rápida respuesta dinámica en comparación con otros esquemas de control basados en controladores Proporcional-Integral (PI), como el control de campo orientado.

El control predictivo hace uso de un modelo matemático discretizado del sistema con el que, partiendo del estado actual de la máquina, predice el comportamiento futuro de esta. Esto permite tomar acciones de control sobre el sistema en función de las variables predichas para así lograr cumplir con los objetivos del control. El esquema de control se muestra en la *Figura 18*.

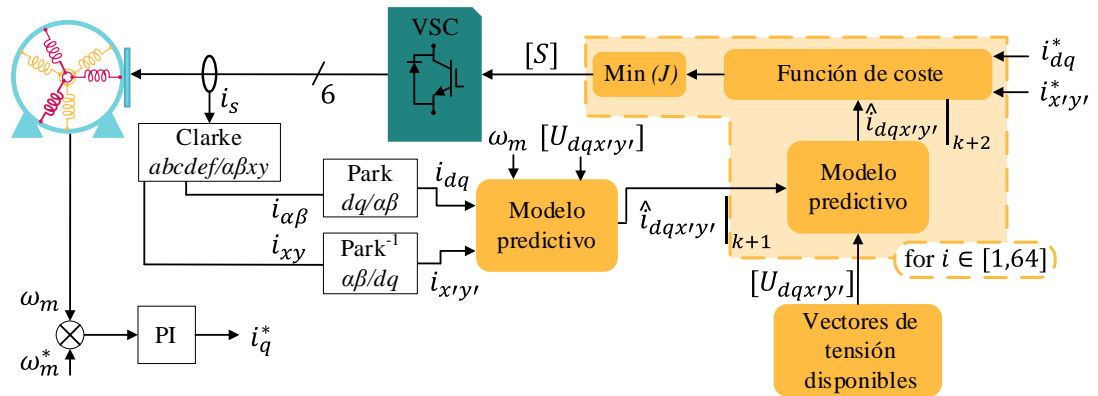


Figura 18 - Esquema del control predictivo estándar

El esquema de la *Figura 18* se compone de dos lazos de control diferenciados: un lazo externo encargado de realizar el control de la velocidad mecánica del rotor y un lazo interno que regula las corrientes del sistema empleando para ello el algoritmo de control predictivo. Por un lado, el lazo externo de velocidad está formado por un controlador del tipo PI. Este se encarga de obtener la corriente q de referencia, representada por i_q^* , partiendo de la velocidad mecánica medida en el eje del rotor y de su valor de referencia. Por su parte, la corriente la corriente d de referencia (i_d^*) se fija a su valor nominal para asegurar el correcto grado de magnetización de la máquina. Analizando el lazo interno de corrientes, en primer lugar se transforman las corrientes de fase a los subespacios α - β y x' - y' empleando para ello las transformada de Clarke. A partir de este punto se presentan dos etapas (véase la *Figura 19*) que permiten seleccionar aquella acción de control óptima en cada uno de los instantes de control.

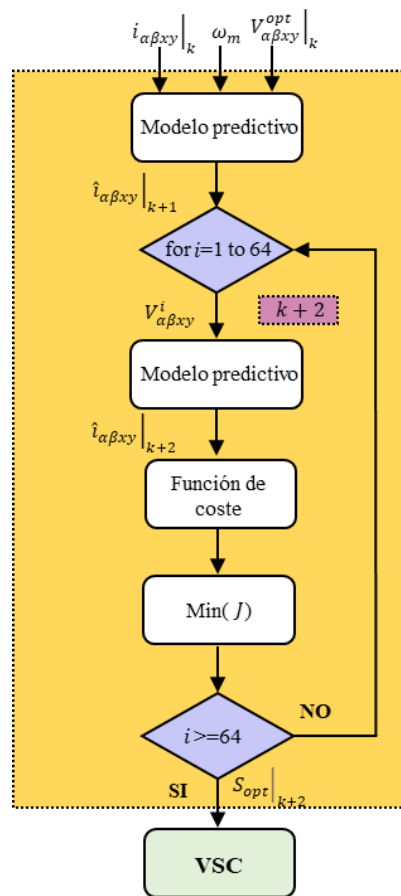


Figura 19 - Diagrama de flujo del control predictivo estándar

En una primera etapa se obtiene una predicción de las corrientes de la máquina en el instante $k+1$, empleando para ello las corrientes de la máquina, la velocidad mecánica medida en el rotor y los estados de conmutación aplicados por el control. En la segunda etapa, encargada de solventar el retraso de la actuación del control debido a la carga computacional del mismo [31], se parte de las corrientes predichas en el instante $k+1$ y cada una de las acciones de control disponibles, se realiza una posterior predicción de las corrientes en el instante $k+2$. Dichas corrientes son evaluadas en una función de coste junto a las corrientes $d-q$ y $x'-y'$ de referencia, tras lo cual se minimiza, escogiendo como acción de control óptima la que proporciona el menor valor de función de coste. Finalmente, en función de la acción de control escogida se aplican diferentes estados de conmutación sobre el inversor del accionamiento en cada periodo de control.

De cara a obtener las corrientes predichas por el algoritmo de control es posible utilizar sus ecuaciones del espacio de estado, para lo cual es necesario partir de un modelo discretizado de la máquina. De entre los diferentes métodos de discretización disponibles

se ha utilizado el denominado Euler-Forward, obteniéndose como resultado la ecuación (10) del modelo predictivo.

$$\frac{d}{dt}[X_{\alpha\beta xy}] = [A] \cdot [X_{\alpha\beta xy}] + [B] \cdot [U_{\alpha\beta xy}], \quad (10)$$

siendo:

$$\begin{aligned} [U_{\alpha\beta xy}] &= [v_{\alpha s} \ v_{\beta s} \ v_{x s} \ v_{y s} \ 0 \ 0]^T, \\ [X_{\alpha\beta xy}] &= [i_{\alpha s} \ i_{\beta s} \ i_{x s} \ i_{y s} \ \lambda_{\alpha r} \ \lambda_{\beta r}]^T. \end{aligned} \quad (11)$$

donde las matrices $[A]$ y $[B]$ definen la dinámica de una máquina de seis fases y tienen una gran dependencia de los parámetros de la máquina, por lo que requieren un conocimiento con gran precisión de estos parámetros [27].

Finalmente, partiendo de los errores calculados en un instante dado entre las variables de referencia, denotadas de forma genérica como x^* y las predichas, denotadas como \hat{x} , es posible construir una función de coste, con el objetivo de ser minimizada. Uno de los casos más comunes de estudio es aquel en el que se pretenden minimizar las pérdidas por efecto Joule en la máquina, relacionadas con el subespacio x - y , buscando simultáneamente un buen seguimiento de las variables de referencia del sistema. La función de coste asociada a ello se muestra en la ecuación (12).

$$J = K_a \cdot Error_{\alpha} + K_b \cdot Error_{\beta} + K_x \cdot Error_x + K_y \cdot Error_y, \quad (12)$$

donde los errores siempre se realizan entre las corrientes de referencia y las predichas, como se muestra en la ecuación (13),

$$\begin{aligned} Error_{\alpha} &= (i_{\alpha}^* - \hat{i}_{\alpha}|_{k+2})^2, \\ Error_{\beta} &= (i_{\beta}^* - \hat{i}_{\beta}|_{k+2})^2, \\ Error_x &= (i_x^* - \hat{i}_x|_{k+2})^2, \\ Error_y &= (i_y^* - \hat{i}_y|_{k+2})^2, \end{aligned} \quad (13)$$

y K_a, K_b, K_x, K_y se denominan factores de peso de la función de coste. Su función es ponderar la importancia relativa de los diferentes objetivos de control dentro de dicha función. Por un lado, los factores de peso K_x y K_y , normalmente agrupados en un único término $K_{xy} = K_x = K_y$, representan la importancia de reducir las pérdidas en el estátor frente a la producción de flujo y par. Mientras que, por otro lado, los factores de peso K_a y K_b , normalmente agrupados en un único término $K_{ab} = K_a = K_b$ suelen tener un valor unitario con el objetivo de establecerlos como referencia para ponderar el resto de los factores de peso.

5.2.2. CONTROL PREDICTIVO CON VECTORES VIRTUALES (VV-MPC).

Como se ha comentado en el apartado anterior, el control predictivo aplica un único vector de tensión por periodo de control, provocando elevadas corrientes en el plano x - y debido a que todos los estados de conmutación activos en el plano α - β se mapean también como activos en el plano x - y . Este efecto conlleva un empeoramiento en la calidad de las corrientes del accionamiento [32], el cual se amplifica notoriamente en el caso de máquinas con una inductancia de fuga baja [33]. Es por ello que, dadas las necesidades de reducir las pérdidas en el accionamiento provocadas por la aparición de corrientes no nulas en el subespacio x - y , surgen los denominados vectores virtuales (VV-MPC, por sus siglas en inglés *Virtual Vector Model Predictive Control*). Mediante su empleo se busca obtener un valor medio nulo de las tensiones en dicho subespacio. Para conseguir esto, analizando nuevamente la *Figura 17* se puede observar que los vectores largos y medianos-largos con la misma dirección en el plano α - β , como es el caso de los vectores 36 y 53, se convierten en dos vectores con direcciones opuestas en el plano x - y . Esto permite, si se aplican dichos vectores de tensión en cierta proporción, obtener un valor en promedio nulo de tensión en el plano secundario, como se observa en la *Figura 20*.

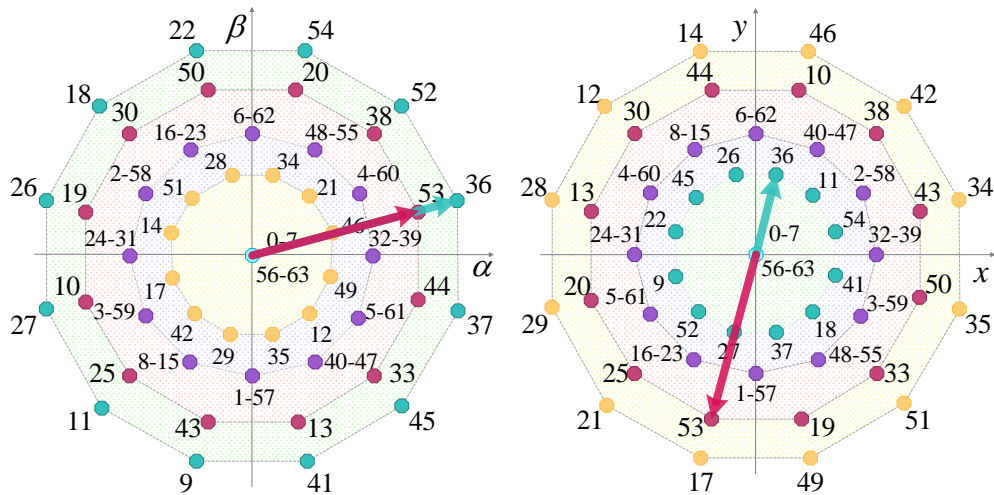


Figura 20 - Representación de un par de vectores virtuales seleccionados

Para obtener un valor promedio nulo, es necesario aplicar los vectores largos y medianos-largos en cierta proporción durante el periodo de conmutación. Dicha proporción puede calcularse como se muestra en la ecuación (14).

$$\begin{bmatrix} V_1^x & V_2^x \\ V_1^y & V_2^y \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, 0 \leq t_i \leq 1, t_1 + t_2 = T_m. \quad (14)$$

donde V_1 es un vector largo y V_2 es el vector mediano-largo con la misma dirección que V_1 en el plano α - β , mientras que $t_1 - t_2$ es el tiempo de aplicación de cada vector por unidad. Resolviendo el sistema de ecuaciones (14) se obtiene que el tiempo de aplicación [32] de los vectores largos es $t_1 = 0.73 \cdot T_m$ y el de los vectores medianos-largos es $t_2 = 0.27 \cdot T_m$. Por su parte, el valor promedio de los vectores virtuales en el subespacio α - β se muestra en la ecuación (15).

$$VV_i = t_1 \cdot V_1 + t_2 \cdot V_2, \quad (15)$$

Sin embargo, cabe destacar que, aunque mediante esta solución se obtiene un valor medio nulo de las corrientes x - y , debido a la diferencia entre la magnitud de los vectores largos y medianos-largos en el plano x - y , aparece una alta producción instantánea de tensión por parte de los vectores medianos-largos. Este efecto, que se muestra en la *Figura 21*, puede provocar la aparición de armónicos, lo que es aún más importante en accionamientos multifásicos debido a la baja impedancia del plano x - y [34].

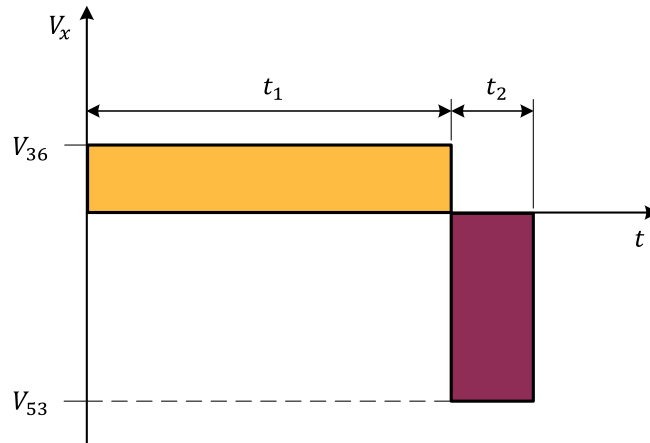


Figura 21 - Representación de los vectores virtuales de tensión en el subespacio x - y

5.3. ESQUEMA DE CONTROL PROPUESTO.

5.3.1. CONTROL PREDICTIVO MULTIVECTORIAL (MV5-MPC).

Para el presente Trabajo de Fin de Grado, con el fin de abordar el problema de la producción instantánea de tensión que surge al aplicar el método de los vectores virtuales, recientes investigaciones sugieren que el uso de vectores de tensión largos adyacentes como acciones de control puede mitigar dicho efecto, aunque se tenga un promedio no nulo [35]. Además, la aplicación de múltiples vectores largos adyacentes combinados con el nulo además de proporcionar tensión nula en el subespacio x - y , reduce aún más la producción instantánea de tensión [36].

En este ámbito la solución multivectorial denominada MV5-MPC (por sus siglas en inglés *Multi Vector 5 Model Predictive Control*) mantiene la misma filosofía del control predictivo con dos vectores virtuales (VV-MPC), aplicando en este caso cuatro vectores de tensión largos adyacentes en cada periodo de control con diferentes tiempos de aplicación, más un vector de tensión nula. Por un lado, la aplicación de más vectores por periodo de control no solo asegura un valor reducido de tensiones en el plano x - y , sino que también disminuye la distorsión armónica y los valores instantáneos de los vectores de tensión medianos-largos al reducirse los tiempos de aplicación, dado que se aplican más vectores por periodo de control [35]. Por otro lado, la importancia de la inclusión del vector nulo radica en un mejor control de flujo/par y una reducción de los errores en el seguimiento de las corrientes [35] dado que mejora el refinamiento del subespacio α - β , haciendo posible desplazarse radialmente entre vectores además de tangencialmente. En la *Figura 22* se muestra un ejemplo de un cuarteto de vectores (QV) formado por los vectores 36-52-54-22 para el MV5-MPC y en la *Figura 23* se muestran las diferentes combinaciones d cuartetos.

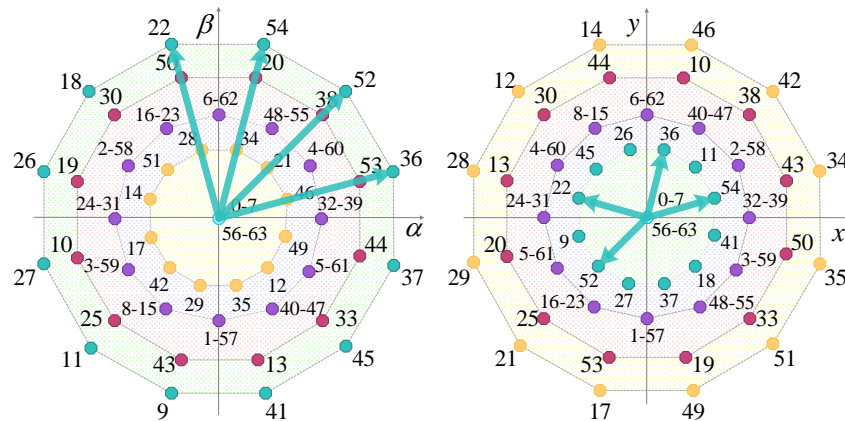


Figura 22 - Representación de un cuarteto de vectores para el MV5-MPC

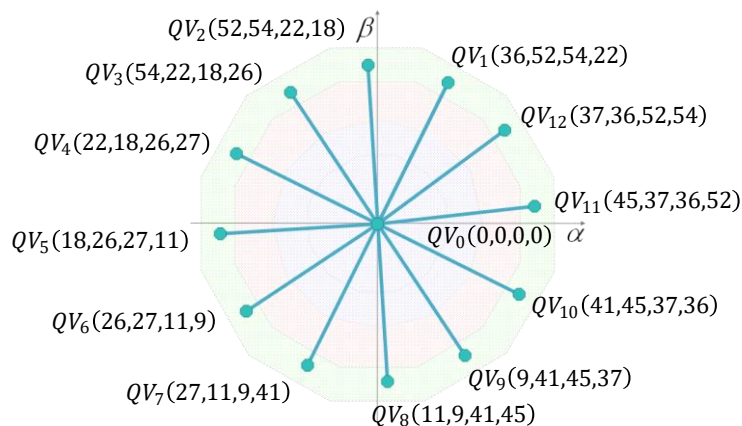


Figura 23 - Representación de los cuartetos de vectores para el MV5-MPC

La expresión de los vectores virtuales aplicados en el MV5-MPC se recoge en la ecuación (16).

$$QV_i = (t_1 \cdot V_1 + t_2 \cdot V_2 + t_3 \cdot V_3 + t_4 \cdot V_4)t_a + V_{nulo}(1 - t_a), \quad (16)$$

donde $V_1 - V_4$ es un cuarteto de vectores correlativos y $t_1 - t_4$ es el tiempo de aplicación de cada vector por unidad [35], los cuales se calculan resolviendo el sistema de ecuaciones mostrado en (17).

$$\begin{bmatrix} V_1^x & V_2^x & V_3^x & V_4^x \\ V_1^y & V_2^y & V_3^y & V_4^y \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, 0 \leq t_i \leq 1. \quad (17)$$

Dado que el sistema de ecuaciones (17) tiene infinitas soluciones, se ha seleccionado aquella solución que minimice las corrientes del plano secundario y maximice la producción en el plano $\alpha\text{-}\beta$ para un mejor provecho del dc-link. De esta forma, se obtiene que el primer vector de cada cuarteto se aplicará un 10% del tiempo de aplicación, el segundo de ellos un 34,12% de dicho tiempo, el tercero un 39,09% y el cuarto un 16,79%. En la *Figura 24* se esquematiza una representación del reparto del periodo de control.

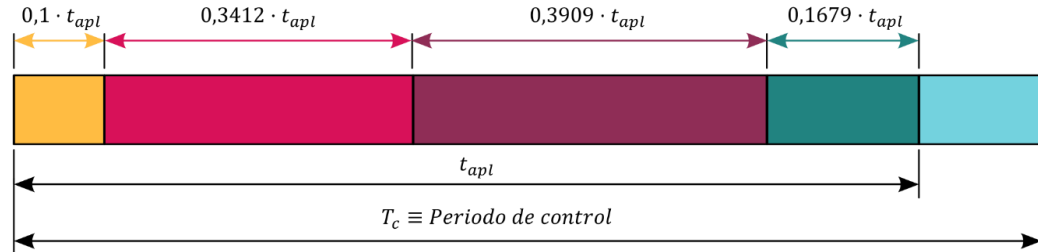


Figura 24 - Representación del periodo de control

Por último, dado que el control de las corrientes $x\text{-}y$ se realiza en bucle abierto, es posible usar un modelo de predicción reducido de la máquina [32]. De esta manera, se reduce el coste computacional, minimizando uno de los problemas que presenta el control predictivo estándar. Esta misma reducción puede aplicarse a la función de coste donde, a diferencia de la ecuación (18), tan solo aparecen términos relacionados con $\alpha\text{-}\beta$,

$$J = Error_\alpha + Error_\beta, \quad (18)$$

donde los errores siempre se realizan entre las corrientes de referencia y las predichas, como se muestra en la ecuación (19),

$$\begin{aligned} Error_\alpha &= (i_\alpha^* - \hat{i}_\alpha|_{k+2})^2, \\ Error_\beta &= (i_\beta^* - \hat{i}_\beta|_{k+2})^2, \end{aligned} \quad (19)$$

5.3.2. CONTROL PREDICTIVO CON HORIZONTE EXTENDIDO.

En la búsqueda de una mejor respuesta dinámica del accionamiento y seguimiento de las variables de referencia, se ha extendido el anterior control añadiendo un horizonte de predicción adicional [34]. La utilización de horizontes de predicción extendidos permite mejorar el seguimiento de las señales de referencia. Para obtener estas mejoras se ha añadido una etapa de predicción adicional al *MV5-MPC* que, en función del vector escogido en el instante $k+2$, denominado “maestro”, escoge un vector denominado “esclavo” en el instante de predicción $k+3$ de un conjunto de cuatro vectores formado por el vector nulo, los dos adyacentes y el opuesto al vector maestro. Según [34], esta elección de vectores esclavos se ha realizado en base a dos motivos. En primer lugar, por consideraciones físicas dado que, para crear el campo de Tesla necesario para el funcionamiento de la máquina, la trayectoria que describen los vectores de tensión en el subespacio α - β en estado estacionario debe ser una circunferencia. En segundo lugar, por los bajos tiempos de muestreo del control que aseguran que el comportamiento de la máquina no cambiará bruscamente entre periodos de control. Esto es lo que permite aplicar los vectores adyacentes al maestro y el nulo, por si es necesario reducir la producción de tensión. Las diferentes combinaciones de vectores maestro y esclavo se muestran en la *Tabla 4*, mientras que el esquema de control se muestra en la *Figura 25*.

Maestro	Esclavo #1	Esclavo #2	Esclavo #3	Esclavo #4
$k+2$	$k+3$	$k+3$	$k+3$	$k+3$
QV_1	QV_2	QV_{12}	QV_7	QV_0
QV_2	QV_3	QV_1	QV_8	QV_0
QV_3	QV_4	QV_2	QV_9	QV_0
QV_4	QV_5	QV_3	QV_{10}	QV_0
QV_5	QV_6	QV_4	QV_{11}	QV_0
QV_6	QV_7	QV_5	QV_{12}	QV_0
QV_7	QV_8	QV_6	QV_1	QV_0
QV_8	QV_9	QV_7	QV_2	QV_0
QV_9	QV_{10}	QV_8	QV_3	QV_0
QV_{10}	QV_{11}	QV_9	QV_4	QV_0
QV_{11}	QV_{12}	QV_{10}	QV_5	QV_0
QV_{12}	QV_1	QV_{11}	QV_6	QV_0
QV_0	QV_0	QV_0	QV_0	QV_0

Tabla 4 - Combinaciones de vectores maestros y esclavos

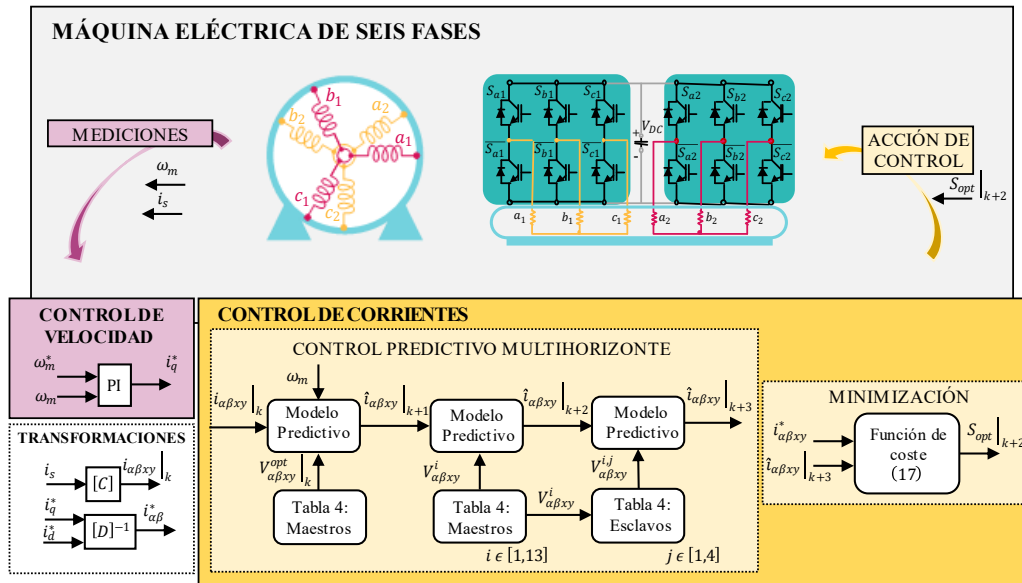


Figura 25 - Esquema del control predictivo con horizonte extendido

Al igual que en el control predictivo estándar, la solución horizonte extendido cuenta con dos lazos: un lazo externo encargado del control de la velocidad mecánica rotórica y un lazo interno encargado del control de las corrientes. Tal y como puede verse en la *Figura 25*, el lazo de control externo es el encargado de proporcionar el valor de la corriente i_q de referencia. Para ello se emplea un controlador tipo PI, el cual emplea como entrada el error en velocidad en el instante k . Por su parte, la corriente i_d de referencia es fijada a su valor nominal para asegurar un correcto grado de magnetización de la máquina. En cuanto al lazo de control interno, en este caso se tienen un total de tres etapas de predicción, como se muestra en el diagrama de flujo de la *Figura 26*.

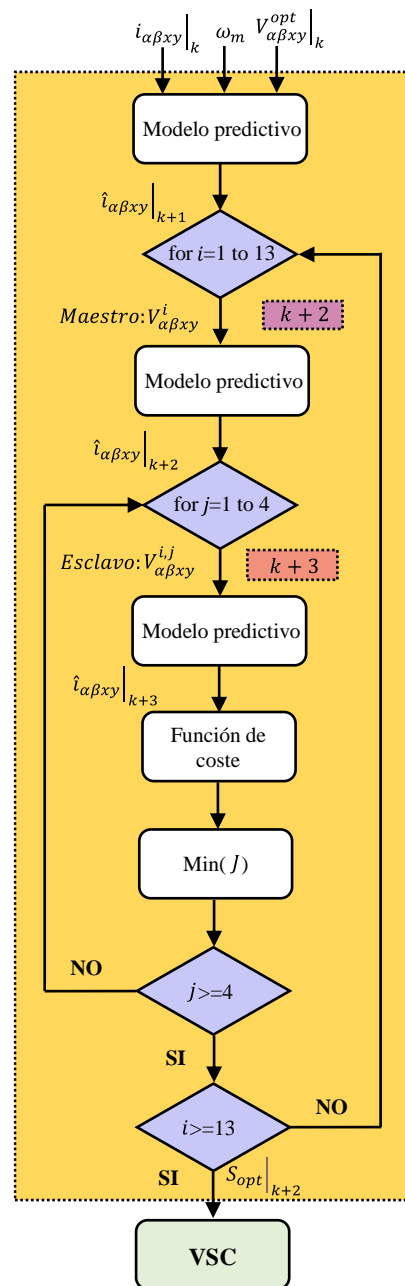


Figura 26 - Diagrama de flujo del control predictivo con horizonte extendido

En la primera etapa, se emplean las corrientes medidas en el instante k , así como la velocidad eléctrica del rotor y el estado de conmutación aplicado en el periodo de control anterior para obtener las corrientes predichas en el instante $k+1$. Esta primera etapa de predicción tiene como objetivo solventar la limitación que presenta el FCS-MPC cuando es implementado por controladores digitales [31]. Posteriormente, en una segunda etapa de predicción partiendo de las corrientes predichas en instante $k+1$ y cada uno de los 13 vectores virtuales contenidos en una tabla de vectores maestros, se obtienen las

corrientes en el instante $k+2$. En una posterior etapa de predicción, partiendo de dichas corrientes y de cada uno de los vectores esclavos asociados a cada maestro según la *Tabla 4*, se obtienen las corrientes predichas en el instante de predicción $k+3$. Aquí se puede apreciar la reducción en el número de iteraciones, el cual pasa de $13 \cdot 13$ a $13 \cdot 4$ empleando los vectores esclavos en lugar de la totalidad de vectores. Tras esto, de forma análoga al control predictivo estándar, las corrientes α, β de referencia junto a las predichas en $k+3$ se contabilizan en la función de coste, que se muestra en la ecuación (20), la cual es minimizada para cada uno de los trece vectores maestros y cuatro vectores esclavos asociados a ellos.

$$J = Error_{\alpha} + Error_{\beta}, \quad (20)$$

donde los errores siempre se realizan entre las corrientes de referencia y las predichas, como se muestra en la ecuación (21),

$$\begin{aligned} Error_{\alpha} &= (i_{\alpha}^* - \hat{i}_{\alpha}|_{k+3})^2, \\ Error_{\beta} &= (i_{\beta}^* - \hat{i}_{\beta}|_{k+3})^2. \end{aligned} \quad (21)$$

Finalmente, al igual que ocurría en el control predictivo estándar, en función de la acción de control escogida se aplican diferentes estados de conmutación sobre el inversor del accionamiento en cada periodo de control.

CAPÍTULO 6: RESULTADOS DE SIMULACIÓN

6.1. INTRODUCCIÓN.

Tras haber descrito en profundidad el control propuesto en el Capítulo 5, a continuación, se realizará una primera validación del esquema de control propuesto simulándolo en el *software MATLAB/Simulink* antes de implementarlo en una bancada experimental. Para ello, en este capítulo se presentará en primer lugar el entorno de simulación *MATLAB/Simulink* utilizado para, posteriormente, presentar los resultados que validan el funcionamiento del control.

6.2. SIMULADOR.

Con el fin de analizar en detalle el esquema de control propuesto en el Capítulo 5, se comprobará su respuesta en un entorno de simulación. Para ello, previamente se describirán los diferentes bloques que conforman el entorno de simulación, los cuales han sido resaltados sobre el esquema de control propuesto en la *Figura 27*.

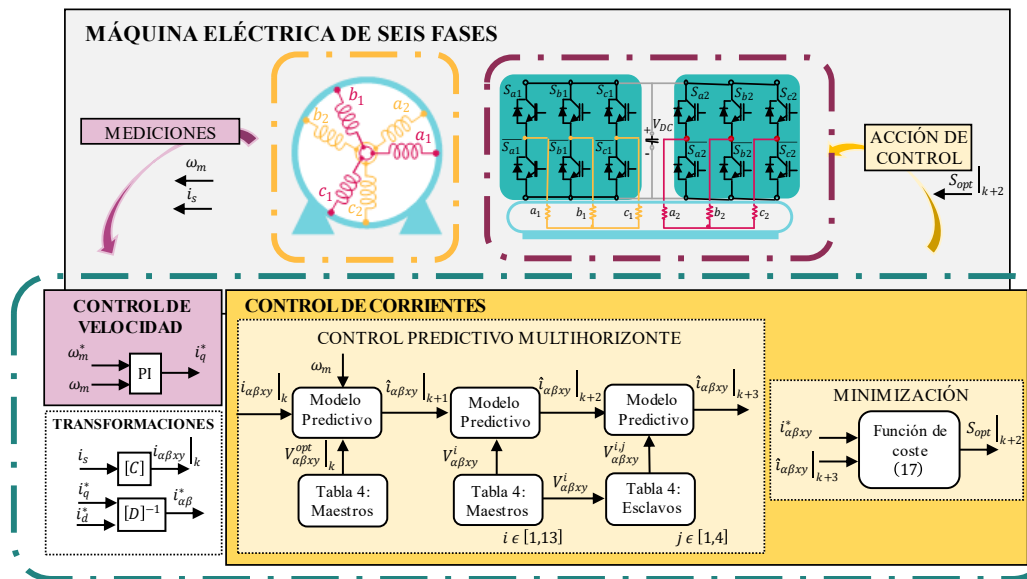


Figura 27 - Esquema de bloques del simulador

6.2.1. CONTROL.

El bloque de control representa tanto el lazo externo de velocidad como el lazo interno de corrientes. Por un lado, respecto al lazo externo de velocidad, partiendo de la velocidad mecánica de referencia (ω_m^*) y la medida en el eje (ω_m), se obtiene la corriente q de referencia (i_q^*). Este bloque además cuenta con la posibilidad de seleccionar una consigna constante de velocidad o un cambio brusco de velocidad mediante una señal cuadrada para realizar un análisis dinámico sobre el accionamiento. El control de dicho lazo se realiza mediante un controlador tipo *PI*, cuyos parámetros, ajustados mediante métodos heurísticos, se muestran en la *Tabla 5*.

CONSTANTE	VALOR
Proporcional (K_P)	1,5
Integral (K_I)	2

Tabla 5 – Parámetros del controlador PI

Por otro lado, respecto al lazo interno de corrientes, partiendo de la velocidad mecánica medida en el eje (ω), las transformadas de las corrientes de fase y sus valores de referencia, se obtienen las predicciones de las transformadas de dichas corrientes en los diferentes horizontes de predicción junto al estado de conmutación a aplicar en el convertidor de tensión. Por último, en este bloque en concreto es donde se implementará el control predictivo multivectorial con horizonte extendido de predicción. El bloque de control se muestra en la *Figura 28*.

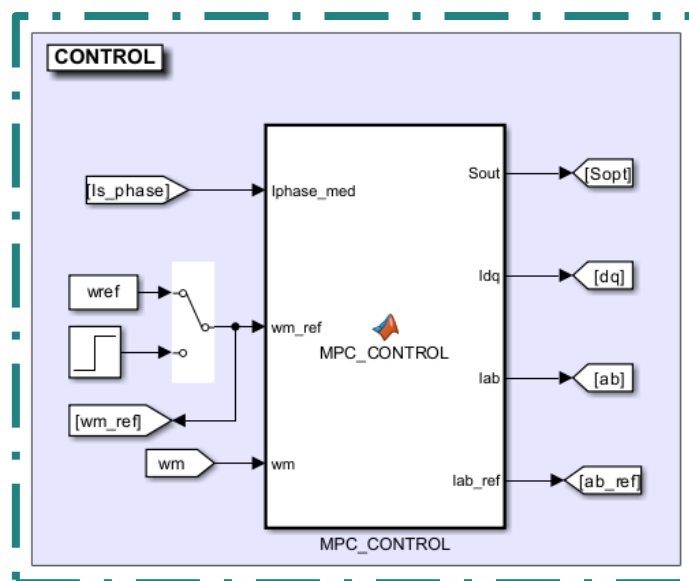


Figura 28 - Bloque de control

6.2.2. CONVERTIDOR DE TENSIÓN.

El bloque del convertidor de tensión contiene el modelo del convertidor de tensión indicado en el Capítulo 4 y se encarga de alimentar la máquina eléctrica a controlar en función del estado de conmutación seleccionado como óptimo por la etapa de control. El bloque del convertidor de tensión se muestra en la *Figura 29*.

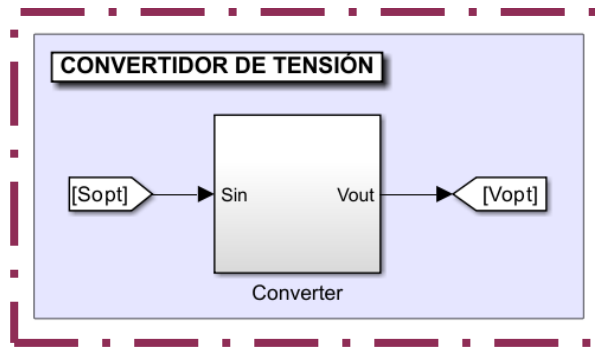


Figura 29 - Bloque del convertidor de tensión

6.2.3. MÁQUINA DE INDUCCIÓN DE 6 FASES.

Este bloque se encarga de simular el comportamiento de una máquina de seis fases de inducción de 6 fases por medio de las ecuaciones indicadas en el Capítulo 4, partiendo del par de carga y de las tensiones aportadas por el convertidor de tensión. Los parámetros de la máquina empleada para el presente Trabajo de Fin de Grado se recogen en la *Tabla 6*.

PARÁMETRO	VALOR
Resistencia del estátor (R_s)	4,195 Ω
Resistencia del rotor (R_r)	3 Ω
Inductancia propia del estátor (L_{ls})	4,5 mH
Inductancia propia del rotor (L_{lr})	55,12 mH
Inductancia mutua (L_m)	370 mH
Número de pares de polos (P)	3
Par de inercia del rotor (J)	0,005 kg · m ²

Tabla 6 - Parámetros de la máquina de inducción de 6 fases

El bloque de la máquina de inducción de 6 fases se muestra en la *Figura 30*.

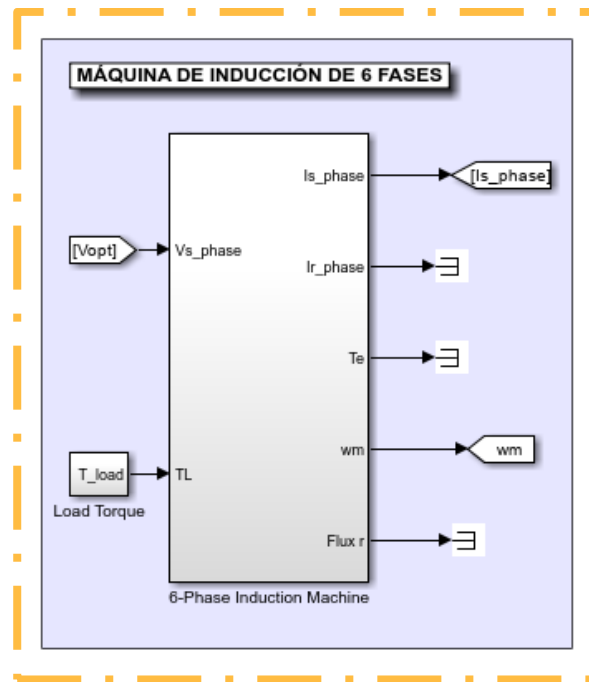


Figura 30 - Bloque de la máquina de inducción de 6 fases

6.3. RESULTADOS.

Una vez presentado el entorno de simulación empleado para el desarrollo del esquema de control propuesto, en este apartado se presentarán los resultados de las pruebas realizadas para corroborar su funcionamiento.

6.3.1. TEST 1: ANÁLISIS DE LA CALIDAD Y SEGUIMIENTO DE LAS CORRIENTES.

Para analizar la evolución de la calidad de las corrientes y el seguimiento de las mismas, respecto a sus respectivas variables de referencia se ha realizado un primer test. En este se compara el control predictivo multivectorial con horizonte extendido frente al control predictivo multivectorial para un punto de operación concreto. Los resultados obtenidos han sido los siguientes.

En la *Figura 31a* se puede observar que el seguimiento de la velocidad de referencia es realizado de forma correcta por ambos controles, siendo este error algo superior en el control con horizonte extendido, como se puede comprobar en la *Tabla 7*. En cuanto a las corrientes d - q , en la *Figura 31b* se puede observar que estas apenas cuentan con rizado. Sin embargo, en el control con horizonte extendido aparece un mejor seguimiento de las corrientes del plano principal. Por su parte, en la *Figura 31c* se puede observar que en cuanto a las corrientes x - y no hay grandes diferencias entre ambos controles. No obstante, en el control con horizonte extendido la desviación estándar de dichas corrientes experimenta una ligera disminución ya

que es capaz de predecir mejor al tener un horizonte adicional de predicción, lo que se refleja en la *Tabla 7*. En cuanto a las corrientes α - β , en la *Figura 31d* se puede apreciar que estas no tienen gran variación y se presente un ligero offset en el control propuesto de igual forma que ocurría en las corrientes d - q dado que estas son una rotación de las corrientes α - β , como se explicó en el Capítulo 4. Finalmente, en cuanto a las corrientes de fase, en la *Figura 31e* se puede destacar que no existen grandes diferencias entre ambos controles en términos de calidad de corrientes, lo que se puede corroborar mediante la tasa de distorsión armónica (*THD*, por sus siglas en inglés Total Harmonic Distortion) mostrada en la *Tabla 7*.

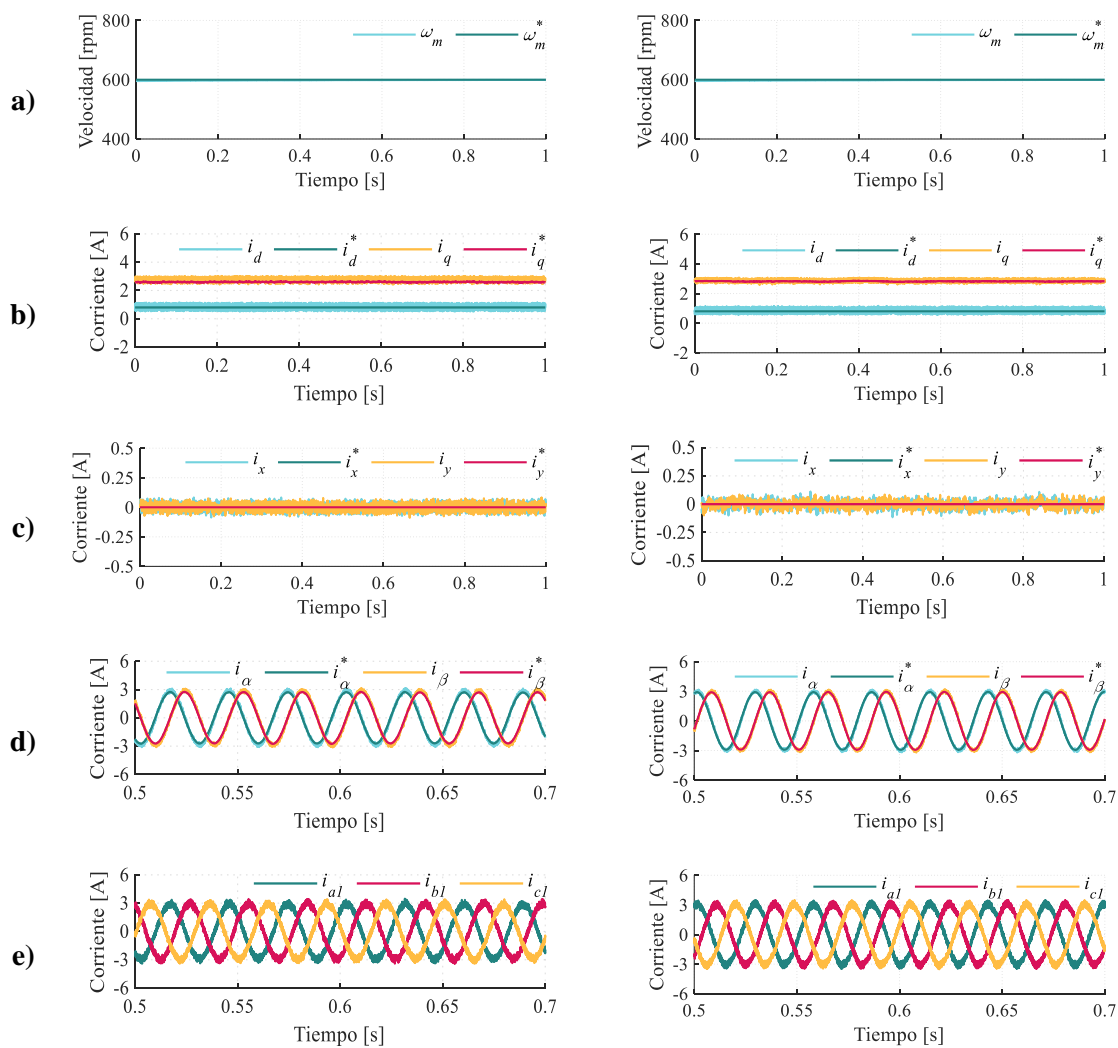


Figura 31 – Respuesta del sistema en simulación. Control predictivo multivectorial (izquierda) y control predictivo multivectorial con horizonte extendido (derecha): a) Velocidad de la máquina, b) Corrientes d-q, c) Corrientes x-y, d) Corrientes α - β , e) Corrientes de fase

Los resultados del sistema son los que se muestran en la *Tabla 7*.

PARÁMETRO	VALOR	
	CONTROL PREDICTIVO MULTIVECTORIAL	CONTROL PREDICTIVO MULTIVECTORIAL CON HORIZONTE EXTENDIDO
Velocidad de referencia (ω^*)	600 [rpm]	600 [rpm]
Par de carga (τ)	5 [Nm]	5 [Nm]
Desviación estándar de las corrientes xy (σ_{xy})	0,0320 [A]	0,0314 [A]
Tasa de distorsión armónica (THD)	9,7839 %	9,5763 %
Error en el seguimiento de las corrientes $d-q$	0,0649 [A]	0,0358 [A]
Valor rms de las corrientes $\alpha-\beta$	2,1219 [A]	2,0505 [A]
Valor rms medio de las corrientes de fase	2,1316 [A]	2,0603 [A]

Tabla 7 – Comparación de los resultados del sistema en simulación para el control predictivo multivectorial y para el control predictivo multivectorial con horizonte extendido

6.3.2. TEST 2: ANÁLISIS DINÁMICO DEL CONTROL.

Posteriormente, para estudiar la evolución del control ante cambios bruscos en la consigna de velocidad, se ha impuesto una señal de referencia de velocidad que sigue un perfil rectangular, cuyo valor cambia de 300 rpm a 600 rpm en el instante $t = 0,5$ s. Con esto se consigue comparar el tiempo de respuesta del control predictivo multivectorial con horizonte extendido con su predecesor, el control predictivo multivectorial. El objetivo de este test es comprobar si se obtiene mejor respuesta ante un escalón de velocidad con el método de control propuesto, respecto a un control predictivo estándar. Los resultados obtenidos se describen a continuación.

En la *Figura 32a* se puede observar que el seguimiento de la velocidad de referencia es realizado de forma correcta por ambos controles. En el instante en el que la señal de referencia de la velocidad varía, se puede observar que la máquina tarda un cierto tiempo, no significativo, en alcanzar la velocidad de referencia. En cuanto al error en el seguimiento de dicha referencia, se puede comprobar en la *Tabla 8* como no existen grandes diferencias entre ambos controles, habiendo aproximadamente un 7% de variación entre ambos errores, a favor del control con horizonte extendido. En cuanto a las corrientes $d-q$, en la *Figura 32b* se puede observar que en ambos casos se sigue el valor de referencia sin apenas rizado gracias al refinamiento mejorado que presentan tanto el esquema de control propuesto como el MV5-



MPC en $k+2$. Además, cuando se realiza la conmutación en la consigna de velocidad, se puede apreciar cómo la corriente q crece hasta llegar a la corriente nominal de la máquina, que es de 6 A. A partir de este punto, se mantiene saturada durante el tiempo que permanece la rampa de velocidad, tras lo cual dicha corriente vuelve a su valor anterior.

Por su parte, en la *Figura 32c* se puede observar que, en cuanto a las corrientes x - y , el control predictivo multivectorial cuenta con mayor rizado a bajos puntos de operación, sin embargo, a mayores puntos de operación este rizado se reduce. Por el contrario, en el control con horizonte extendido no existen grandes diferencias en el rizado de las corrientes x - y al variar el punto de operación dado que dicho control al tener un horizonte de predicción adicional es capaz realizar una predicción mejorada. Además, observando la *Tabla 8* se puede apreciar que el control con horizonte extendido cuenta con menor desviación estándar en las corrientes x - y . En cuanto a las corrientes α - β , como se observa en la *Figura 32d*, no hay gran variación y solo existe un ligero *offset* en el control propuesto de igual forma que aparecía en las corrientes d - q . Analizando las corrientes de fase, en la *Figura 32e* se puede apreciar que, en términos de calidad de corrientes, no existen grandes diferencias entre ambos controles, aunque según los valores de la *Tabla 8*, el control propuesto mejora ligeramente la calidad de las corrientes.

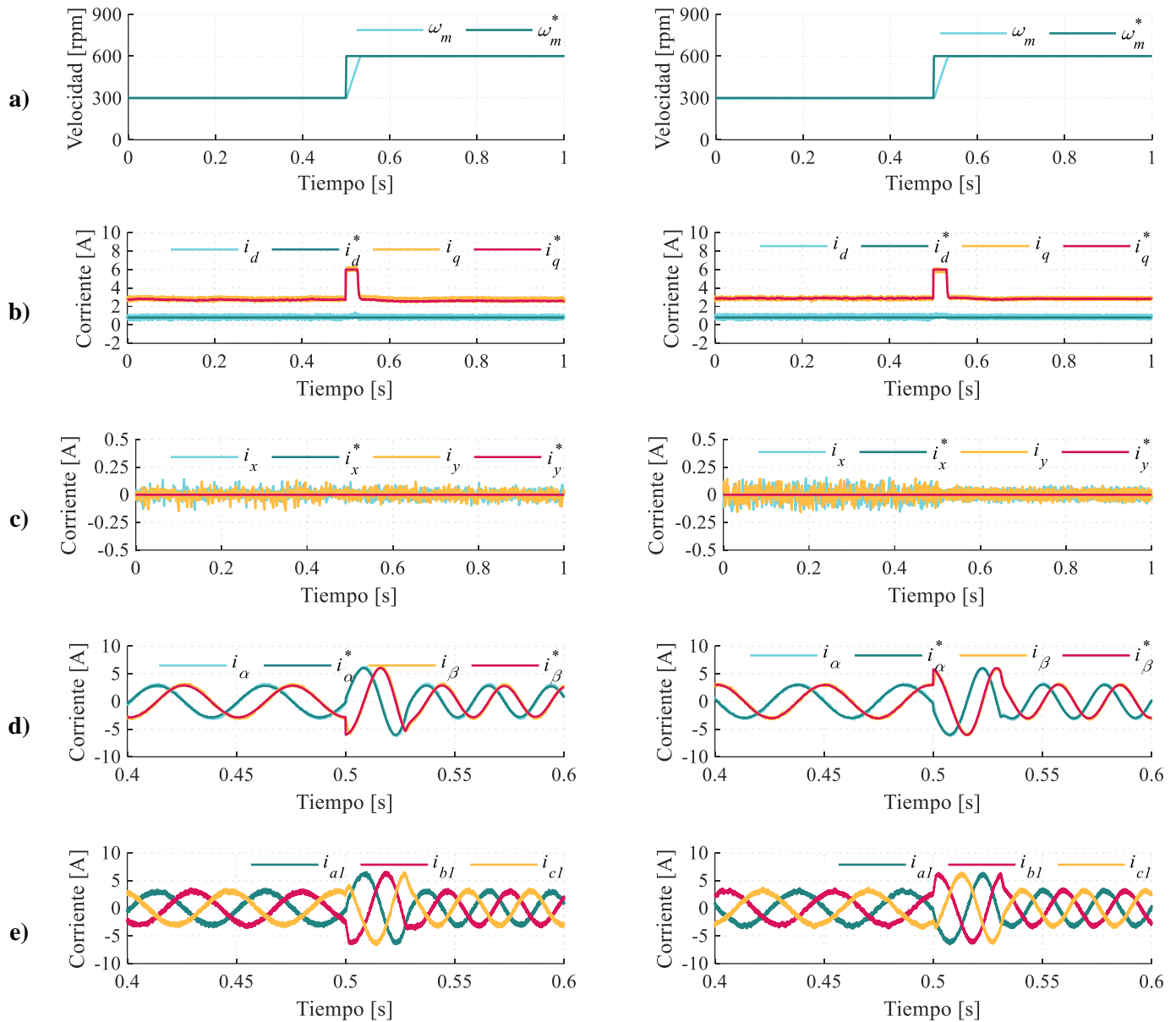


Figura 32 – Respuesta del sistema en análisis dinámico (simulación). Control predictivo multivectorial (izquierda) y control predictivo multivectorial con horizonte extendido (derecha): a) Velocidad de la máquina, b) Corrientes d-q, c) Corrientes x-y, d) Corrientes α - β , e) Corrientes de fase.

Los resultados del sistema son los que se muestran en la *Tabla 8*.

PARÁMETRO	VALOR	
	CONTROL PREDICTIVO MULTIVECTORIAL	CONTROL PREDICTIVO MULTIVECTORIAL CON HORIZONTE EXTENDIDO
Velocidad de referencia (ω^*)	300 [rpm] para $t < 0,5$ [s] 600 [rpm] para $t \geq 0,5$ [s]	300 [rpm] para $t < 0,5$ [s] 600 [rpm] para $t \geq 0,5$ [s]
Par de carga (τ)	5 [Nm]	5 [Nm]
Desviación estándar de las corrientes xy (σ_{xy})	0,0478 [A]	0,0323 [A]
Tasa de distorsión armónica (THD)	8,7919 %	8,7158 %
Error en el seguimiento de la velocidad	1,2465 [rpm]	1,1557 [rpm]
Error en el seguimiento de las corrientes $d-q$	0,0514 [A]	0,0389 [A]
Valor <i>rms</i> de las corrientes $\alpha-\beta$	2,2324 [A]	2,1743 [A]
Valor <i>rms</i> medio de las corrientes de fase	2,2411 [A]	2,1825 [A]

Tabla 8 – Comparación de los resultados del sistema en simulación para el control predictivo multivectorial y para el control predictivo multivectorial con horizonte extendido

Finalmente, con el objetivo de cuantificar la variación en el tiempo de respuesta del control propuesto, a continuación, se superpondrán las gráficas de velocidad y de la corriente q . Los resultados obtenidos han sido los siguientes. En primer lugar, analizando la *Figura 33a* se puede observar que el control predictivo con horizonte extendido mejora sensiblemente la velocidad de respuesta del control ante cambios en la velocidad de referencia. Esta mejora se puede ver reflejada de forma empírica en la *Tabla 9*, por medio de parámetros como el tiempo de establecimiento según el criterio del 5% y del 10% o del tiempo de subida, mediante los cuales se obtiene una mejora media en torno al 8,6 %. Por último, analizando la *Figura 33b* y la *Figura 33c* se puede apreciar que, existe una clara mejoría en cuanto a la velocidad de respuesta del control a favor del propuesto, tanto en la corriente q como en su valor de referencia. Por último, el motivo de la diferencia en el tiempo de respuesta del sistema en la corriente q frente a la velocidad se debe al efecto de filtrado de la máquina en la variable mecánica.

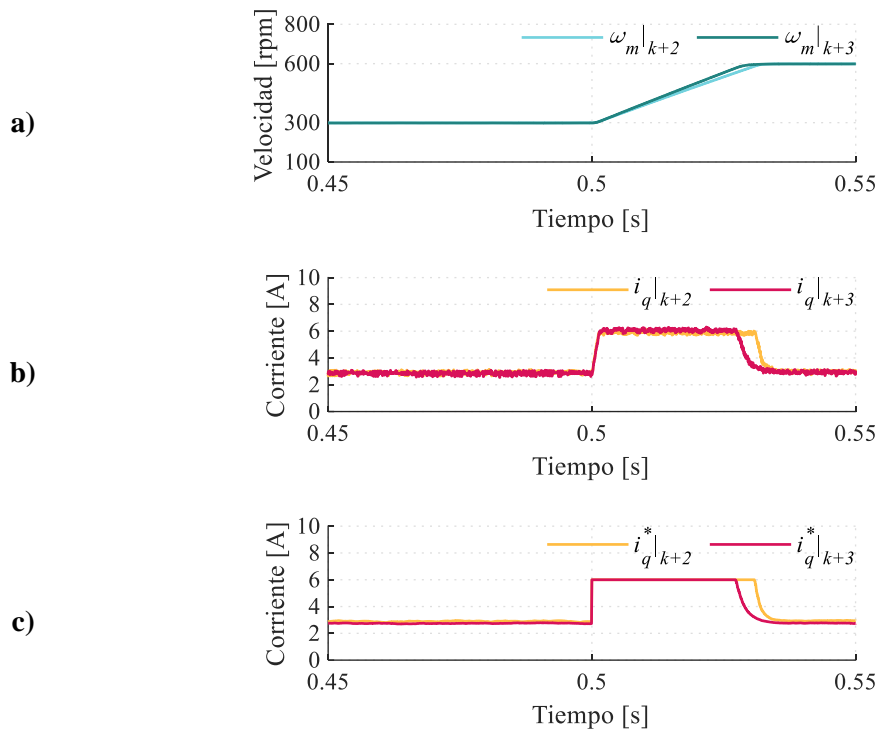


Figura 33 - Comparación de la respuesta en simulación del control predictivo multivectorial y del control predictivo multivectorial con horizonte extendido en análisis dinámico. a) Velocidad de la máquina, b) Corriente q, c) Corriente q de referencia.

Los resultados obtenidos son los que se muestran en la *Tabla 9*.

PARÁMETRO		VALOR		
		CONTROL PREDICTIVO MULTIVECTORIAL	CONTROL PREDICTIVO MULTIVECTORIAL CON HORIZONTE EXTENDIDO	MEJORA PORCENTUAL
VELOCIDAD	Tiempo de establecimiento (criterio del 5%)	29,0 [ms]	26,5 [ms]	8,62 %
	Tiempo de establecimiento (criterio del 10%)	25,8 [ms]	23,6 [ms]	8,53 %
	Tiempo de subida	35,1 [ms]	33,3 [ms]	5,13 %

Tabla 9 - Comparación de la respuesta en simulación del control predictivo multivectorial y del control predictivo multivectorial con horizonte extendido en análisis dinámico.

CAPÍTULO 7: RESULTADOS EXPERIMENTALES

7.1. INTRODUCCIÓN.

En este capítulo, tras haber validado de forma simulada el esquema de control propuesto, se procederá a su validación de forma experimental en la bancada del laboratorio 3507LII de la Escuela de Ingenierías Industriales (UMA). En primer lugar, se introducirán y describirán brevemente los diferentes elementos de la bancada junto a los parámetros que los caracterizan, tras lo cual se presentarán los resultados obtenidos.

7.2. ELEMENTOS DE LA BANCADA.

La bancada está compuesta principalmente por una máquina eléctrica de inducción de seis fases asimétrica alimentada por dos convertidores trifásicos de dos niveles. Dichos convertidores se encuentran alimentados por una fuente de corriente continua común. El control de los convertidores se lleva a cabo por medio de un DSP incluido en un módulo de control. En este mismo módulo de control se incluye el sistema de sensores, compuesto por cuatro sondas de corriente tipo Hall, así como un encoder incremental.

Con el objetivo de estudiar el comportamiento de la máquina ante diferentes condiciones de carga, se acopla una máquina de corriente continua en el eje de la máquina de seis fases, actuando como una carga. El circuito de armadura de la máquina de corriente continua se encuentra conectado a una serie de resistencias pasivas, siendo de esta manera el par de carga que ofrece la máquina dependiente de su velocidad. La *Figura 34* muestra una fotografía de la bancada experimental utilizada para implementar el control multivectorial con horizonte extendido, mientras que en la *Figura 35* se muestra un esquema de la misma.

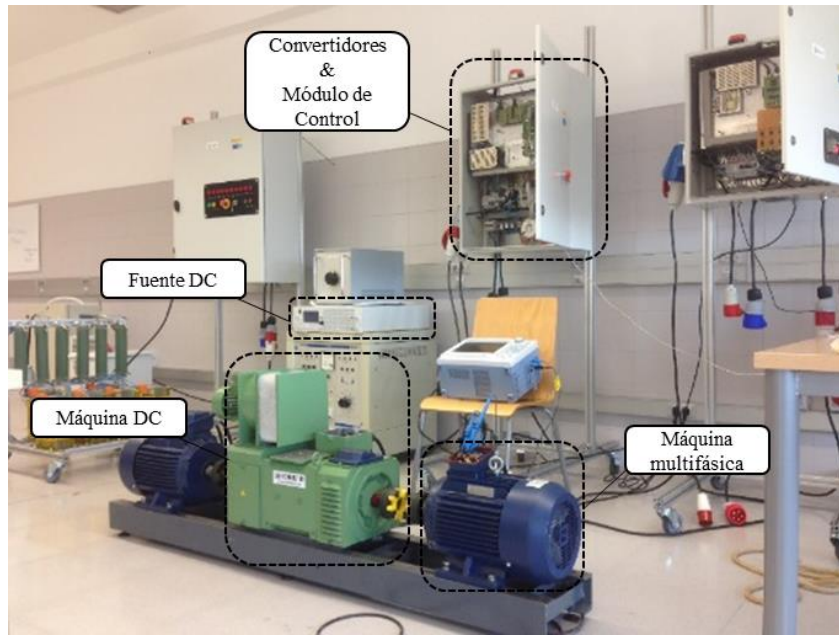


Figura 34 - Fotografía de la bancada experimental [27]

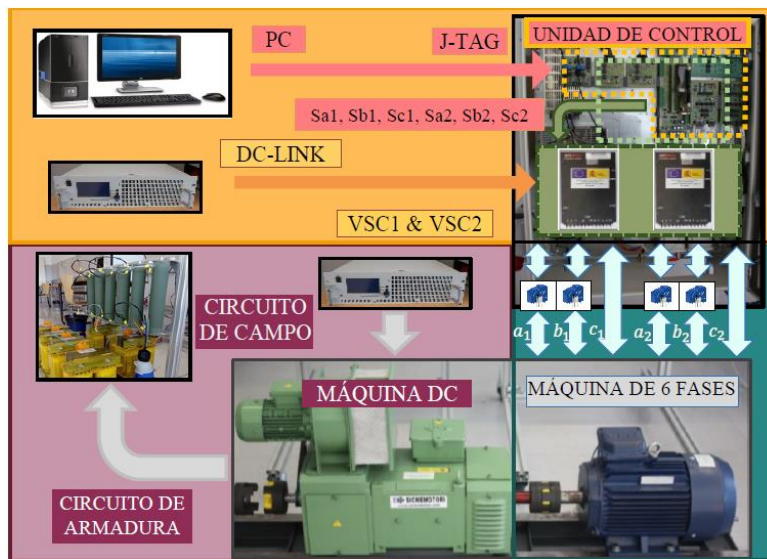


Figura 35 - Esquema de la bancada experimental

A continuación, se describen en mayor profundidad cada uno de los elementos de la bancada.

7.2.1. MÁQUINA DE INDUCCIÓN.

La máquina eléctrica empleada posee un rotor en jaula de ardilla y está compuesta por dos devanados trifásicos con distribución asimétrica desfasados 30° entre sí con sus neutros aislados. En la *Figura 36* se muestra la máquina empleada mientras que, en la *Figura 37* se muestra el conexionado de los bornes de la misma. Por su lado, los parámetros de la máquina se recogen en la *Tabla 10*.

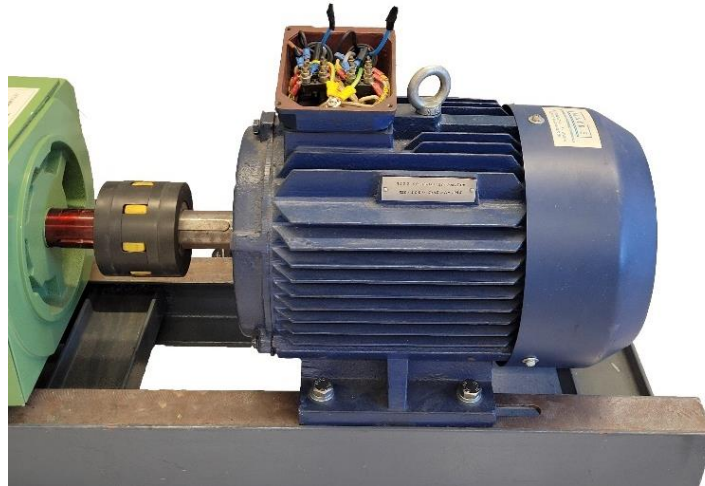


Figura 36 - Máquina asíncrona hexafásica empleada [7]

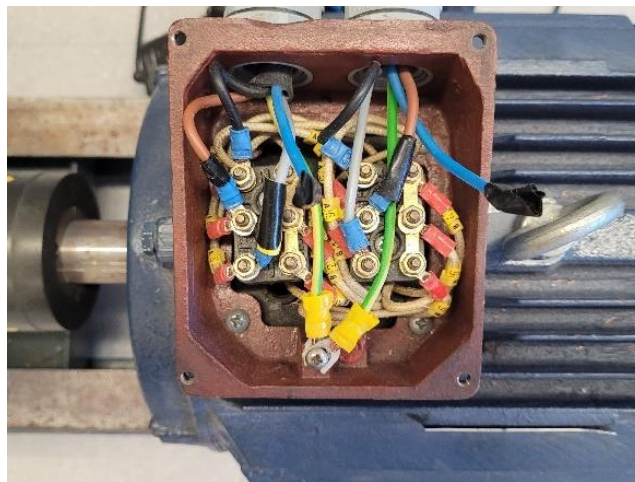


Figura 37 - Detalle del conexionado de los bornes de la máquina eléctrica [7]

PARÁMETRO	VALOR
Velocidad angular nominal	1000 rpm
Corriente pico	4,06 A
Potencia de la máquina	0,8 kW
Resistencia del estátor (R_s)	14,2 Ω
Resistencia del rotor (R_r)	2,4 Ω
Inductancia mutua (L_m)	420 mH
Inductancia de fuga del estátor (L_{ls})	1,5 mH
Inductancia de fuga del rotor (L_{lr})	55 mH

Tabla 10 - Parámetros de la máquina hexafásica

7.2.2. CONVERTIDORES DE TENSIÓN.

Este elemento es el encargado de aplicar directamente sobre la máquina eléctrica de inducción aquellos estados de conmutación que han sido seleccionados como óptimos por la etapa de control. Internamente, estos convertidores están compuestos por seis interruptores del tipo IGBT con un diodo de libre circulación colocado en configuración antiparalelo para cada uno de ellos. El modelo empleado es el “SKS-22F” de la compañía Semikron. Dicho convertidor se muestra en la *Figura 38* y sus características en la *Tabla 11*.



Figura 38 - Convertidor de tensión [7]

PARÁMETRO	VALOR
Intensidad eficaz máxima	22 A
Dead-time	4 μ s
Frecuencia máxima de los interruptores	15 kHz
Tensión máxima admisible del <i>bus</i> de continua	750 V

Tabla 11 - Características del convertidor de tensión

7.2.3. FUENTE DE CORRIENTE CONTINUA.

Este es el elemento es el encargado de alimentar los convertidores electrónicos de potencia. El modelo de la fuente empleada, que se muestra en la *Figura 39*, es el “LB/HP 15300” de la compañía ET System.



Figura 39 - Fuente de corriente continua [7]

7.2.4. MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA.

La máquina de corriente continua empleada es la que se muestra la *Figura 40*. Además de actuar como par de carga para la máquina de inducción, también tiene acoplada a su eje el encoder incremental encargado de medir la velocidad mecánica del sistema.



Figura 40 - Máquina de corriente continua [7]

7.2.5. SISTEMA DE CONTROL.

Este elemento, que se muestra en la *Figura 41*, está compuesto de diversos sensores encargados de registrar distintas variables de la máquina, como las corrientes de fase, empleando para ello sondas Hall o la velocidad mecánica de la misma, para lo que se usa un *encoder* digital. Además, cuenta con una serie de placas de adaptación cuyo objetivo es adaptar las señales captadas por los sensores a los valores de tensión con las que trabaja el DSP. Estas placas se muestran en *Figura 42*.



Figura 41 - Sistema de control [7]

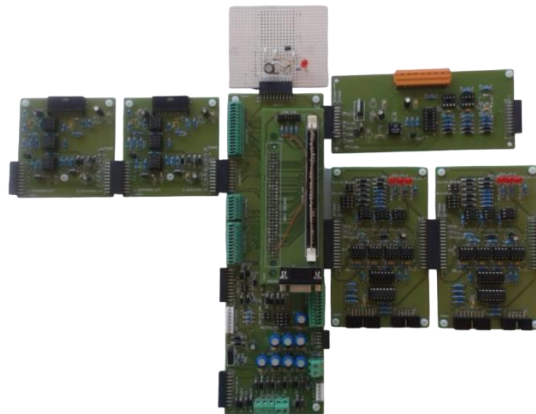


Figura 42 - Placas de adaptación [26]

7.2.6. OSCILOSCOPIO.

Para visualizar las corrientes de fase de la máquina, se hará uso de un osciloscopio, como el mostrado en la *Figura 43*, de la marca Yokogawa y modelo “DL850”.



Figura 43 - Osciloscopio empleado para visualizar las corrientes de fase [7]

7.3. RESULTADOS.

Una vez presentados los elementos que conforman la bancada experimental, en este apartado se presentarán los resultados obtenidos de forma experimental para corroborar su validez frente a los de simulación.

7.3.1. TEST 1: ANÁLISIS DE LA CALIDAD Y SEGUIMIENTO DE LAS CORRIENTES.

Del mismo modo que en el apartado 6.3.1, en este test se compara, en términos de calidad de corrientes y seguimientos de las mismas, la respuesta del control predictivo propuesto frente al control predictivo multivectorial con el mismo punto de operación de la máquina. Los resultados obtenidos experimentalmente han sido los siguientes.

En la *Figura 44a* se puede observar que el seguimiento de la velocidad de referencia es realizado de forma adecuada por ambos controles, sin errores de seguimiento apreciables, como se observa en la *Tabla 12*. En cuanto a las corrientes d - q , en la *Figura 44b* se puede observar que el rizado de estas es mínimo y siguen sin errores significativos sus referencias, como se puede comprobar además en la *Tabla 12*, en contraposición a lo que ocurría en los resultados de simulación, donde aparecía un *offset* entre la corriente q y su referencia. Por último, en la *Figura 44c*, d y e se puede apreciar cómo la solución multivectorial con horizonte extendido no tiene gran impacto ni en la calidad ni en el seguimiento de las corrientes x - y , α - β y de fase frente al control multivectorial, lo cual se puede comprobar en la *Tabla 12*.

Finalmente, se puede concluir que el empeoramiento en los resultados experimentales respecto a los simulados puede deberse a que al utilizarse una vez más el modelo de predicción, un pequeño error en los parámetros de la máquina provoca que la predicción sea más incorrecta, empeorando el comportamiento de la máquina.

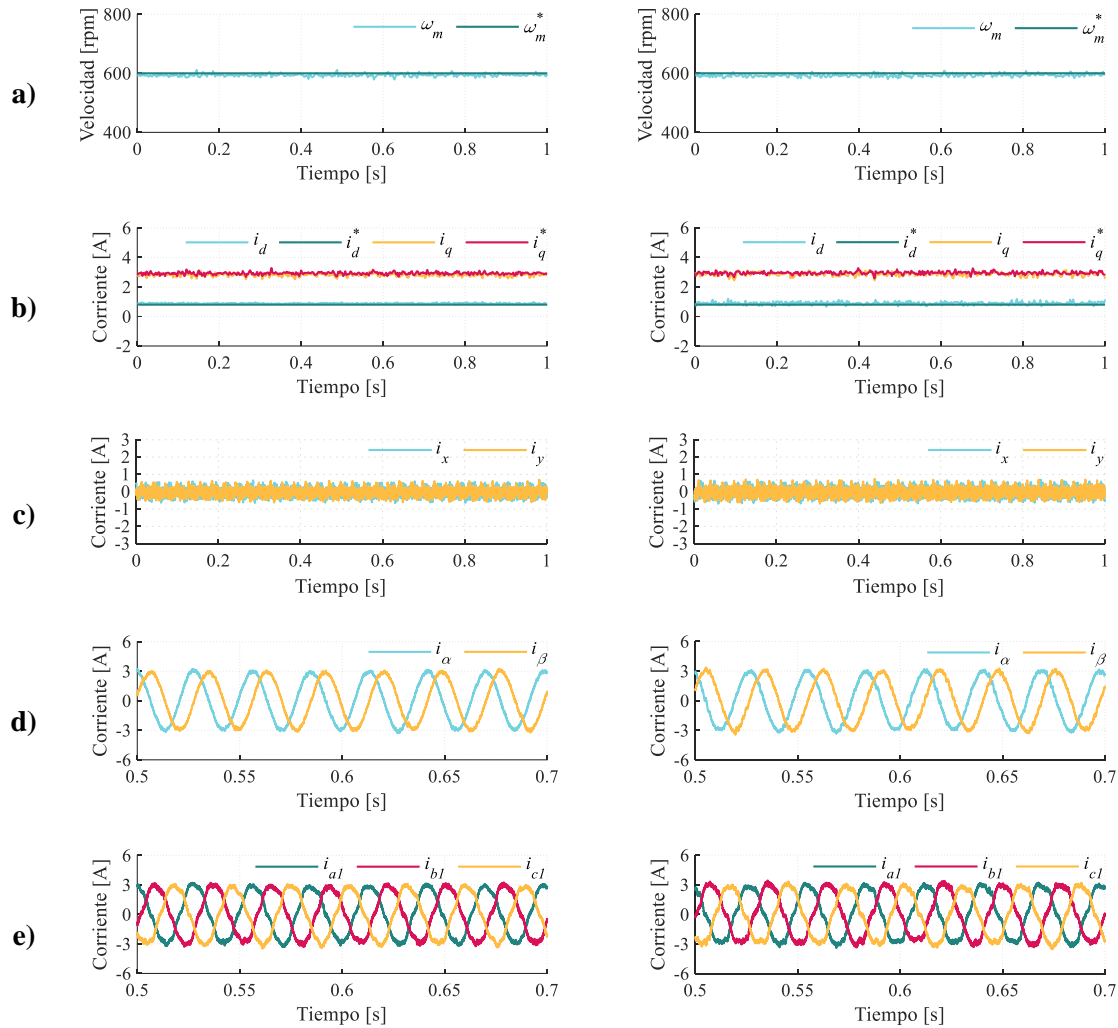


Figura 44 – Respuesta experimental del sistema. Control predictivo multivectorial (izquierda) y control predictivo multivectorial con horizonte extendido (derecha): a) Velocidad de la máquina, b) Corrientes d-q, c) Corrientes x-y, d) Corrientes α - β , e) Corrientes de fase

Los resultados del sistema son los que se muestran en la Tabla 12.

PARÁMETRO	VALOR	
	CONTROL PREDICTIVO MULTIVECTORIAL	CONTROL PREDICTIVO MULTIVECTORIAL CON HORIZONTE EXTENDIDO
Velocidad de referencia (ω^*)	600 [rpm]	600 [rpm]
Desviación estándar de las corrientes xy (σ_{xy})	0,2018 [A]	0,2179 [A]
Tasa de distorsión armónica (THD)	9,7297 %	10,3321 %
Error en el seguimiento de las corrientes $d-q$	0,0222 [A]	0,0278 [A]
Valor rms de las corrientes $\alpha-\beta$	2,0390 [A]	2,1208 [A]
Valor rms medio de las corrientes de fase	2,1038 [A]	2,1321 [A]

Tabla 12 – Comparación de los resultados experimentales del sistema para el control predictivo multivectorial y para el control predictivo multivectorial con horizonte extendido

7.3.2. TEST 2: ANÁLISIS DINÁMICO DEL CONTROL.

Posteriormente, del mismo modo que en el apartado 6.3.2, en este test se compara el comportamiento del control ante cambios bruscos en la velocidad de referencia, acelerando la máquina a controlar en el instante $t = 0,5$ s de 300 rpm a 600 rpm imponiendo para ello una señal de referencia de velocidad rectangular.

En la *Figura 45a* se puede observar cómo, al igual que ocurría en el caso simulado, el seguimiento de la referencia de velocidad es adecuado en ambos controles, contando con menos error el control predictivo multivectorial a excepción del instante en el que la máquina acelera, donde no se sigue de forma exacta la referencia ya que esta no es capaz de responder de forma instantánea. En cuanto a las corrientes $d-q$, en la *Figura 45b* se puede observar que no hay gran variación entre ambos controles. Por último, en la *Figura 45c*, d y e se puede apreciar cómo, al igual que en el caso anterior no hay grandes diferencias en la calidad de las corrientes ni en el seguimiento frente al control multivectorial de las corrientes $x-y$, $\alpha-\beta$ y de fase.

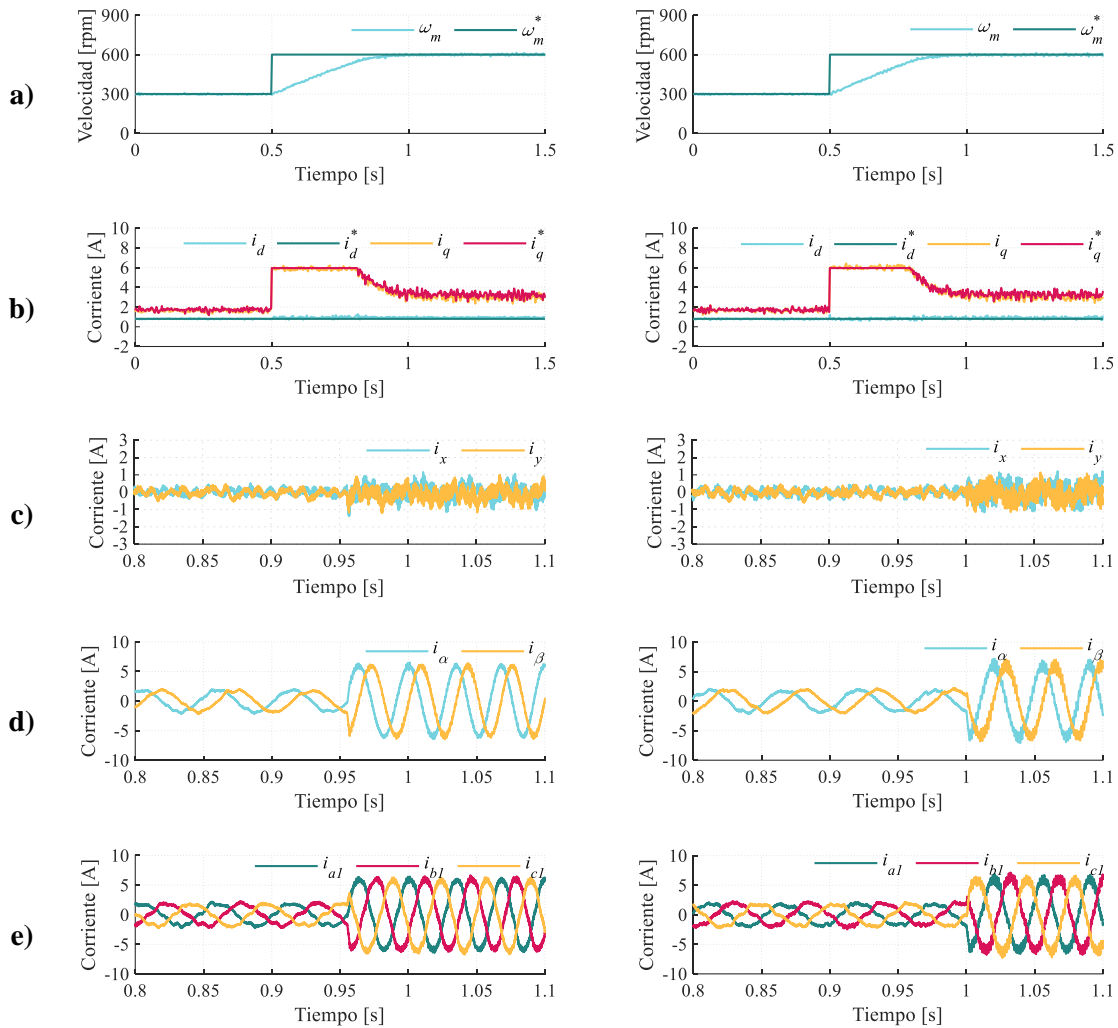


Figura 45 – Respuesta experimental del sistema en análisis dinámico. Control predictivo multivectorial (izquierda) y control predictivo multivectorial con horizonte extendido (derecha): a) Velocidad de la máquina, b) Corrientes d-q, c) Corrientes x-y, d) Corrientes α - β , e) Corrientes de fase

A continuación, se superpondrán las gráficas de la evolución de la velocidad y la corriente q de la máquina con el tiempo para ambos controles con el objetivo de comprobar la mejora en el tiempo de respuesta que se obtuvo en los resultados de simulación. En primer lugar, analizando la Figura 46a se puede observar cómo el control predictivo con horizonte extendido no mejora en gran medida la velocidad de respuesta del control ante cambios de velocidad, como se observaba en los resultados simulados. Sin embargo, observando la Figura 46b se puede apreciar que, en términos de corriente q , tanto medida como de referencia, el control con horizonte extendido proporciona una pequeña mejora en cuanto a velocidad de respuesta. Por su parte, al igual que en el caso simulado, en la Tabla 13 se puede cuantificar esta mejoría en términos numéricos, analizando para ello el tiempo de establecimiento según el criterio del 5%

y el 10% o el tiempo de subida. Mediante estos parámetros, se puede apreciar cómo existe una mejora media del 5% en la velocidad de respuesta a favor del control propuesto. Finalmente, cabe destacar que la mejoría en términos de corrientes no se ve reflejada en términos de velocidad debido al filtrado de la máquina en la variable mecánica.

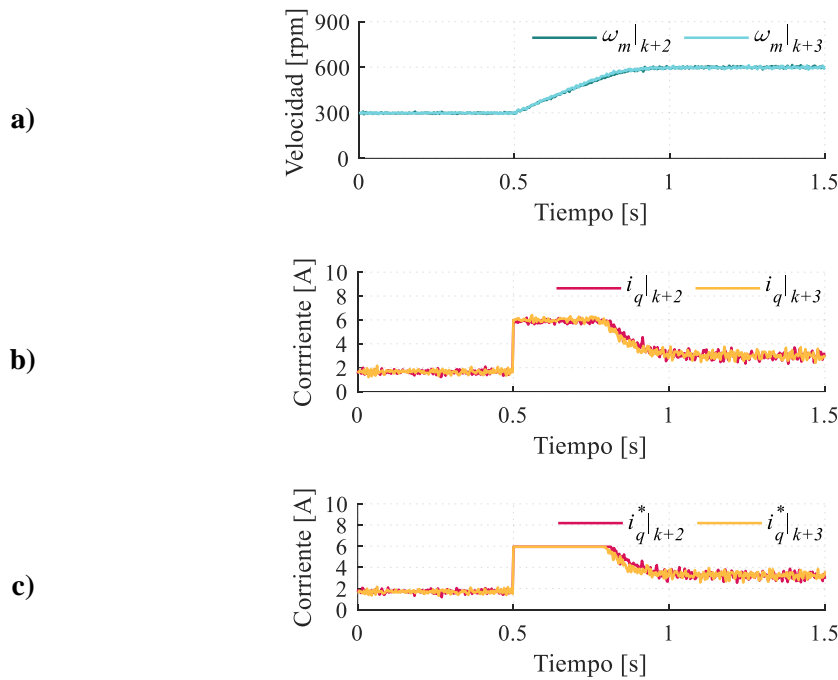


Figura 46 - Comparación de la respuesta experimental del control predictivo multivectorial y del control predictivo multivectorial con horizonte extendido en análisis dinámico.

PARÁMETRO		VALOR		
		CONTROL PREDICTIVO MULTIVECTORIAL	CONTROL PREDICTIVO MULTIVECTORIAL CON HORIZONTE EXTENDIDO	MEJORA PORCENTUAL
VELOCIDAD	Tiempo de establecimiento (criterio del 5%)	334,60 [ms]	319,20 [ms]	4,60 %
	Tiempo de establecimiento (criterio del 10%)	296,70 [ms]	280,80 [ms]	5,36 %
	Tiempo de subida	511,10 [ms]	506,50 [ms]	0,90 %

Tabla 13 - Comparación de la respuesta experimental del control predictivo multivectorial y del control predictivo multivectorial con horizonte extendido en análisis dinámico.



CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

8.1. CONCLUSIONES.

La potencia, el rendimiento y la fiabilidad son tres de los principales objetivos que se buscan en el desarrollo de accionamientos eléctricos destinados al campo de los vehículos eléctricos de competición. En este ámbito, el control predictivo se posiciona como una opción a considerar para la regulación de estos accionamientos por su gran versatilidad y flexibilidad, sin embargo, de cara a cumplir con las características mencionadas anteriormente hay que solventar los dos talones de Aquiles con los que históricamente ha contado el control predictivo, como son la pobre calidad de corrientes o el seguimiento de las corrientes a controlar.

Dentro de este escenario, el control predictivo multivectorial con horizonte de predicción extendido diseñado en el Capítulo 5 se posiciona, en términos de velocidad, como una estrategia de control interesante en aplicaciones de alto rendimiento como la Fórmula E. Sin embargo, experimentalmente en términos de corrientes no se ha conseguido la mejoría esperada que se obtuvo en los resultados simulados debido a que al utilizarse una vez más el modelo de predicción, un pequeño error en los parámetros de la máquina provoca una predicción menos correcta. Este hecho promueve la necesidad del desarrollo de técnicas de estimación de parámetros que arrojen una estimación más precisa.

A pesar de esto, el control multivectorial con horizonte de predicción extendido ha sido probado de forma simulada y experimental cumpliendo los objetivos principales del presente Trabajo de Fin de Grado.

8.2. LÍNEAS FUTURAS.

Las posibles futuras líneas de trabajo del presente Trabajo de Fin de Grado se muestran a continuación:

- a) Desarrollo de esquemas multivectoriales con un mayor número de horizontes de predicción.



- b) Mejorar la estimación de los parámetros de la máquina.
- c) Implementación del esquema de control diseñado en máquinas de más de seis fases.
- d) Selección de otro conjunto de vectores virtuales para la implementación del esquema de control diseñado.
- e) Estudio de la tolerancia al fallo en esquemas de control multivectoriales con horizonte de predicción extendido.
- f) Desarrollo de técnicas de estimación de parámetros.

REFERENCIAS

- [1] «Global Carbon Project», *Global CO₂ emissions from fossil fuels*. www.globalcarbonproject.org (accedido 30 de abril de 2023).
- [2] T. Anderson, E. Hawkins, y P. Jones, «CO₂, the greenhouse effect and global warming: From the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models», *Endeavour*, vol. 40, abr. 2016, doi: 10.1016/j.endeavour.2016.07.002.
- [3] «Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático», *El Acuerdo de París*. www.unfccc.int (accedido 30 de abril de 2023).
- [4] «Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático», *El proceso internacional de lucha contra el cambio climático*. www.miteco.gob.es (accedido 30 de abril de 2023).
- [5] «Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático», *¿Qué es la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático?* www.unfccc.int (accedido 30 de abril de 2023).
- [6] R. Leal-Arcas, «Kyoto and the COPs: Lessons Learned and Looking Ahead», may 2011.
- [7] J. Montenegro Navarro, «TFG: Control Predictivo con Memoria Aplicado a Sistemas Eléctricos Multifásicos».
- [8] Á. González Prieto, «TFM: Control Predictivo Eficiente con Tolerancia Natural al Fallo para Máquinas de Inducción Multifásicas».
- [9] M. J. Duran y F. Barrero, «Recent Advances in the Design, Modeling, and Control of Multiphase Machines—Part II», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, n.º 1, pp. 459-468, 2016, doi: 10.1109/TIE.2015.2448211.
- [10] F. Barrero y M. J. Duran, «Recent Advances in the Design, Modeling, and Control of Multiphase Machines—Part I», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, n.º 1, pp. 449-458, 2016, doi: 10.1109/TIE.2015.2447733.
- [11] M. J. Duran, E. Levi, y F. Barrero, «Multiphase Electric Drives: Introduction», en *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 2017, pp. 1-26. doi: 10.1002/047134608x.w8364.
- [12] J. Carrillo Ríos, «TFG: Impacto de la no-linealidad en el control predictivo de las máquinas multifásicas».

- [13] «ABB FIA Formula E World Championship», *Welcome To The Story Of The ABB FIA Formula E World Championship*, Accedido: 30 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: www.fiaformulae.com
- [14] H. E. Næss, *Innovation, sustainability and management in motorsports : the case of Formula E*. en Palgrave pivot. Cham: Springer Nature, 2021.
- [15] «ABB FIA Formula E World Championship», *What is Formula E?*, Accedido: 30 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.fiaformulae.com/>
- [16] «PowerTrain Product Booklet - Technical Information», 2017.
- [17] Z. Bi, T. Kan, C. C. Mi, Y. Zhang, Z. Zhao, y G. A. Keoleian, «A review of wireless power transfer for electric vehicles: Prospects to enhance sustainable mobility», *Appl Energy*, vol. 179, pp. 413-425, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.003>.
- [18] «ABB», *Official Charging Partner - Formula E*. www.new.abb.com (accedido 1 de mayo de 2023).
- [19] C. Iclodean, B. Varga, N. Burnete, D. Cimerdean, y B. Jurchiş, «Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles», *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 252, p. 12058, may 2017, doi: [10.1088/1757-899X/252/1/012058](https://doi.org/10.1088/1757-899X/252/1/012058).
- [20] «FIA Formula E», *McLaren To Supply New Formula E Battery*. www.fiaformulae.com (accedido 1 de mayo de 2023).
- [21] «Mc Laren Applied», *Formula E technology explained*. www.mclarenapplied.com (accedido 1 de mayo de 2023).
- [22] «ABB FIA Formula E», *ABB FIA Formula E Championship – completing the circuit*. www.new.abb.com (accedido 1 de mayo de 2023).
- [23] «Car Magazine», *In-depth: the Formula E powertrain explained*. www.carmagazine.co.uk (accedido 1 de mayo de 2023).
- [24] «Audi Media Center», *Audi presents e-tron FE07 for Formula E World Championship*. www.audi-mediacycenter.com (accedido 1 de mayo de 2023).
- [25] J. Fraile Mora, *Máquinas eléctricas*. Garceta Grupo Editorial, 2016.
- [26] P. García Entrambasaguas, «TFM “Control Directo de Par y Vectores Virtual para una Máquinas de Inducción de Seis Fases”», jun. 2017.
- [27] Á. González-Prieto, I. González-Prieto, M. J. Durán Martínez, y J. J. Aciego Gallardo, *Accionamientos eléctricos. Fundamentos, control y aplicaciones*. Ediciones Paraninfo, S.A, 2022.
- [28] «Audi Sport», *Audi RS Q E-Tron E1*. www.audi.com (accedido 6 de mayo de 2023).
- [29] I. Gonzalez-Prieto, M. J. Duran, J. J. Aciego, P. Entrambasaguas, y A. Gonzalez-Prieto, «Model Predictive Control for Multiphase Electric Drives».
- [30] H. S. Che, E. Levi, M. Jones, W.-P. Hew, y N. Abd. Rahim, «Current Control Methods for an Asymmetrical Six-Phase Induction Motor Drive», *IEEE Trans Power Electron*, vol. 29, n.º 1, pp. 407-417, 2014, doi: [10.1109/TPEL.2013.2248170](https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2248170).

- [31] R. K. K, D. Sankar, y H. T, «A Comprehensive Review on Finite Control Set Model Predictive Control: Trends and Prospects», en *2022 Third International Conference on Intelligent Computing Instrumentation and Control Technologies (ICICICT)*, 2022, pp. 206-210. doi: 10.1109/ICICICT54557.2022.9917601.
- [32] I. Gonzalez-Prieto, M. J. Duran, J. J. Aciego, C. Martin, y F. Barrero, «Model Predictive Control of Six-Phase Induction Motor Drives Using Virtual Voltage Vectors», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, n.º 1, pp. 27-37, 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2714126.
- [33] A. S. Abdel-Khalik, M. S. Abdel-Majeed, y S. Ahmed, «Effect of Winding Configuration on Six-Phase Induction Machine Parameters and Performance», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 223009-223020, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3044025.
- [34] I. Gonzalez-Prieto, M.J. Duran, A. Gonzalez-Prieto, y J.J. Aciego, «A Proof-of-Concept Study of Multistep Model Predictive Control for Multiphase Electric Drives», 2022.
- [35] A. Gonzalez-Prieto, C. Martin, I. González-Prieto, M. J. Duran, J. Carrillo-Ríos, y J. J. Aciego, «Hybrid Multivector FCS–MPC for Six-Phase Electric Drives», *IEEE Trans Power Electron*, vol. 37, n.º 8, pp. 8988-8999, 2022, doi: 10.1109/TPEL.2022.3154470.
- [36] M. J. Durán, I. Gonzalez-Prieto, y A. Gonzalez-Prieto, «Large virtual voltage vectors for direct controllers in six-phase electric drives», *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 125, p. 106425, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106425>.

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Topología de un vehículo de Fórmula E</i>	13
<i>Figura 2 - Diseño de un cargador de Fórmula E [18]</i>	14
<i>Figura 3 - Batería de segunda generación de Mc Laren [23]</i>	15
<i>Figura 4 - Composición interna de la batería de segunda generación de Mc Laren [23]</i>	16
<i>Figura 5 - Topología del convertidor continua-alterna [23]</i>	17
<i>Figura 6 – Máquina eléctrica junto al convertidor electrónico de potencia "Audi MGU05" [25]</i>	17
<i>Figura 7 - Esquema del rotor en jaula de ardilla de una máquina asíncrona [28]</i>	19
<i>Figura 8 - Esquema del sistema de control</i>	19
<i>Figura 9 - Configuraciones de devanados de una máquina hexafásica</i>	21
<i>Figura 10 - Audi RS Q-Etron E1 [29]</i>	23
<i>Figura 11 - Audi Q-ETRON FE07 [25]</i>	23
<i>Figura 12 - Esquema del convertidor electrónico de potencia</i>	24
<i>Figura 13 - Representación del vector x en el sistema de referencia abc [7]</i>	26
<i>Figura 14 - Representación del vector x en el sistema de referencia $\alpha\text{-}\beta$ [7]</i>	26
<i>Figura 15 - Representación del vector x en el sistema de referencia $d\text{-}q$ [7]</i>	27
<i>Figura 16 - Esquema del convertidor electrónico de potencia [7]</i>	31
<i>Figura 17 - Proyecciones de las tensiones de fase en los subespacios $\alpha\text{-}\beta$ y $x\text{-}y$ [7]</i>	32
<i>Figura 18 - Esquema del control predictivo estándar</i>	34
<i>Figura 19 - Diagrama de flujo del control predictivo estándar</i>	35

<i>Figura 20 - Representación de un par de vectores virtuales seleccionados.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 21 - Representación de los vectores virtuales de tensión en el subespacio x-y</i>	<i>38</i>
<i>Figura 22 - Representación de un cuarteto de vectores para el MV5-MPC</i>	<i>39</i>
<i>Figura 23 - Representación de los cuartetos de vectores para el MV5-MPC</i>	<i>39</i>
<i>Figura 24 - Representación del periodo de control.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 25 - Esquema del control predictivo con horizonte extendido.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 26 - Diagrama de flujo del control predictivo con horizonte extendido.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 27 - Esquema de bloques del simulador</i>	<i>45</i>
<i>Figura 28 - Bloque de control.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 29 - Bloque del convertidor de tensión.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 30 - Bloque de la máquina de inducción de 6 fases.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 31 – Respuesta del sistema en simulación. Control predictivo multivectorial (izquierda) y control predictivo multivectorial con horizonte extendido (derecha): a) Velocidad de la máquina, b) Corrientes d-q, c) Corrientes x-y, d) Corrientes α-β, e) Corrientes de fase</i>	<i>49</i>
<i>Figura 32 – Respuesta del sistema en análisis dinámico (simulación). Control predictivo multivectorial (izquierda) y control predictivo multivectorial con horizonte extendido (derecha): a) Velocidad de la máquina, b) Corrientes d-q, c) Corrientes x-y, d) Corrientes α-β, e) Corrientes de fase.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 33 - Comparación de la respuesta en simulación del control predictivo multivectorial y del control predictivo multivectorial con horizonte extendido en análisis dinámico.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 34 - Fotografía de la bancada experimental [28]</i>	<i>56</i>
<i>Figura 35 - Esquema de la bancada experimental.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 36 - Máquina asíncrona hexafásica empleada [7].....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 37 - Detalle del conexionado de los bornes de la máquina eléctrica [7].....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 38 - Convertidor de tensión [7].....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 39 - Fuente de corriente continua [7].....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 40 - Máquina de corriente continua [7]</i>	<i>59</i>
<i>Figura 41 - Sistema de control [7]</i>	<i>60</i>



<i>Figura 42 - Placas de adaptación [27]</i>	<i>60</i>
<i>Figura 43 - Osciloscopio empleado para visualizar las corrientes de fase [7]</i>	<i>61</i>
<i>Figura 44 – Respuesta experimental del sistema. Control predictivo multivectorial (izquierda) y control predictivo multivectorial con horizonte extendido (derecha): a) Velocidad de la máquina, b) Corrientes d-q, c) Corrientes x-y, d) Corrientes α-β, e) Corrientes de fase</i>	<i>62</i>
<i>Figura 45 – Respuesta experimental del sistema en análisis dinámico. Control predictivo multivectorial (izquierda) y control predictivo multivectorial con horizonte extendido (derecha): a) Velocidad de la máquina, b) Corrientes d-q, c) Corrientes x-y, d) Corrientes α-β, e) Corrientes de fase</i>	<i>64</i>
<i>Figura 46 - Comparación de la respuesta experimental del control predictivo multivectorial y del control predictivo multivectorial con horizonte extendido en análisis dinámico.</i>	<i>65</i>



ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 - Características de la batería de segunda generación de McLaren.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 2 - Características del convertidor electrónico de potencia "Audi MGU05".....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 3 - Características del vehículo de competición "Audi RS Q-Etron E1"</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 4 - Combinaciones de vectores maestros y esclavos.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 5 – Parámetros del controlador PI.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 6 - Parámetros de la máquina de inducción de 6 fases</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 7 – Comparación de los resultados del sistema en simulación para el control predictivo multivectorial y para el control predictivo multivectorial con horizonte extendido.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 8 – Comparación de los resultados del sistema en simulación para el control predictivo multivectorial y para el control predictivo multivectorial con horizonte extendido.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 9 - Comparación de la respuesta en simulación del control predictivo multivectorial y del control predictivo multivectorial con horizonte extendido en análisis dinámico.</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 10 - Parámetros de la máquina hexafásica</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 11 - Características del convertidor de tensión.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 12 – Comparación de los resultados experimentales del sistema para el control predictivo multivectorial y para el control predictivo multivectorial con horizonte extendido.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 13 - Comparación de la respuesta experimental del control predictivo multivectorial y del control predictivo multivectorial con horizonte extendido en análisis dinámico.</i>	<i>65</i>