



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:

RESUMEN

Estos últimos años se ha visto un gran cambio de rumbo en las inversiones de las grandes empresas del sector automovilístico en cuanto al cambio del motor de combustión interna tradicional, por uno eléctrico o una combinación de los dos. Con motivo de esta irrupción y viendo la tendencia que se prevé, el objetivo de este TFG es realizar un análisis del vehículo eléctrico y todas sus características que han hecho posible esta mediática irrupción, pero nos centraremos especialmente en el estudio de las diferentes tecnologías que utilizan diversos tipos de motores eléctricos, con la finalidad de definir cuales se adaptan mejor a los requisitos que exige el vehículo eléctrico.

Palabras clave: Vehículo eléctrico, Motor eléctrico, Eficiencia energética, Consumo energético

RESUM

Aquests últims anys s'ha vist un gran canvi de rumb en les inversions de les grans empreses del sector automobilístic quant al canvi del motor de combustió interna tradicional, per un elèctric o una combinació dels dos. Amb motiu d'aquesta irrupció i veient la tendència que es preveu, l'objectiu d'aquest TFG és realitzar una anàlisi del vehicle elèctric i totes les seues característiques que han fet possible aquesta mediàtica irrupció, però ens centrarem especialment en l'estudi de les diferents tecnologies que utilitzen diversos tipus de motors elèctrics, amb la finalitat de definir quins s'adapten millor als requisits que exigeix el vehicle elèctric.

Paraules clau: Vehicle elèctric, Motor elèctric, Eficiència energètica, Consum energètic

ABSTRACT

These last years has seen a big change of course in the investments of the big companies of the automotive sector regarding the change of the traditional engine of internal combustion, by one electrical or a combination of the two. Because of this irruption and seeing the tendency that it's expected, the aim of this TFG is to make an analysis of the electrical vehicle and all his characteristics that have made possible this media irruption, but will focus especially on the studio of the different technologies that use diverse types of electrical engines, with the purpose to define which adapt better to the requirements that demands the electrical vehicle.

Keywords: Electric vehicle, Electric motor, Energy efficiency, Energy consumption

ÍNDICE

OBJETIVOS.....	8
INTRODUCCIÓN	9
CONTEXTO	10
Económico	10
Ambiental.....	12
Social.....	13
Gubernamental.....	14
COMPONENTES.....	16
BATERÍAS.....	16
Tipos de baterías disponibles en el mercado	16
Caso de estudio.....	18
DRIVERS-CONTROL	20
Esquema de control	20
MOTOR-GENERADOR.....	22
Requisitos.....	22
Tipos de motores eléctricos.....	24
ESTADO ACTUAL	31
ANÁLISIS ECONÓMICO.....	36
ENSAYOS	41
Método de ensayo	41
Motor de corriente continua	42
Motor síncrono	55
Motor asíncrono o de inducción.....	67
Análisis comparativo de los resultados	73
CONCLUSIONES.....	78
PRESUPUESTO.....	82
ANEJOS.....	86
Anejo 1: Componentes básicos de los sistemas de control.....	86
Anejo 2: Principios de funcionamiento de las principales máquinas eléctricas.....	94
BIBLIOGRAFÍA	98

OBJETIVOS

Debido a la creciente concienciación social sobre introducir alternativas para la movilidad sostenible y el gran giro de objetivos de los principales fabricantes de automóviles, centrando ahora gran parte de sus esfuerzos en desarrollar vehículos eléctricos que puedan competir con los convencionales de combustión interna, se ha elegido que el tema de este TFG sea el vehículo eléctrico. Pero dentro de este campo, aún hay mucha incertidumbre en cómo resolver ciertos problemas, lo cual es normal, ya que el reto de conseguir un vehículo eléctrico que pueda competir con los de combustión interna, era hasta hace poco tiempo, una idea utópica.

Por lo que este proyecto se plantea como un análisis de los principales componentes distintivos del vehículo eléctrico, pero nos centraremos de manera especial en la parte del motor eléctrico, el elemento que proporciona la tracción al vehículo.

Se ha decidido centrar este trabajo en el aspecto de los motores eléctrico, ya que actualmente, no hay una tecnología claramente dominante en esta aplicación y los primeros modelos de vehículos eléctricos de los grandes fabricantes automovilísticos están montando diferentes tecnologías de motor eléctrico. Por tanto el principal objetivo de este trabajo es realizar un análisis de los diferentes tipos de motores candidatos a proporcionar la tracción a dicho vehículo, y mediante ensayos experimentales intentar identificar cual es la mejor opción para dicha aplicación.

Aparte de los motores, existen otros componentes, que son característicos del vehículo eléctrico y también presentan una importancia capital en aspectos fundamentales, como pueden ser las baterías con la autonomía del vehículo, o el control electrónico de todos los componentes, para un alto rendimiento. Lo que significa, que otro de los objetivos de este proyecto será el estudio de las soluciones alternativas para estos dos componentes, y la elección justificada de la mejor de ellas.

Con el objetivo de saber qué ventajas ofrece este concepto novedoso de transporte, que es el vehículo eléctrico, frente a los tradicionales de combustión interna, se realizará un estudio comparativo entre ambos tipos de vehículo, tanto analizando la parte económica, como la medioambiental.

Y por último, se pretende hacer un análisis actual de las diferentes características que tienen los vehículos eléctricos que están actualmente en el mercado, con el fin de analizar qué soluciones han planteado para sus modelos eléctricos, los diferentes fabricantes, y buscar relaciones de comportamiento entre ellas.

INTRODUCCIÓN

Como sabemos, un vehículo eléctrico es aquel que únicamente consume electricidad, y por tanto, su principal componente es un motor eléctrico, que transforma la energía eléctrica en par de tracción, que es comunicado directamente a las ruedas. Esta energía es suministrada por baterías recargables, que son capaces de almacenar energía eléctrica transformándola en química, para su posterior reconversión en eléctrica nuevamente.

Y cuando hablamos de coches eléctricos, no podemos pasar por alto los vehículos híbridos, ya que estos son los diferentes pasos del camino de adaptación del vehículo tradicional de combustión interna a un vehículo totalmente eléctrico, es por eso que dependiendo del grado de hibridación las características técnicas cambian, y para identificar esas especialidades, se clasifican en los siguientes grupos [1]:

- **Vehículos de combustión interna (VCI)**: hibridación nula, el motor de combustión interna es la única fuente de energía del vehículo, dispone de una batería que se usa solo para el arranque en frío del motor.
- **Vehículos start-stop**: bajo grado de hibridación, el motor de combustión interna se apaga automáticamente durante el frenado y el descanso, reduciendo el consumo de combustible hasta un 5-10% .
- **Vehículos micro-híbridos/ semihíbridos**: entre bajo y medio grado de hibridación, sistemas de start-stop combinados con frenado regenerativo, donde la energía almacenada se utiliza para aumentar la aceleración del vehículo.
- **Vehículos híbridos puros (HEVs)**: grado medio de hibridación, características equivalentes a los vehículos semihíbridos, pero la energía almacenada dentro de la batería también se utiliza para un cierto rango de conducción eléctrica.
- **Vehículos híbridos enchufables (PHEVs)**: alto grado de hibridación, la batería se utiliza como la principal fuente de energía para viajes diarios (es decir, 20-50 km), pero si es necesario, los PHEVs también pueden funcionar en modo híbrido utilizando el motor de combustión interna. Las baterías pueden ser cargadas con energía eléctrica de la red de suministro.
- **Vehículos eléctricos puros (VE)**: Electrificación completa, la batería se usa como la única fuente de energía del vehículo, sin motor de combustión interna. Las baterías se cargan con energía eléctrica de la red de suministro.

Esta clasificación nos será muy útil posteriormente para la caracterización de diversos componentes diferenciadores del vehículo eléctrico, ya que dependiendo de cada tipo de vehículo, sus comportamientos son más exigentes según con qué componentes.

Sin más preámbulos, damos paso al primer capítulo donde se aborda el contexto en el cual está sumergido el vehículo eléctrico, diferenciando cuatro aspectos clave que pueden influir en su evolución.

CONTEXTO

Para analizar más a fondo las alternativas del vehículo eléctrico (en adelante VE) y su previsible evolución es fundamental tener en cuenta el contexto en el cual se encuentra, tanto la parte social, como la económica, la ambiental y las posibles actuaciones gubernamentales sobre dicho tema. El vehículo eléctrico presenta una oportunidad de negocio basada en la idea de un medio de transporte privado muy similar a los más utilizados actualmente, la diferencia la marca el sistema de propulsión, que se realiza con máquinas alimentadas tan solo con energía eléctrica, la cual cosa introduce ventajas en algunos aspectos y desventajas en otros, con respecto al vehículo de combustión interna tradicional.

A continuación vamos a exponer las principales claves que pueden influir en el futuro del desarrollo del vehículo eléctrico.

Económico

La parte económica es una de las más influyentes y determinantes en la mayoría de proyectos, por lo tanto es necesario un estudio exhaustivo sobre este campo para poder tomar decisiones futuras. En este contexto, el vehículo eléctrico es un bien tangible que tiene un coste inicial bastante elevado y un coste variable o de mantenimiento más reducido comparándolo con los vehículos de combustión interna más comunes. Esto implica que, para que sea rentable la inversión inicial, su uso tiene que ser significativo durante su vida útil.

Otro aspecto importante en el contexto económico es, el control de la incertidumbre, la cual influye relevantemente en las inversiones futuras de los proyectos. En particular, para el vehículo eléctrico las incertidumbres que más podrían afectar en un futuro cercano son las que se centran en las evoluciones de los precios de las baterías, el precio del petróleo y el de la electricidad, ya que el desconocimiento de esta información puede ser clave a la hora de tomar ciertas decisiones, tanto en la parte del fabricante como en la del consumidor.

En cuanto a los perfiles de conducción, los vehículos eléctricos que hay hoy en día en el mercado, debido a las restricciones técnicas que existen, están diseñados principalmente para usuarios que hacen trayectos constantes de una distancia no muy grande, de modo que se puedan realizar con la energía de las baterías completamente cargadas, pero que la distancia sea suficientemente larga, para que se pueda amortizar el sobrecoste de la parte fija con la diferencia del coste variable, respecto al vehículo de combustión interna. También interesa que los trayectos sean predecibles, de tal manera que si en alguna ocasión no se dispone de suficiente energía en las baterías se pueda planificar el trayecto para poder recargar las baterías en una estación de recarga sin tener que modificar mucho la ruta inicial.

Vistas las características de conducción más adecuadas para el vehículo eléctrico, toca analizar qué segmento de mercado se acopla mejor a estas condiciones, con la intención de distinguir los posibles compradores de dicho producto. Dentro de dicho segmento se encontrarían los particulares que viven en áreas rurales o ciudades medianas que se tienen que desplazar diariamente para ir a trabajar, de tal forma que cumplen perfectamente con el perfil de conducción para el VE. Otro perfil con alto potencial de negocio son, las flotas de vehículos puramente comerciales, ya que normalmente tienen una ruta asignada y suelen tener trayectos de distancias más o menos constantes, este caso es especialmente interesante porque al ser

vehículo comercial, el IVA no se contaría como coste, lo que hace aún más atractiva esta opción, otra cosa que puede influir en este caso, es la política de empresa o la imagen de marca de la empresa, ya que el VE tiene bastante aceptación social como más adelante analizaremos.

Como hemos visto, el VE no es adecuado para todos los perfiles de uso, ya que la tecnología no está suficientemente madura y el coste inicial aún es elevado, lo que significa que, no a todos nos salga rentable comprarnos un VE. Aparte de la vertiente económica, existe otra razón por la cual el eléctrico no es factible para muchos conductores, y es la autonomía de las baterías. Muchos conductores se adaptan en parte a los requisitos del VE pero no se consideran posibles clientes, ya que suelen realizar viajes esporádicos de trayectos largos, lo que es bastante incompatible con las características anteriormente comentadas. En este tipo de perfiles se aprecia la llamada: ansiedad de alcance, que es la preocupación que se experimenta cuando no sabes si vas a tener suficiente energía para llegar a tu destino. Esto, aparte de la limitada capacidad de las baterías, también viene agravado por la aún precaria infraestructura de estaciones de recarga.

Como hemos visto, el sistema de carga es algo indispensable en el tipo de vehículo en estudio, y por tanto en el balance económico tendrá un peso bastante relevante que influirá en la viabilidad de muchos casos. Pero hoy en día, dicha infraestructura está aún en construcción y el sistema de cobro de la energía utilizada para recargar las baterías tampoco está realmente definido, incluso los tipos de conectores para enchufar el vehículo a dichas estaciones no están estandarizados, y dependiendo del fabricante y de la región del mundo son diferentes. [2] Todo esto, crea un escenario de gran incertidumbre alrededor del sistema de recarga, que repercute a la hora de decantarse por el producto tradicional o el eléctrico. Pero, si algo hay más o menos claro, es que los que dispongan de plaza de garaje privado les resultará mucho más barato que a los que no la tengan, ya que el coste de instalación de un punto propio de recarga es mucho más barato a largo plazo que recargarlo en uno de la vía pública, donde los costes de instalación y de facturación de la energía son mucho más elevados. Por tanto, un factor decisivo a la hora de realizar el balance económico entre el VE y el de combustión interna, será si el propietario dispone de plaza de garaje privado o no.

Como ya se ha comentado existe mucha incertidumbre acerca del sistema de carga, y uno de los actores que puede tener más influencia para despejar esta incertidumbre y marcar un camino es el gobierno, mediante leyes y decretos que regulen las actividades relacionadas con este tema y con subvenciones para estimular algún tipo de actividad concreta, pero esto lo comentaremos con más detalle más adelante.

Por tanto podemos decir que el VE presenta una gran oportunidad de negocio con un sector de mercado más o menos definido por las restricciones técnicas, pero parece que con el paso del tiempo y la maduración de la tecnología pueda ensancharse este segmento abarcando gran parte del sector automovilístico. También cabe mencionar que actualmente se dispone de una gama bastante limitada de modelos disponibles y cabe esperar que con el tiempo esta oferta se vaya ampliando a modelos con perfiles de conducción muy diferentes. [3]

Ambiental

Entrando en la vertiente ambiental, nos encontramos con la transformación que propone el VE, de pasar de consumir combustibles fósiles a solamente electricidad, que a primera vista parece muy positivo medioambientalmente, pero si analizamos este tema más en profundidad vemos que hay una mejora sustancial apreciable pero no tanto como parece a primera vista.

El aumento de los vehículos eléctricos en la flota automovilística española implica una reducción del consumo de combustibles fósiles, principalmente derivados del petróleo, pero también implica un aumento importante en la demanda eléctrica, lo que supone a su vez que, según el sistema de generación de energía eléctrica español, las centrales de punta aumenten sus horas de funcionamiento y habitualmente dichas centrales son las más contaminantes (ciclo combinado y carbón), esto implica que la reducción de emisiones no sería tan grande como si la electricidad se produjera con tecnologías renovables. Cabe destacar que, se prevé que el período más habitual para realizar la recarga de las baterías sea por la noche, donde el consumo de electricidad es bastante menor, como se puede apreciar en la imagen 1, esto haría que el efecto anteriormente comentado tenga una menor importancia, pero a medida que se vayan incorporando más vehículos eléctricos a la flota automovilística este efecto puede ser bastante notable. [4]

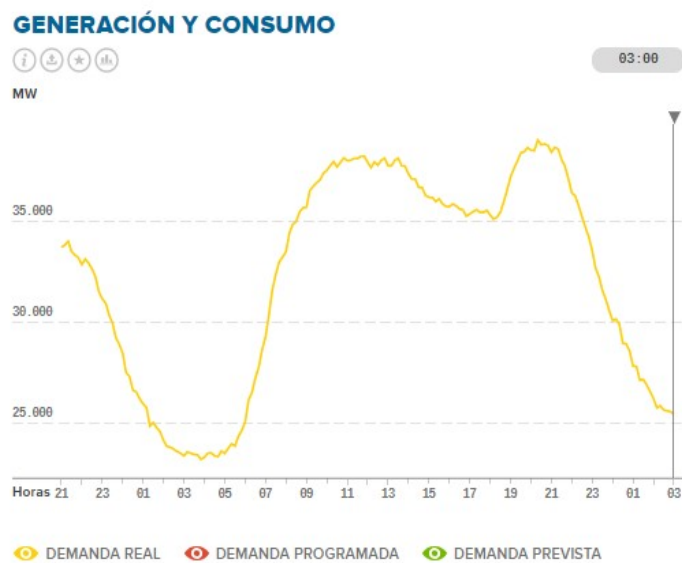


Imagen 1: Curva de consumo eléctrico diario [65]

Este incremento de la demanda eléctrica provocará que la potencia máxima demandada aumente, lo que implica que se tenga que redimensionar gran parte de la red de distribución para poder soportarla, e incluso así este aumento de potencia consumida generará más pérdidas, lo que muchas veces se traduce en mayores emisiones de gases contaminantes, pero estas cantidades resultan poco significativas.

A pesar de los aspectos comentados, se concluye que el cambio de una gran parte de los vehículos actuales a vehículos eléctricos, comportará una reducción de emisiones globales considerable, por lo que desde el punto de vista medioambiental, sería un gran paso en la misión de reducir el calentamiento global.

Otra gran ventaja que tiene el VE es, la gran reducción de consumo de derivados del petróleo que plantea. En particular para España, que es un importador neto de petróleo, no solo es una ventaja de reducción de emisiones y medioambiental, sino que también es una ventaja económica y estratégica, ya que al consumir menos petróleo, se depende menos de los países importadores del mismo y sus políticas económicas.

Y por último, la ventaja que posiblemente nosotros notemos más, será la reducción de emisiones locales y de la contaminación acústica, ya que el motor eléctrico no hace prácticamente ruido y a diferencia de los de combustión, tampoco emite ninguna partícula ni ningún gas contaminante, por lo que se acabarán las nieblas de contaminación en las ciudades y las restricciones de circulación debido a la polución y los ruidos de los motores en grandes avenidas y sus efectos sobre las personas. [3]

Con lo que podemos concluir que el VE es una gran herramienta para reducir el calentamiento global logrando una reducción de emisiones considerable y también incrementar la calidad de vida en las grandes ciudades

Social

Actualmente, la sociedad ha aumentado su concienciación sobre la importancia de buscar una alternativa eléctrica al transporte, que se acentuó desde el verano de 2008, cuando los precios del petróleo sobrepasaron holgadamente los 100 dólares por barril. Esto junto a la creciente sensibilización respecto las cuestiones ambientales de la sociedad, se constituye como un factor fundamental para el desarrollo y la implantación del vehículo eléctrico.

Del mismo modo, dado que el coche eléctrico presenta a lo largo de su vida útil, una diferencia de costes medios relativamente pequeña respecto al convencional, la posible diferencia económica (a favor o en contra) puede pasar a un segundo plano para usuarios con una conciencia ecológica determinada, especialmente por el ahorro energético y la reducción de emisiones de CO₂.

Por otro lado, los conductores actuales están acostumbrados a disfrutar de unos vehículos caracterizados por un elevado nivel de confort y autonomía. La introducción del vehículo eléctrico podrá verse obstaculizada si los nuevos vehículos tienen dificultades para ofrecer a los conductores unos niveles de prestaciones similares a las que tienen con sus vehículos convencionales actualmente. Un ejemplo sería los tiempos de recarga rápida, si estos se mantienen en torno a los 30 minutos, el coste en términos de tiempo para el conductor es mucho mayor que el sobrecoste económico del combustible con un vehículo convencional, lo que desincentiva el uso del vehículo eléctrico. Por el contrario, la menor contaminación local, tanto sonora como de emisión de gases perjudiciales, es un elemento que juega muy a favor del coche eléctrico y ayudará a su introducción. [5]

Gubernamental

Otra parte que resulta fundamental a la hora de reducir las incertidumbres y hacer viables algunos proyectos es la parte gubernamental. Los gobiernos tienen la posibilidad de incentivar o regularizar actividades para favorecer el progreso de unos objetivos predeterminados. Por tanto, en el caso de estudio que nos ocupa, al ser una tecnología irruptora y totalmente nueva, no hay casi ninguna legislación que la regule.

Sin embargo, la Unión Europea se enfrenta a un ambicioso objetivo en el contexto energético y medioambiental, que es el objetivo 20/20/20 en 2020, que quiere conseguir un 20% de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de forma vinculante, conseguir un 20% de participación de energías renovables en el mix energético de generación eléctrica y alcanzar una mejora del 20% en la eficiencia energética del consumo de la energía. Todo esto en base al año 1990. En general, cuando se habla de actuaciones para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones o mejora de la eficiencia energética se suele enfocar la atención en el sector industrial o incluso en medidas para los hogares, sin embargo, si se quieren alcanzar los objetivos planteados, habrá que realizar también grandes esfuerzos en el sector del transporte, el principal consumidor de energía de la economía y enormemente dependiente de los combustibles fósiles.

La importancia del sector transporte como sector económico y su peso en el consumo energético y en las emisiones, lo constituyen como uno de los ejes principales de las políticas públicas si se pretenden alcanzar los objetivos europeos, en particular, el área que habrá redoblar los esfuerzos es el transporte por carretera.

De cara a avanzar hacia la sostenibilidad del transporte de carretera existen varias políticas que se pueden agrupar en tres grandes grupos: políticas de demanda, medidas de mandato y control y políticas de oferta. Dentro de las políticas de demanda pueden encontrarse medidas que apuestan por desarrollar diseños urbanísticos que minimicen las necesidades de movilidad de los ciudadanos o las que incentivan las modalidades de transporte más sostenible, como por ejemplo el transporte público o la bicicleta. La fiscalidad ambiental puede jugar en este campo un papel importante, encareciendo los modos de transporte más contaminantes, mediante impuestos a los carburantes o al CO₂.

Otro bloque de medidas regulatorias sería el de mandato y control, que son acciones como la imposición de límites de velocidad en determinado tipo de vías, así como el establecimiento de límites de emisiones por kilómetro a los vehículos. Por último, se encuentran las medidas de oferta, entre las que destacan aquellas destinadas a fomentar nuevas tecnologías más eficientes en el transporte, entre las que se encuentran el desarrollo de vehículos cada vez menos dependientes, e incluso independientes, de los combustibles fósiles para su funcionamiento. Dentro de este bloque juega un papel fundamental la promoción del vehículo eléctrico. [5]

Referidos a este último bloque, el gobierno español ha realizado distintas medidas para favorecer el progreso del vehículo eléctrico, a continuación comentaremos las más relevantes.

Una de las medidas aplicadas son las ayudas públicas para la adquisición de vehículos eléctricos, un ejemplo es el actual plan de impulso a la movilidad con vehículos de energías alternativas (MOVEA). Cualquier incremento o reducción de las estas ayudas, como es obvio, influirá

decisivamente en la rentabilidad de los VE frente a los vehículos convencionales. En este sentido, parece que en el medio plazo va a existir un compromiso general de introducción de este tipo de vehículos, sobre todo por sus ventajas de eficiencia energética y de reducción de emisiones de CO₂. De hecho, las ayudas públicas no solo se centran en un apoyo financiero para su adquisición, sino en, por ejemplo, no pagar estacionamientos regulados o peajes para entrar en grandes ciudades. [6]

Otra medida destacable en el campo de la recarga doméstica del VE es, la implantación de una tarifa eléctrica regulada por el gobierno (Tarifa Vehículo Eléctrico, 2.0 DHS) que está especialmente destinada a la recarga de vehículos eléctricos. Esta tarifa permite al usuario ahorrar dinero programando la recarga de su vehículo eléctrico por la noche, solo está disponible para consumos de potencia menores de 10 kW y es una modalidad de la tarifa regulada por el gobierno (PVPC) donde el precio se regulan a través de un Real Decreto y del coste de la electricidad en el mercado diario para cada hora, por lo que no es un precio constante y puede fluctuar. Dicha tarifa se segmenta en tres períodos horarios, el período punta, de 13 h a 23 h (10 horas), el período valle, de 23 h a 1 h y de 7 h a 13 h (8 horas) y el período supervalle, de 1 h a 7h (6 horas), que es el idóneo para la recarga de vehículos eléctricos al mejor precio, haciendo que esta opción de movilidad sea aún más competitiva. [7]

Otra medida de notoria importancia, es la simplificación de los requisitos exigibles a los gestores de carga, de tal forma que incentiva el desarrollo de infraestructuras de recarga en empresas y lugares como hoteles, aparcamientos y centros comerciales, con la intención de aumentar la red de puntos de recarga públicos para el vehículo eléctrico, que actualmente no es muy amplia. Esto es un tema fundamental para el desarrollo del VE, el disponer de una red de puntos de recarga suficientemente amplia para paliar el efecto de la ansiedad de alcance. [8]

COMPONENTES

En este apartado se introducirán los principales componentes que diferencian principalmente el vehículo eléctrico del convencional de combustión interna, explicando qué funciones realizan y mostrando las diferentes tecnologías que hay actualmente disponibles para la comercialización, resaltando las diferencias entre ellas y finalmente concluir que propuesta es la que más se ajusta a los requisitos del vehículo eléctrico para cada elemento. Los principales elementos considerados distintivos del VE son los siguientes:

- Baterías
- Drivers-Control
- Motor-generator

BATERÍAS

Uno de los principales componentes de todo vehículo eléctrico es la batería. Su importancia es tal que la autonomía y el precio del coche dependen del tipo y tamaño de la misma. Este acumulador de energía almacena la electricidad mediante elementos electroquímicos, dispuesto a entregar esta energía en cualquier momento que el vehículo lo demande.

Conforme a la Directiva sobre baterías de la UE (2006/66 / CE), las baterías para automóviles se definen como "cualquier batería o acumulador utilizado para arrancar o encender el motor". Por otro lado, las baterías industriales se definen como "cualquier batería o acumulador diseñado para usos exclusivamente industriales o profesionales o utilizado en cualquier tipo de vehículo eléctrico".

Los diferentes conceptos de vehículos requieren baterías automotrices e industriales con diferentes perfiles y características de rendimiento, donde los requisitos de las baterías son cada vez más exigentes conforme avanzamos en el grado de hibridación. Actualmente para los mayores grados de hibridación un solo sistema de batería no puede cumplir con todos los requisitos al mismo tiempo, por tanto se instalan diferentes combinaciones de varios tipos de baterías para operar a diferentes niveles de voltaje y así poder satisfacer todos los requisitos técnicos.

Tipos de baterías disponibles en el mercado

Todas las tecnologías de baterías de gran formato utilizadas en aplicaciones de automoción están cubiertas en los siguientes grupos que a continuación desarrollaremos:

- Baterías de Plomo-Ácido
- Baterías de Níquel-Hidruro metálico
- Baterías de Ion-Litio
- Baterías de Sodio-Cloruro de Níquel

Baterías de Plomo-Ácido

Las baterías Plomo-Ácido o basadas en plomo, son actualmente la única tecnología de mercado a gran escala disponible para aplicaciones de arranque en vehículos convencionales, incluyendo vehículos con sistemas start-stop y microhíbridos básicos, debido a su excelente rendimiento de arranque en frío, fiabilidad y bajo coste.

En comparación con otras tecnologías, las baterías de tracción basadas en plomo no son competitivas para su uso en vehículos híbridos puros o vehículos eléctricos debido a su menor energía específica y mayor peso. Sin embargo, para todos los trenes motrices electrificados (desde microhíbridos hasta vehículos eléctricos puros), el suministro de componentes electrónicos y de la red de placa de 12V actualmente se proporciona mediante baterías auxiliares de 12V a base de plomo (además de la batería de tracción más grande). La batería de Plomo-Ácido también se utiliza para mantener la gestión de seguridad de la batería de tracción más grande.

El peso total promedio de una batería de Plomo-Ácido para un automóvil compacto es de 18-20 kg. La vida útil de una batería de arranque depende en gran medida de los patrones de uso y el clima en el área de uso, pero se puede estimar que es de 5 a 7 años. [9]

Baterías de Níquel-Hidruro metálico

Las baterías de Níquel-Hidruro metálico (NiMH) han sido la tecnología de elección en el mercado de los vehículos híbridos puros (HEV) en la última década, debido a su flexibilidad de diseño, buena densidad de energía, alto rendimiento de potencia y mejor compatibilidad ambiental. Esta fue la tecnología seleccionada por Toyota cuando el Prius HEV se introdujo en 1997. Las baterías de NiMH son aún mucho más caras que las de Plomo-Ácido y no se han considerado para su uso en funciones de arranque debido a su rendimiento de arranque en frío inferior junto con otras limitaciones.

Para los VE y HEV enchufables, las baterías de NiMH han sido una tecnología importante, sin embargo, su mayor peso, menor densidad de energía y menor capacidad por ciclo, significa que no podrán competir con las baterías de Ion-Litio para la próxima generación de HEV enchufables y VE completos. [10]

Baterías Ion-Litio

Los sistemas de baterías recargables de Ion-Litio ingresaron al mercado masivo en aplicaciones de consumo de pequeño tamaño a principios de los años noventa. Su coste inicial actualmente, es significativamente más alto que las tecnologías de batería correspondientes basadas en otras químicas. Por lo tanto, las baterías de Ion-Litio de mayor tamaño se encuentran actualmente en segmentos tales como aplicaciones militares y espaciales, donde su alta energía y densidad de potencia, así como su capacidad superior por ciclo compensan el elevado coste.

Las baterías de Ion-Litio se usan en vehículos híbridos y eléctricos debido a su alta densidad de energía y porque su coste relativamente mayor es una barrera menor en estos vehículos de alta gama. Las baterías de Ion-Litio también se están investigando para su uso en aplicaciones de doble batería junto con una batería basada en plomo, ya que para demandas de baja tensión, no se espera que las baterías de iones de litio de 12 V se conviertan en un sustituto viable del

mercado masivo de las baterías de arranque basadas en plomo en la próxima década, debido a las limitaciones en la capacidad de arranque en frío y un mayor coste.

La mayoría de los sistemas de baterías de Ion-Litio disponibles proporcionan una excelente vida útil y resistencia al ciclo de vida, con un rendimiento que depende del modo operacional y la temperatura de uso, pero que combinado con una densidad energética elevada hace que esta tecnología tenga un amplio sector de aplicación y un gran margen de mejora en el futuro más cercano.

Al final de su vida útil, se recogen todas las baterías de Ion-Litio de los vehículos para su reciclaje. Los procesos industriales de reciclaje actualmente se dirigen principalmente a la recuperación de níquel, cobalto y cobre. El reciclado del litio es técnica e industrialmente factible, pero como solo se utiliza una pequeña cantidad en cada batería (entre 1 y 2% de su peso total), y porque solo un pequeño número de baterías de Ion-Litio de gran formato han llegado al final de su vida, esto aún no se ha vuelto económicamente viable. [11]

Baterías de Sodio-Cloruro de Níquel

Las baterías de Sodio-Cloruro de Níquel (NaNiCl_2) se comercializan desde la década de 1990 y originalmente se aplicaron en vehículos híbridos y eléctricos pesados, como autobuses, camiones y furgonetas. Hoy su uso se ha ampliado a aplicaciones industriales, incluidos los mercados de telecomunicaciones y en los sistemas de almacenamiento de energía procedente de excesos de generación puntuales y con capacidad de reinyectar energía a la red cuando sea necesario, complementándose con los servicios auxiliares de la red eléctrica.

Las baterías a base de sodio tienen una alta densidad de energía, un ciclo de vida largo y pueden funcionar en entornos hostiles a temperaturas de entre -40°C a $+60^\circ\text{C}$ debido a su aislamiento térmico contra el medio ambiente. Son completamente reciclables dentro de las industrias existentes para la producción de acero inoxidable y pavimentación de carreteras. [12]

Caso de estudio

En cuanto al caso que nos ocupa, los vehículos eléctricos funcionan con un sistema de almacenamiento eléctrico que, debido a la necesidad de una alta densidad de energía, una buena capacidad de recarga rápida y una elevada potencia de descarga, este segmento está actualmente dominado por sistemas de batería de Ion-Litio de alto voltaje, que son las que mejor se adaptan a estos requisitos. Cabe destacar, que estas baterías trabajan a una tensión entre 320 y 400 V en corriente continua, y se llaman de alto voltaje para diferenciarlas de las de arranque que trabajan a 12 o 48 V.

Para aplicaciones comerciales, ambientes hostiles o aplicaciones pesadas, las baterías de Sodio-Cloruro de Níquel son una opción competitiva. Sin embargo, las baterías de Níquel-Hidruro metálico se han utilizado en ciertos PHEV en el pasado, pero gradualmente están siendo reemplazadas por baterías de iones de litio en este segmento, que continúan disminuyendo en su coste. El alto peso y la menor capacidad de rotación de las baterías basadas en plomo limitan su uso tanto en PHEV como en VE, debido a su densidad de energía demasiado baja, que hace imposible el cumplimiento de los requisitos de los fabricantes de estos vehículos.

No se espera que esta situación cambie, ya que los esfuerzos de investigación e innovación se centran en mejorar la competitividad de la tecnología de Ion-Litio y Sodio-Cloruro de Níquel, o en desarrollar conceptos de batería completamente nuevos.

También se debe tener en cuenta que se necesita un segundo sistema eléctrico en un nivel de 12 V para alimentar todos los componentes electrónicos, donde están incluidas las funciones de seguridad. La batería de 12 V de Plomo-Ácido proporciona estabilización de voltaje con una alta fiabilidad a un bajo coste, lo que la hace la elección mayoritaria de los fabricantes para la alimentación de todos los componentes electrónicos. [13]

Por tanto, los vehículos eléctricos dispondrán previsiblemente de dos tipos de baterías diferentes, una principal de Ion-Litio con gran capacidad, para alimentar el motor de propulsión, y otra a base de plomo para alimentar toda la red de 12 V que suministra corriente a gran parte de los componentes electrónicos de control y seguridad del vehículo.

DRIVERS-CONTROL

El sistema de control es otro de los componentes más destacados de los vehículos eléctricos, sino el más importante, ya que se trata del sistema que controla todas las operaciones de todos los componentes, por tanto un buen rendimiento de este sistema es fundamental para desarrollar un vehículo eficiente. Las funciones principales de este sistema de control son, dar órdenes a todos los distintos componentes del vehículo y también proporcionar la correcta alimentación eléctrica a cada uno de ellos. Esta segunda tarea es la más complicada, porque dependiendo del componente, su alimentación puede ser en corriente continua o en alterna, y después los diferentes niveles de tensión de cada uno, incluso hay componentes que necesitan que su tensión de alimentación varíe según el modo de trabajo exigido.

Otro factor a controlar es la variabilidad del voltaje de las fuentes de energía eléctrica, es decir, las baterías, su tensión varía con el tiempo, la temperatura, los ciclos de uso y muchos otros factores. En general, el voltaje de la batería está bastante bien regulado, pero frecuentemente queremos cambiar ese voltaje, a un valor más bajo o más alto, especialmente importante para el caso de la alimentación del motor, donde la tensión representa una variable de control muy importante para obtener elevados rendimientos de funcionamiento, tanto en el modo motor, como en el modo generador, para la opción del frenado regenerativo. Por tanto, siempre será necesario tener un control sobre el voltaje de alimentación de todos los componentes.

Como hemos avanzado, la mayoría de los equipos electrónicos y eléctricos requieren un voltaje bastante constante, pero muchas veces este no es el mismo que el que proporciona la batería. Para conseguir la correcta alimentación de los equipos de diferentes voltajes, se puede lograr bajando la tensión por debajo de la de funcionamiento de la batería, o aumentándola hasta otro valor constante más alto, y en otros casos, queremos producir un voltaje variable (por ejemplo, para el motor) a partir del voltaje más o menos fijo de una batería. Para cualquiera de estos cambios de voltaje que se requieren, se realizan mediante el uso de circuitos de "conmutación" o "corte". Todos estos dispositivos se explican detalladamente en el Anejo 1, donde se exponen las diversas características de los diferentes tipos de transistores más utilizados hoy en día, así como los circuitos integrados de regulación de tensión, tanto reductores como elevadores, y también se explica el principio de funcionamiento de los inversores y sus principales características. [14]

Esquema de control

Pero el gran reto del sistema de control es coordinar todos los dispositivos electrónicos de control de los diferentes componentes del vehículo, de forma que puedan ser controlados para actuar cuando sea necesario y poder satisfacer los requisitos que impone el vehículo eléctrico. Para eso es necesario aclarar con un esquema de control, las diferentes acciones que debe llevar a cabo cada componente.

El esquema de control típico del VE se presenta en la Imagen 2. Se puede observar que este sistema incluye cinco unidades de control eléctrico (ECU), que son la ECU principal, la ECU del motor, la ECU de la batería, la ECU de freno y la ECU del equipo eléctrico. En primer lugar la ECU de la batería, es la encargada de controlar la carga y descarga de la misma, para garantizar por un lado la carga homogénea y segura, evitando corrientes anormales y fugas y controlando la temperatura de funcionamiento, y por otro lado, que la tensión se mantenga constante para un

comportamiento de descarga adecuado, controlando la capacidad de la misma en todo momento. Otra ECU importante es la del motor, la cual es diferente para cada tipo de motor, ya que dependiendo de la tecnología que se monte, necesitará un control diferente, como veremos en más detalle en los capítulos siguientes, pero su principal finalidad es, controlar los parámetros de control del motor para conseguir los puntos de funcionamiento que le pide la ECU principal, y otra función importante es el cambio de modo de funcionamiento cuando se activa el freno regenerativo, con lo que tiene que tener una buena coordinación con la ECU principal y la ECU de freno.

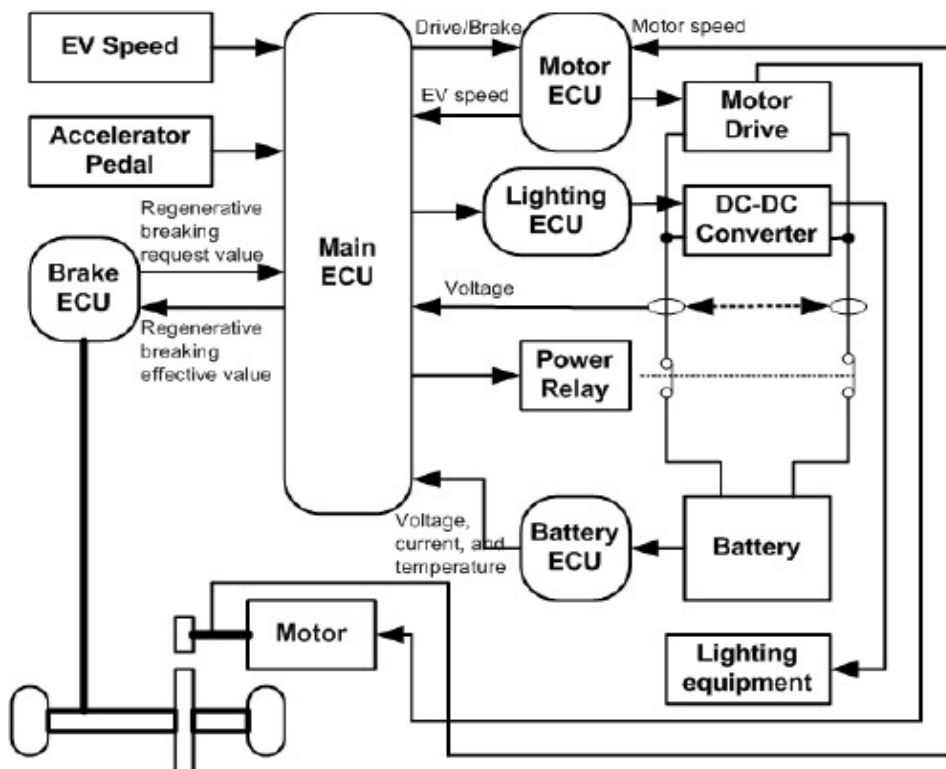


Imagen 2: Esquema de control típico de un vehículo eléctrico [15]

La ECU del equipo eléctrico controla los convertidores CC-CC para generar una variedad de niveles de voltaje de CC para la correcta alimentación de todos los equipos, y en caso de que se requiera corriente alterna, este también sería el equipo que controlaría los inversores de corriente. Al coordinar el esfuerzo del frenado hidráulico con el frenado regenerativo que ejecuta el motor, la ECU del freno actúa de tal manera que controla todo el par de frenado producido, tanto por el sistema de freno regenerativo como por el sistema de freno hidráulico convencional, lo que significa, como ya hemos comentado, que este sistema necesita una buena comunicación con la ECU principal y la ECU del motor. Por último, y la unidad más importante, la ECU principal, es la encargada de gestionar toda la información y mandar todas las ordenes al resto de unidades de forma coordinada para poder alcanzar un elevado rendimiento del vehículo. Esta unidad es la encargada de, por ejemplo, asignar el punto óptimo de funcionamiento del motor según la posición del acelerador, la velocidad de giro actual del motor, la potencia consumida y otros parámetros que determinan ese punto. Por tanto como hemos visto, para el correcto funcionamiento del vehículo, se necesita de una gran coordinación entre todos los equipos, para que puedan responder rápidamente al comportamiento cambiante que suele tener un vehículo, con el objetivo de maximizar el rendimiento global. [16]

MOTOR-GENERADOR

Finalmente, para terminar con los componentes característicos del vehículo eléctrico, tenemos el componente diferenciador por excelencia, el motor-generador, el encargado de generar el par para transmitir a las ruedas, con la peculiaridad que para el vehículo eléctrico se utiliza un motor eléctrico en vez de uno de combustión interna como en los coches convencionales, este motor, como todas las máquinas eléctricas, con la misma configuración puede convertir la electricidad en par y del mismo modo convertir el par en electricidad, es decir puede actuar como motor y como generador sin cambiar nada, esto nos permite recuperar energía en las frenadas mediante el frenado regenerativo. A continuación pasaremos a describir las principales características de funcionamiento que presentan los motores eléctricos diseñados para el vehículo eléctrico.

Requisitos

Como ya sabemos en el vehículo eléctrico, solo el motor eléctrico entrega par a las ruedas motrices. Por lo tanto, el rendimiento del vehículo está completamente condicionado por las características de velocidad y par del motor de tracción. Por consiguiente, el proceso de selección de motores eléctricos para el VE es un paso muy importante que requiere una atención especial. De hecho, la industria automotriz todavía está buscando la unidad motriz más adecuada para los vehículos eléctricos. Por tanto, siendo conscientes de la importancia del motor en el rendimiento general de vehículo, es muy importante saber qué requisitos exige un vehículo a su motor, para poder seleccionar el que más se adapte a dichas condiciones, por lo que a continuación vamos a intentar resumir las exigencias más importantes que impone un vehículo.

El motor de cualquier vehículo principalmente está limitado por tres límites: límite de velocidad máxima, límite de par máximo y límite de potencia máxima. Estos tres límites condicionan todo el diseño de los componentes del vehículo, ya que dependiendo de donde se fijen estos límites habrá que adaptar los componentes a las exigencias fijadas. El primero es el de velocidad, es un límite mecánico, que está relacionado principalmente con la estructura del rotor del motor y las fuerzas centrífugas a que se expone, donde cuanto mayor sea la velocidad máxima, mayor debe ser la calidad de los cojinetes del eje y la resistencia del mismo, así como un excelente reparto de peso en el eje, para evitar excentricidades, lo que repercute casi siempre en un mayor coste.

El segundo límite, es el de par máximo, que también es un límite mecánico, directamente relacionado con la resistencia a torsión del eje, lo que a mayor par máximo, más robusto tiene que ser el eje y por tanto también repercute en un mayor coste. Por último tenemos el límite de potencia, este es un límite, en nuestro caso, eléctrico, ya que el motor está diseñado para la potencia nominal que se fija, y por tanto, por encima de esta potencia, el motor ya no trabaja de forma segura, una de las ventajas de los motores eléctricos es que este límite se puede traspasar si se hace con tiempos cortos, ya que el límite térmico de potencia suele estar bastante alejado del de potencia nominal.

En la imagen 3 se pueden comprobar perfectamente los tres límites de diseño descritos, donde el motor arranca con velocidad cero y aumenta hasta la velocidad base, entregando el par máximo (primer límite), donde la potencia entregada va subiendo hasta alcanzar su valor nominal en la velocidad base. Más allá de este punto, el aumento de velocidad se logra

manteniendo el voltaje constante pero debilitando el flujo, en esta zona se trabaja a potencia nominal constante (segundo límite), que también se conoce como zona de debilitamiento de flujo, donde el par entregado decae al mismo ritmo que el flujo, ya que son directamente proporcionales. Finalmente, este comportamiento continúa, hasta alcanzar la velocidad máxima del motor (tercer límite).

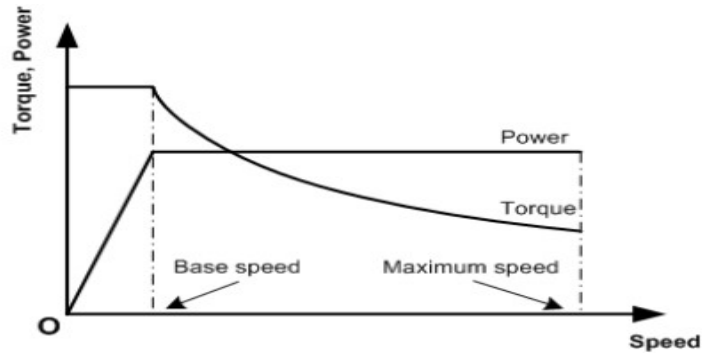


Imagen 3: Características de salida deseadas de los motores eléctricos en EV [17]

En cuanto a los requisitos constructivos del motor en la aplicación del vehículo, este requiere una buena eficiencia general en un amplio rango de velocidad y una alta densidad de potencia para reducir el peso total del vehículo. La aplicación vehicular también implica el funcionamiento en condiciones difíciles, por lo que se requiere tolerancia a altas temperaturas, clima y vibraciones.

Las variantes condiciones de conducción o los diferentes ciclos de conducción, afectan a los puntos de funcionamiento del motor eléctrico, lo que significa que la región de funcionamiento más eficiente no se puede utilizar en todos los ciclos de conducción, por tanto, esta es la razón por la que se necesita un alta eficiencia general en un amplio rango de funcionamiento, esta cualidad generalmente se expresa en una gráfica par-velocidad, como se ve en la Imagen 4, que muestra un ejemplo de mapa de rendimientos de un motor eléctrico ideal para la aplicación del vehículo eléctrico, destacando su amplio rango de funcionamiento a altos rendimientos y sobre todo la forma de sus curvas de isorendimiento, donde para velocidades bajas las curvas son casi verticales, lo que indica una independencia del rendimiento del par generado, y al contrario a altas velocidades donde las curvas son prácticamente horizontales, lo que significa que el rendimiento casi no depende de la velocidad de giro del motor. [18]

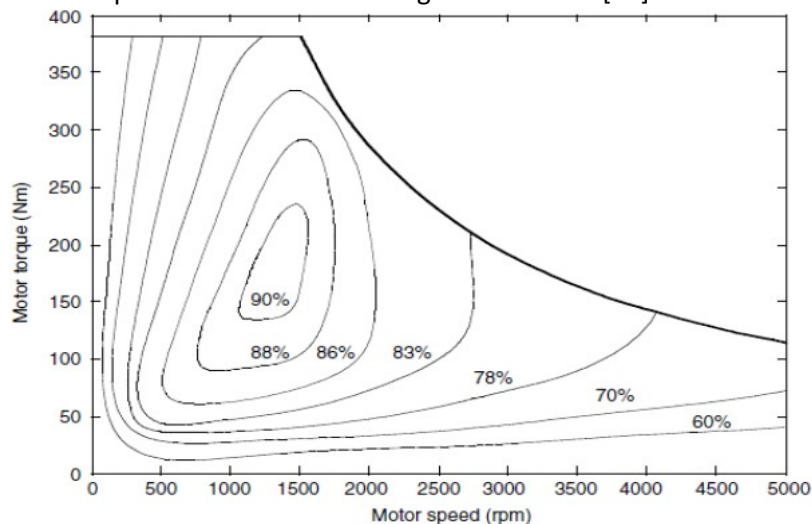


Imagen 4: Ejemplo de mapa de rendimientos de un motor eléctrico ideal para el vehículo eléctrico [47]

Después de comentar los aspectos más importantes, podemos resumir los requisitos básicos de un motor para el VE con la siguiente lista: [19]

- 1) Alta potencia instantánea y una alta densidad de potencia
- 2) Alto par a baja velocidad para arrancar y acelerar, así como una gran potencia a alta velocidad para navegar
- 3) Rango de velocidad muy amplio en la región de potencia constante
- 4) Respuesta de par rápida
- 5) Alta eficiencia en el amplio rango de velocidades con par constante y regiones de potencia constante
- 6) Alta eficiencia en el frenado regenerativo
- 7) Reducción de tamaño, reducción de peso y menor momento de inercia
- 8) Alta fiabilidad y robustez para diversas condiciones de operación del vehículo
- 9) Coste razonable
- 10) Tolerancia a fallos

Tipos de motores eléctricos

Una vez analizados los requisitos necesarios del motor eléctrico para el VE, pasamos a introducir las diferentes tecnologías que actualmente se usan en los motores eléctricos, que más adelante analizaremos en profundidad para esclarecer que tecnología se adapta mejor a los requisitos demandados por el vehículo eléctrico.

Las tecnologías que actualmente se están utilizando se pueden agrupar en los siguientes campos:

- Motor de corriente continua con escobillas
- Motor de corriente continua sin escobillas
- Motor de inducción
- Motor síncrono
- Motor de reluctancia variable

Los principios de funcionamiento de todas estas diferentes tipologías de máquinas, están explicados en el Anejo 2, ya que el objetivo de este capítulo es resaltar las características principales de cada motor, pero que para justificarlas, es necesario el previo conocimiento de los principios de funcionamiento de los mismos.

Motor de corriente continua con escobillas

Los motores de corriente continua con escobillas se caracterizan por su capacidad de ofrecer un alto par a baja velocidad, lo cual hace que sean adecuados para aplicaciones de tracción, esto junto con la facilidad de controlar el par y la velocidad que suministra dicho motor, son las razones por lo que se ha utilizado bastante en los vehículos eléctricos. La velocidad se puede ajustar controlando el voltaje de alimentación, este control se puede realizar de dos maneras, actuando en el voltaje que alimenta el campo del estator o actuando sobre el voltaje que alimenta al inducido, pero se prefiere actuar sobre la tensión del campo del estator ya que puede manejarse con mayor libertad. Pero este control será diferente dependiendo de la forma de excitación elegida, es decir, el modo de alimentar los diferentes devanados del motor.

Como se menciona en el Anejo 2, donde se explica el principio de funcionamiento, en este tipo de motor se tienen dos circuitos que alimentar (inducido e inductor) y la forma de alimentarlos determina su funcionamiento. Principalmente hay dos formas de conexión: en serie o en paralelo. En la conexión en serie, como se muestra en la imagen 5, la intensidad de los dos devanados es la misma, con lo que a velocidades reducidas la intensidad será grande, y como en esta variante se puede considerar que la relación entre el flujo y la intensidad es lineal, el par entregado es proporcional al cuadrado de la intensidad y por tanto, a bajas velocidades el par generado también será alto, pero a medida que vamos disminuyendo la carga y con ello el par requerido, para una misma tensión de alimentación, la velocidad va aumentando debido a la caída del flujo, con lo que tenemos una curva característica de par-velocidad que decrece exponencialmente como se muestra en la imagen 6. Como vemos, tiene la ventaja de un gran par de arranque y un gran rango de operación a potencia constante, pero es bastante difícil de controlar debido a la gran variación de velocidad que tiene de vacío a plena carga.

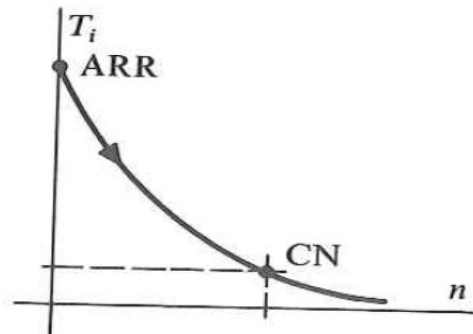
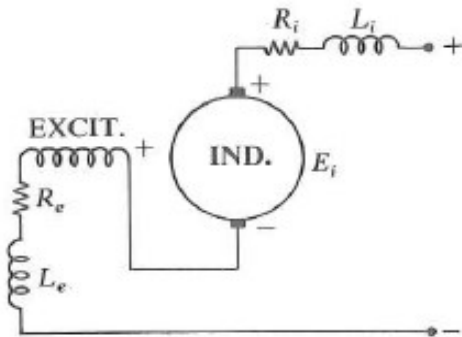


Imagen 5: Conexión de los devanados de un motor cc en serie [20]

Imagen 6: Curva característica de un motor cc en serie [20]

Por otro lado, en los motores conectados en paralelo o shunt, los dos circuitos ahora tienen corrientes independientes pero comparten el voltaje (Imagen 7), por tanto la corriente del inductor (estator) es independiente de la velocidad de giro, con lo que se consigue un campo magnético casi constante, esto implica que la velocidad de giro se mantendrá casi constante para cualquier par (Imagen 8), con una ligera caída de velocidad con el aumento de par requerido, producido por la resistencia del inducido (rotor) al aumentar su intensidad, ya que el par es proporcional a la corriente del inducido. Por tanto podemos considerar que esta configuración del motor de corriente continua, es un motor de velocidad constante, lo que significa que tiene una capacidad de control alta, de tal manera que para variar la velocidad de giro la única manera es variar la resistencia del inductor.

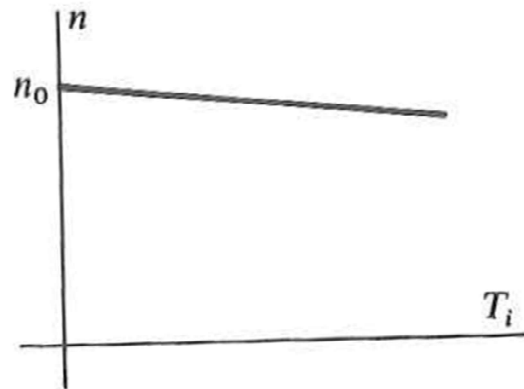
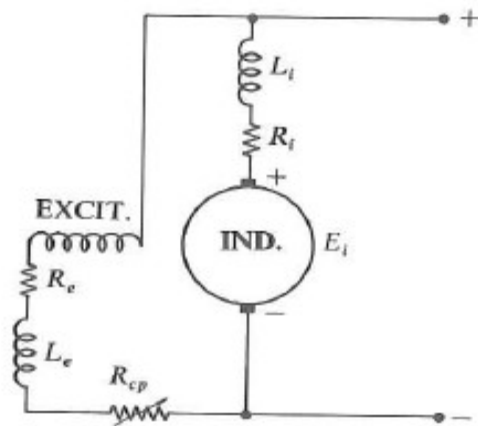


Imagen 7: Conexión de los devanados de un motor cc en paralelo [20]

Imagen 8: Curva característica de un motor cc en paralelo [20]

A parte de estas dos principales configuraciones, existen otras combinaciones a partir de estas, se llaman de excitación mixta o compuesta y consiste en dividir la bobina del inductor en dos bobinas, de tal forma que surgen las siguientes dos posibilidades:

Una es la excitación mixta larga (Imagen 10) y otra la excitación mixta corta (Imagen 9) que se diferencian por la posición de la bobina en serie, pero que se comportan casi igual, combinando las ventajas de la conexión serie, con las de la conexión en derivación, con lo que obtenemos un par de arranque elevado y una capacidad de regulación bastante buena.

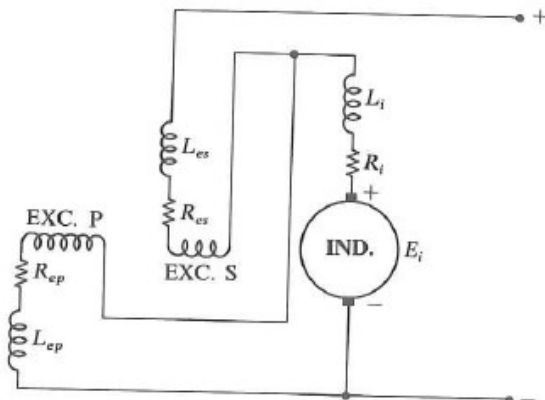


Imagen 9: Conexión de los devanados de un motor cc de excitación mixta corta [20]

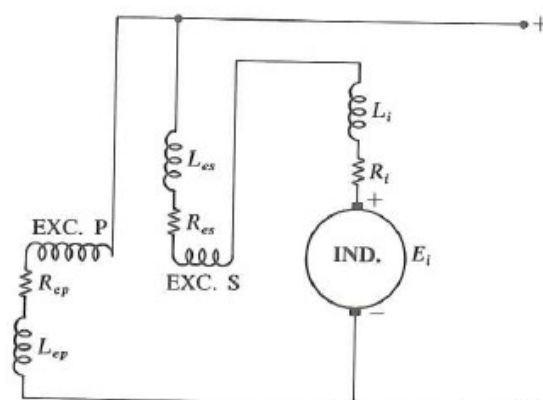


Imagen 10: Conexión de los devanados de un motor cc de excitación mixta larga [20]

Existe una última combinación que consiste en alimentar los dos circuitos no con la misma fuente, sino con fuentes distintas, esto se llama excitación independiente y las principales ventajas de este sistema son, que se consigue un control total sobre la máquina y se logra una gran estabilidad en todos los puntos de funcionamiento, la desventaja de este sistema es tener dos fuentes de tensión independientes, lo que conlleva un elevado coste y mayores tamaños.

Pero en este tipo de motor no son todas ventajas, su construcción es bastante voluminosa y pesada y parece bastante difícil reducir su tamaño y tiene una baja eficiencia y fiabilidad comparado con otros tipos de motores, pero la gran desventaja es sin duda, la gran necesidad de mantenimiento debido a la fricción de las escobillas y el conmutador, que a su vez restringen la velocidad máxima de la máquina. Por estas razones, no son ideales para el vehículo eléctrico donde se necesita una gran eficiencia y fiabilidad, sin mucho mantenimiento y una velocidad máxima bastante elevada. [19] [20]

Motor de corriente continua sin escobillas

Los motores de corriente continua sin escobillas, aunque se llaman así cuestiones comerciales e históricas, son realmente motores síncronos alimentados por un convertidor, donde en Anejo 2 se explica su principio de funcionamiento, para entender el por qué de esta afirmación. Este tipo de motor presenta una respuesta dinámica muy rápida junto a una operación sin ruido y rangos de velocidades muy altos. Otra ventaja es su elevada densidad de potencia comparada con los motores de inducción o de cc con escobillas, lo que quiere decir que suministra una alta potencia con un peso y tamaño compacto.

El principal inconveniente que tiene este tipo de motores, es la necesidad de incorporar sensores para detectar la posición del rotor en cada instante y poder controlar la velocidad de giro modificando los tiempos de conmutación del campo producido por el estator. [21] [22]

Motor de inducción

Los motores de inducción tiene dos modos constructivos, uno es la máquina con rotor de jaula de ardilla y el otro es con el rotor bobinado, siendo los primeros los más utilizados hoy en día. Estos motores con el rotor de jaula de ardilla son de construcción simple y robustos, con alta fiabilidad y bajo mantenimiento, tienen un bajo coste y buena capacidad para operar en ambientes hostiles. La ausencia de fricción de las escobillas permite a los motores elevar el límite de la velocidad máxima, y la mayor velocidad permite que estos motores desarrollen un alto rendimiento, aunque este rendimiento es mayor que los motores de cc, es menor que los motores de imanes permanentes y los de reluctancia variable, debido a la ausencia de devanado del rotor y las pérdidas del cobre en el rotor.

En cuanto a la parte de control, en los motores de inducción se puede controlar la velocidad de tres formas, variando el número de pares de polos, el deslizamiento o la frecuencia de suministro. Para variar el número de pares de polos es necesario un estator con dos devanados independientes, con lo que esta opción es muy cara y por tanto muy poco utilizada. En cuanto a la variación del deslizamiento, se puede realizar variando la tensión de alimentación o bien introduciendo resistencias en serie con las fases del rotor, lo cual lo hace solo posible para los motores con rotor bobinado, ya que para los de jaula de ardilla no se puede acceder al circuito del rotor. Y la opción más viable y más utilizada para el control de velocidad es la variación de la frecuencia de alimentación, con un simple componente electrónico llamado variador de frecuencia es posible controlar fácilmente la velocidad del motor.

Para el control del par suministrado por este tipo de motores, se emplea otro sistema de control, que se puede implementar dentro del mismo inversor, de tal forma que controla la orientación del campo, y es capaz de controlar de forma independiente el par y el campo magnético. Estos tipos de controladores electrónicos integrados son más sofisticados y caros que los de los motores de corriente continua. En la Imagen 11 podemos observar la curva del rango de funcionamiento de un motor de inducción controlado por un convertidor, donde se aprecia la primera zona de par constante, seguida de la zona de potencia constante, que se extiende hasta la velocidad máxima, donde a partir de ahí, mediante el debilitamiento del flujo del campo del estator se consiguen velocidades mayores. Pero la velocidad máxima de este tipo de motores está limitada por la velocidad crítica (más o menos dos veces la nominal), donde a esa velocidad se alcanza el par de ruptura de la máquina y la corriente es máxima. [23]

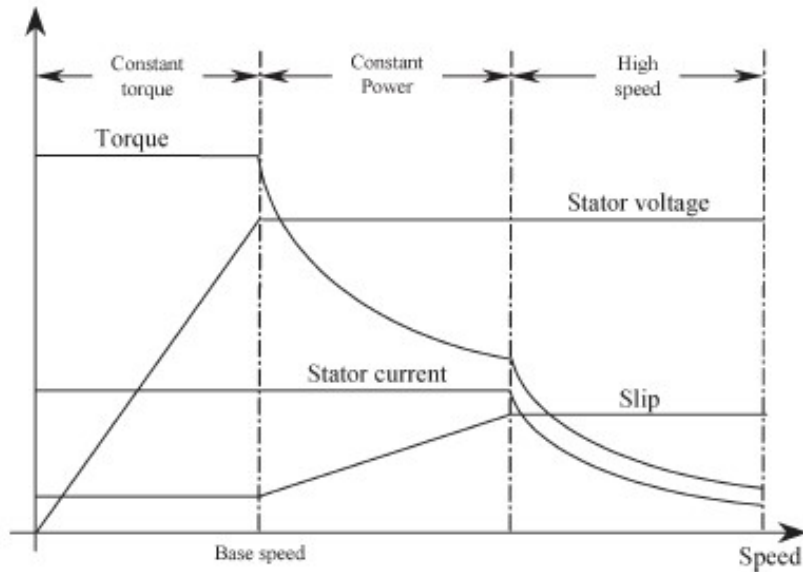


Imagen 11: Curva del rango de funcionamiento de un motor de inducción controlado por un convertidor [24]

Motor síncrono

En los motores síncronos, al igual que en los anteriores, también tienen dos opciones constructivas, con rotores bobinados o con rotor de imanes permanentes, dependiendo de la opción cambian sobre todo los rendimientos de las máquinas y algunas características, como se explica en el Anejo 2. En la versión de rotor bobinado, dichas bobinas son alimentadas por corriente continua por medio de anillos rozantes y escobillas, lo cual obliga a tener que suministrar dos tipos de corriente a una sola máquina y añade el problema de la conexión eléctrica del rotor, lo que implica mayor mantenimiento y menor fiabilidad. Por estas razones casi todos los motores síncronos tienen un rotor de imanes permanentes.

Estos motores alcanzan una altísima eficiencia ya que no necesitan alimentación del rotor y tienen una alta densidad de potencia, es decir, tienen un tamaño y peso reducido, además tienen la ventaja de disipar el calor de manera bastante eficiente.

Este tipo de motor se llama síncrono, porque gira siempre a velocidad de sincronismo, es decir a velocidad del campo creado por el estator, que como se menciona en el Anejo 2, depende del número de pares de polos y de la frecuencia. Entonces para el control de velocidad, la solución tradicional era usar la técnica de variar la frecuencia y la tensión de tal manera que el flujo permaneciera constante, con un inversor trabajando en PWM (funcionamiento descrito en el Anejo 1), pero esta técnica solo asegura un buen control en régimen permanente, no así en los transitorios, por tanto este control no nos vale para una aplicación con un régimen de operación tan cambiante como el del vehículo eléctrico. Por tanto, la solución más adecuada es el control vectorial, el cual controla el flujo y el par producido por la máquina de forma independiente, esto se consigue con un seguimiento de las dos componentes de la corriente del estator, la corriente magnetizante, y la que genera el par (corriente motriz), con el objetivo de corregir el ángulo que forman la tensión y la corriente del estator (ángulo de conducción) y poder mantener el flujo constante independientemente de la velocidad de giro. Con este sistema de control, se puede obtener un rango mucho más amplio de velocidades, hasta 3 o 4 veces la velocidad nominal, como se muestra en la Imagen 12. [25]

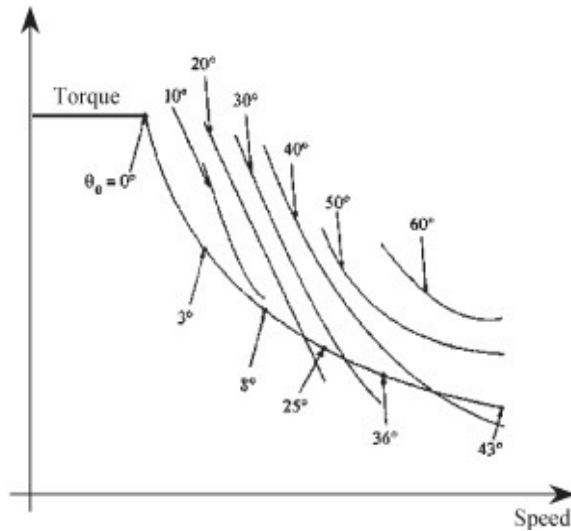


Imagen 12: Control del ángulo de conducción en un motor síncrono de imanes permanentes

Otro modo de control, especialmente para la variante de imanes permanentes es la de utilizar un devanado adicional en el estator, de tal forma que al alimentarlo produzca un campo, con el único fin de debilitar el campo producido por los imanes permanentes del rotor cuando se encuentra en el rango alta velocidad, de esta forma, se puede controlar la intensidad del campo del rotor, simplemente con la corriente que alimentamos al devanado adicional. Sin embargo este sistema tiene el inconveniente, que en el rango de muy altas velocidades, la eficiencia puede disminuir debido al riesgo de desmagnetización de los imanes permanentes. Lo que hace que el sistema de control más adecuado sea el del control vectorial.

Por otro lado, estos motores tienen algunas desventajas, como el coste de los imanes permanentes y la difícil construcción de motores de grandes potencias y debido a que la intensidad magnética del imán es permanente, la velocidad máxima del motor se ve limitada. [26] [27]

Existe una variante en investigación de este motor, que tiene la finalidad de integrarse directamente en la rueda del vehículo, donde el estator y el rotor están dispuestos de forma longitudinal sobre el eje, como se observa en la Imagen 13, y reciben el nombre de motores de flujo axial, ya que el flujo es paralelo al eje. Los principales inconvenientes de este motor son los esfuerzos axiales que tiene que soportar.

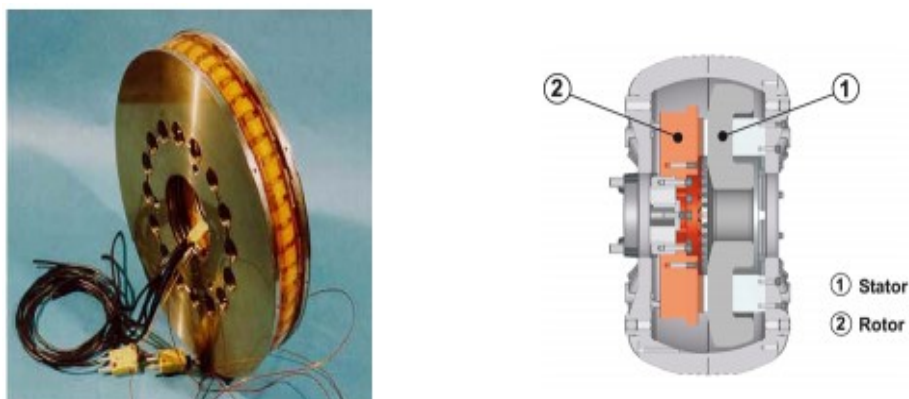


Imagen 13: Motores de flujo axial [28]

Motor de reluctancia variable

Los motores de reluctancia variable son motores de corriente continua, que al igual que el resto de motores, su principio de funcionamiento se encuentra explicado en el Anejo 2. La principal peculiaridad de estos motores, es que no necesitan ningún tipo de devanado, ni imán permanente, ni tampoco necesita escobillas ni conmutadores, lo cual hace que puedan fabricarse de manera simple y robusta, lo que significa que el precio no es muy caro y su tolerancia a fallos es bastante grande. Posee un control simple y buenas características de par-velocidad y un rango de potencia constante bastante largo, junto con un alto par de arranque y una velocidad máxima de operación muy alta (Imagen 14). Todo esto hace que este motor sea un gran candidato para ser el sistema de propulsión del vehículo eléctrico, donde tiene un gran potencial.

Otras ventajas son la alta capacidad de enfriamiento y por consiguiente la insensibilidad a las altas temperaturas, como consecuencia de la ausencia de devanados en el rotor. Otra ventaja sería la alta relación de par-inercia, lo que significa que posee bastante poca inercia, con lo que se consigue una aceleración más rápida.

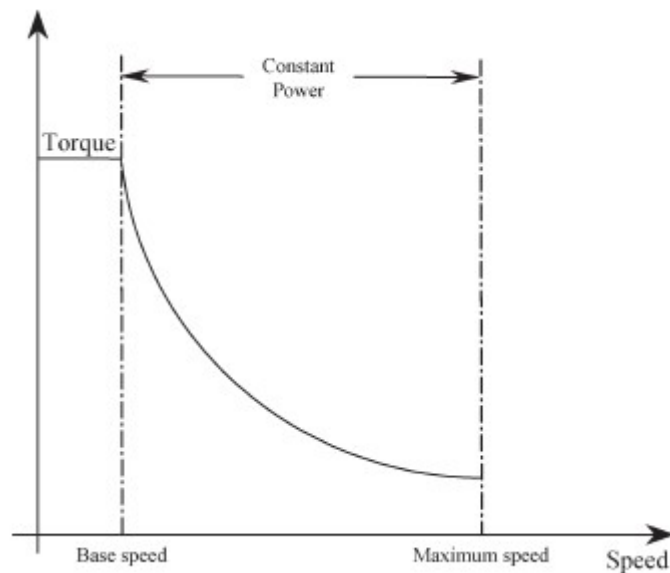


Imagen 14: Curva característica de los motores de reluctancia variable [29]

Pero este tipo de motores también tiene algunos inconvenientes, como la alta fluctuación de par para una misma velocidad o las altas pérdidas mecánicas a altas velocidades debido a la resistencia aerodinámica y las pérdidas por viscosidad del aire. Otro de las características de este motor que lo diferencia del resto es que genera bastante ruido acústico y electromagnético comparado con el resto de motores eléctricos, pero sin embargo para el caso del vehículo eléctrico este, en principio, inconveniente, puede no importar, ya que el ruido acústico generado por este motor sigue siendo mucho menor del generado por el de un motor de combustión interna. Por todo esto, se espera que este tipo de motor sea un candidato firme al sistema de propulsión de los VE sin que estas desventajas influyan demasiado. [26] [30]

ESTADO ACTUAL

Una vez analizados todos los componentes característicos del vehículo eléctrico, vamos a pasar a ver las diferentes soluciones que han adoptado diversos fabricantes para los sistemas de propulsión y almacenamiento. Para ello vamos a realizar un análisis de los coches completamente eléctricos que están actualmente disponibles en España para su adquisición, y algunos que aún no están a la venta aún, pero se prevé que estén disponibles antes de que termine el 2018. [31] [32]

Este análisis se centra en los modelos catalogados como turismos y furgonetas equivalentes (es decir, al menos 5 plazas para transporte de personas y con ventanillas traseras), solo se consideran coches completamente eléctricos enchufables con batería recargable, sin ningún tipo de motor de combustión interna. Hemos analizado 18 modelos, los cuales tienen diferentes versiones en función del precio, en estos casos se ha elegido siempre la versión más completa del modelo.

De cada modelo se indica la potencia total en CV del coche, la autonomía del mismo en km, el tipo de batería que utiliza y su capacidad en kWh, el tipo de tecnología del motor montado y su par máximo en Nm, y finalmente su consumo eléctrico homologado a los 100 km.

En cuanto a lo que respecta al consumo y a la autonomía, es conveniente tener presente que actualmente en toda Europa, coexisten dos formas diferentes de medir el consumo y la autonomía de los coches eléctricos: el antiguo ciclo NEDC (New European Driving Cycle) y el nuevo ciclo WLTP (Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure). Hasta septiembre de 2017 solo había una forma de medir la autonomía de los coches eléctricos en Europa, era el ciclo de homologación NEDC, donde los consumos de los coches salían bastante bajos, y por extensión las autonomías resultaban bastante altas de los que los conductores experimentaban en la realidad del día a día.

La razón está en que las condiciones de este ciclo de homologación son muy poco exigentes y realistas a la hora de medir el consumo, realizando la medición en un edificio cerrado, donde se pone el coche sobre rodillos que tienen diferentes niveles de resistencia para compensar el peso o la aerodinámica del coche en análisis, pero no se tienen en cuenta la resistencia del viento ni los desniveles y en el momento de la prueba solo está el conductor dentro, y no se enciende el aire acondicionado ni ningún otro dispositivo que consuma energía y además se realiza una conducción muy eficiente donde las aceleraciones se realizan con mucha suavidad. Por tanto, con estas condiciones resulta normal que el consumo homologado se distancie bastante del consumo en condiciones de uso real.

A partir del 1 de septiembre del 2017, entró en vigor el nuevo ciclo de homologación WLTP, el cual es más exigente, donde la prueba dura más tiempo, se alcanzan velocidades más altas y las aceleraciones son más fuertes. Por esto los consumos son mayores y las autonomías son menores, pero estas medidas son más realistas y muy cercanas a las que obtendrá un conductor medio.

Lo que sucede es que durante un tiempo, en la publicidad e información que nos dan los fabricantes de los coches, podremos encontrar modelos que indican la autonomía en el antiguo ciclo NEDC y otros modelos con el nuevo ciclo WLTP, ya que hasta septiembre de 2019, los fabricantes no están obligados a poner las autonomías del nuevo ciclo de homologación.

De todos modos, para poder comparar autonomías de diferentes coches eléctricos, aunque todavía no se haya realizado la nueva homologación conforme al ciclo WLTP, podemos considerar un factor de relación medio entre los dos ciclos coexistentes, donde de media la autonomía WLTP es un 25% menor que la autonomía NEDC. Como con cualquier media, no pasará exactamente así en todos los coches, pues algunos factores como la eficiencia de su motor, gestión electrónica, el tipo de neumáticos, su masa o su aerodinámica, pueden hacer que se note un poco más o menos la diferencia entre las dos autonomías. [32]

Teniendo en cuenta estos dos últimos aspectos, y como la mayoría de los fabricantes aún tienen solo la autonomía en el ciclo de homologación viejo (NEDC) y aun sabiendo que es la autonomía menos realista, en este análisis expresaremos la autonomía de los modelos analizados en relación al ciclo viejo NEDC, y en el caso de los modelos más nuevos que solo dispongan de autonomía WLTP, usaremos el factor de relación entre ambos ciclos para tener la autonomía equivalente en el ciclo NEDC.

Con todas estas aclaraciones previas, a continuación presentamos la tabla resumen de las principales características de los 18 modelos analizados, que nos ayudará a tener una idea general de que soluciones adoptan las principales marcas del sector automovilístico para los principales requisitos de los vehículos eléctricos.

Modelo	Potencia (CV)	Autonomía (km)	Batería		Motor		Consumo (kWh/100km)
			Capacidad (kWh)	Tipo	Tipo	Par máximo (Nm)	
Audi e-tron quattro*	503	500	95	Ion-Litio	-	800	-
BMW i3s 2018	170	190	22	Ion-Litio	Sin escobillas (CC)	250	14,3
BYD e6	122	300	64	Ion-Litio	Síncrono imanes permanentes (CA)	450	17,3
Citroen C-zero	67	150	16	Ion-Litio	Síncrono imanes permanentes (CA)	196	12,6
Ford Focus Electric	146	225	33,5	Ion-Litio	Síncrono imanes permanentes (CA)	255	15,6
Hyundai Ioniq Eléctrico	120	280	28	Ion-Litio	Síncrono imanes permanentes (CA)	295	15,4
Hyundai Kona eléctrico*	204	640	64	Polímero de Litio	-	696	15
Jaguar I-Pace	400	640	90	Ion-Litio	Síncrono imanes permanentes (CA)	696	15
Kia Soul EV	111	212	27	Polímero de Litio	Síncrono imanes permanentes (CA)	285	12,7
Mercedes-Benz Clase B 250e	180	200	28	Ion-Litio	-	340	16,6
Nissan Leaf 2018	150	380	40	Ion-Litio	Síncrono imanes permanentes (CA)	320	15
Opel Ampera-e	204	520	60	Ion-Litio	Síncrono imanes permanentes (CA)	360	14,5
Renault Kangoo ze 2017	60	270	33	Ion-Litio	Síncrono rotor bobinado (CA)	226	15,5
Renault Zoe	92	403	41	Ion-Litio	Síncrono rotor bobinado (CA)	225	13,3
Tesla Model 3	261	600	80	Ion-Litio	Síncrono imanes permanentes (CA)	429	16,1
Tesla Model S P100D	611	632	100	Ion-Litio	(x2) Inducción de 4 polos (CA)	967	15
Tesla Model X	611	565	100	Ion-Litio	(x2) Inducción de 4 polos (CA)	967	14,4
Volkswagen e-Golf	136	300	35,8	Ion-Litio	Síncrono imanes permanentes (CA)	290	12,7

Tabla 1: Propiedades de los coches puramente eléctricos disponibles actualmente en España [33] [34] [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41]

* Estos modelos aún no han salido al mercado, y no se han publicado más detalles, pero se prevé que salgan antes de que se termine 2018.

Ahora pasaremos a analizar los datos recogidos en esta tabla, comenzando por la potencia, como podemos ver hay una oferta bastante amplia en cuanto al caballaje desde 60 a 611 CV con lo que podemos establecer una relación casi directa en el par máximo entregado como se ve en la tabla 1, donde el la máxima potencia también coincide con el mayor par (967 Nm) y más o menos lo mismo ocurre con el mínimo (67 CV – 196 Nm).

En cuanto a la autonomía homologada según el ciclo NEDC, también podemos establecer una relación directa entre esta y la capacidad de la batería, como es de esperar, cuanto más capacidad tenga la batería más kilómetros podrá recorrer con una sola carga. Y como también se puede intuir, para una misma capacidad de batería, cuanto mayor es la autonomía menor es el consumo a los 100 km. Vemos que actualmente ya hay vehículos disponibles con una elevada autonomía, hasta 632 km, pero cabe comentar que cuanto mayor es la autonomía el precio de adquisición sube considerablemente. En cuanto a los consumos vemos que están todos entre 12.5 y 17.5 kWh cada 100 km, con un consumo de 14.765 kWh/100 km de media, si aplicamos el factor de conversión para obtener el consumo equivalente en el ciclo WLTP obtenemos un consumo medio 18.456 kWh/100 km, que se acercaría más a las condiciones de uso reales.

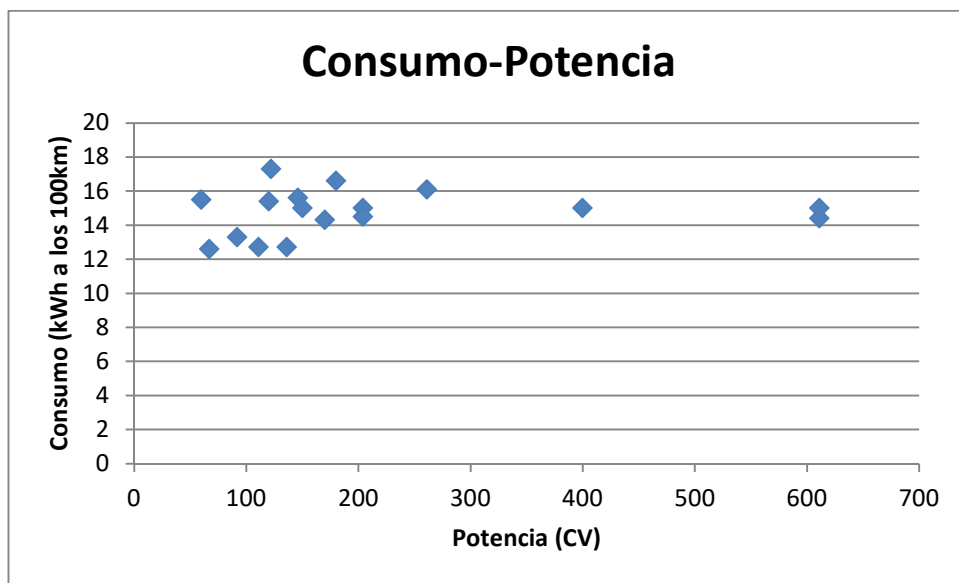


Imagen 15: Gráfica que muestra la dependencia entre el consumo y la potencia de cada vehículo analizado

En la imagen 15 se observa la relación que presenta el consumo respecto de la potencia de cada uno de los vehículos analizados, como se deducir, la dependencia de la potencia del consumo es prácticamente nula, por lo que se concluye que, de los coches disponibles hoy en día, todos tienen un consumo muy parecido e incluso con potencias altas se puede conseguir consumos cercanos a la media.

Con lo que respecta al tipo de baterías utilizadas, vemos claramente un dominio total de las baterías de Litio, ya sean de Ion-Litio (la mayoría), como las de polímero de Litio. Aquí se confirma el dominio de las baterías de Ion-Litio que ya se anunciaba en el capítulo de baterías y según las previsiones parece que vaya a seguir dominando el sector de las baterías de alta potencia sobretodo viendo la progresión de capacidad que se ha conseguido estos últimos años, como podemos observar dos modelos de Tesla montan baterías de hasta 100 kWh.

Ahora entramos en el tema de más relevancia para este TFG, el tipo de motor que montan los diferentes modelos de los vehículos analizados. Vemos que hay una tecnología predominante, el motor síncrono de corriente alterna con imanes permanentes, que lo montan 10 de los 18 modelos analizados, donde podemos ver una gran variabilidad de consumos con el mismo motor, desde 12.6 hasta 17.3, esto puede ser debido a que el consumo homologado, como ya se ha comentado anteriormente, depende de la gestión electrónica, el tipo de neumáticos, su

masa, su aerodinámica o de la eficiencia de su motor, que puede utilizar la misma tecnología pero puede tener un diseño completamente diferente, con lo cual la eficiencia puede cambiar enormemente.

Hay también una variante de motor síncrono que también ha sido utilizado en otros modelos, es básicamente el cambio de los imanes permanentes del rotor por un rotor bobinado, lo que implica que se debe alimentar mediante anillos rozantes y escobillas con corriente continua. Esta es la solución adoptada por Renault para sus modelos Zoe y Kangoo ZE 2017, donde a pesar de que en un principio parece un inconveniente tener un motor que necesita alimentación de dos tipos de corriente, y además la transmisión eléctrica con escobillas, han conseguido un buen consumo medio (13.3 y 15.5 kWh respectivamente) a los 100 km. Con la posibilidad de acceder al devanado del rotor que presenta este tipo de motor, se consigue un control más sencillo que puede ser la razón de los buenos rendimientos que presentan estos modelos.

Otra de las tecnologías utilizadas para la propulsión de los vehículos son los motores de inducción o asíncronos de corriente alterna, concretamente lo monta Tesla en sus dos modelos de mayor potencia y con menor consumo, pero combina dos de estos motores, uno en eje delantero y otro en eje trasero. Pero como vemos los consumos de estos modelos (14.4 y 15 kWh a los 100 km) están muy cercanos de la media del resto de motores.

Y el último modelo de motor diferente que encontramos en este análisis es el motor de corriente continua sin escobillas, que es la solución que propone BMW en su modelo i3s, el cual es el primer vehículo totalmente eléctrico de la marca alemana. Este tipo de motor necesita un dispositivo electrónico bastante sofisticado para el control de la conmutación y sensores para detectar la posición del rotor para establecer la correcta secuencia de conmutación, como ya se explicó en la capítulo de los tipos de motores. Pero como vemos el consumo de este un poco inferior a la media (14.3 kWh a los 100 km), lo que indica que puede ser una buena solución, a pesar que su potencia (125 CV) no es de las más altas, pero puede ser suficiente en muchos casos.

Lo que hemos visto con este estudio comparativo, es que la tecnología del motor escogida no influye mucho es el consumo, ya que todos los modelos están alrededor de 15 kWh a los 100 km y no se ven patrones donde el tipo de motor puede influir en este. Si acaso se podría destacar que los dos modelos con mayor potencia montan motores de inducción pero divididos en dos unidades con muy buenos resultados de consumo.

Por tanto concluimos, que a priori no hay una tecnología motriz dominante, y que varias de ellas pueden optar a la propulsión del vehículo eléctrico. También cabe destacar, que no solo el rendimiento del motor es importante, sino que el resto de dispositivos auxiliares también influyen significativamente en el consumo de energía.

ANÁLISIS ECONÓMICO

En este apartado nos disponemos a realizar un estudio económico comparativo entre el coste que tienen los coches convencionales de combustión interna y el gasto que tienen los vehículos eléctricos en igualdad de condiciones. Además realizaremos un análisis de las emisiones equivalentes de CO₂ reales que emite cada tipo de vehículo.

Para comenzar con estos dos análisis, tenemos que obtener los consumos medios tanto de los vehículos eléctricos como de los de combustión interna. Para el consumo medio de los coches eléctricos utilizaremos los datos de la tabla 1 del apartado anterior, donde se analizan los modelos completamente eléctricos que están actualmente a la venta en España, por tanto se puede considerar que el consumo medio de los 18 modelos analizados es un dato bastante significativo para compararlo con el consumo de los coches de combustión. Pero como ya dijimos en su momento, en esta tabla se indicaban los consumos con respecto al ciclo de homologación NEDC, el cual se aleja bastante del consumo en condiciones reales, por tanto, para reflejar el coste real del vehículo eléctrico se considerará el consumo según el nuevo ciclo de homologación WLTP, el cual mide unos consumos que se ajustan mejor a las condiciones de uso real. Con lo que para realizar la conversión de autonomías del ciclo viejo (NEDC) al nuevo (WLTP) se usará un factor de relación medio entre los dos ciclos coexistentes, donde de media la autonomía WLTP es un 25% menor que la autonomía NEDC. Con lo que obtenemos que el consumo medio de los vehículos eléctricos según el ciclo viejo es de 14.765 kWh/100 km y según el nuevo ciclo más realista 18.456 kWh/100 km, este último dato es el que utilizaremos para la comparación.

Consumo eléctrico medio (NEDC)	14,7647059	kWh/100km
Consumo eléctrico real medio (WLTP)	18,4558824	kWh/100km

En cuanto a los vehículos de combustión interna, se dividen en dos grandes bloques, los motores de gasolina y los de gasoil, ya que dependiendo del tipo de combustible y de motor se consiguen diferentes consumos, vamos a diferenciar estos dos bloques y a compararlos por separado con el vehículo eléctrico. Actualmente los coches convencionales del parque automovilístico español tienen un rango de consumos medios muy amplio, por tanto es muy difícil establecer un consumo medio de estos, por tanto nos limitamos a citar un estudio del IDAE que se hizo el año pasado sobre los vehículos turismo de venta en España, donde nos da indicaciones sobre consumos y emisiones de CO₂ [42]. De ahí sacamos que dato de que “Por cada litro de gasolina que se consume, el motor emite unos 2.32 kg de CO₂, lo que permite recorrer en promedio 13 km, mientras que un litro de gasóleo consumido emite unos 2.6 kg de CO₂ para un recorrido de unos 16 km”. Con estos datos se saca que el consumo a los 100 km son de 7.7 litros para los coches de gasolina y de 6.25 litros para los de gasoil.

Consumo gasolina medio	7,7	litros/100km
Consumo gasoil medio	6,25	litros/100km

Una vez tenemos los consumos de cada tipo de vehículo, tenemos que obtener los precios de cada recurso para poder comparar los diferentes gastos. En cuanto al precio de la electricidad para suministrar la carga al vehículo eléctrico, puede oscilar entre un rango muy grande de

precios, por tanto y teniendo en cuenta todas las tarifas eléctricas que hay disponibles en España, haremos primero un par de consideraciones. En primer lugar, la recarga completa de un coche eléctrico suele recomendarse que se haga por la noche, porque se puede completar totalmente la carga sin necesidad de realizar una carga rápida, lo cual es beneficioso para la vida de la batería. Por otra parte en España actualmente existe una tarifa eléctrica regulada por el gobierno, la cual está especialmente pensada para incentivar la compra de vehículos eléctricos y es una tarifa que ofrece una discriminación de tres períodos donde el período supervalle: de 01 horas hasta 07 horas, ofrece un precio más reducido para incentivar las cargas de las baterías de los automóviles. Para poder acogerse a esta tarifa que recibe el nombre de 2.0.DHS uno de los requisitos es que estés conectado a una red de baja tensión (<1 kV) y que tu potencia contratada sea menor o igual a 10 kW.

Estos son requisitos que casi todos los hogares normales cumplen, con lo que si se instala una toma de carga para el coche eléctrico en el garaje familiar donde se cargará el vehículo habitualmente, esta tarifa resulta con diferencia la más apropiada del resto de ofertas. Por tanto, suponiendo que la mayoría de propietarios de coches eléctricos contratan dicha tarifa especialmente diseñada para ellos, y que realicen la mayoría de cargas durante el período supervalle, se puede adoptar el precio de la electricidad que consume dicho vehículo al precio de la energía en este período.

Analizando la evolución temporal del precio de la energía de esta tarifa que nos facilita Red Eléctrica de España [43], obtenemos la Imagen 16, donde podemos ver la evolución del término de energía durante un mes aproximadamente (entre el 13/01/2018 y 16/02/2018) donde claramente se distingue que el período supervalle son los picos mínimos, los cuales oscilan un poco pero siempre están alrededor de los 60 €/ MWh, lo que es igual a 0.06 €/ kWh. Este precio ya incluye los costes de la energía, los de comercialización, los de servicio de ajuste y los de operación y mantenimiento. Pero este precio es antes de impuestos, al cual se le tiene que añadir el impuesto eléctrico y el IVA.

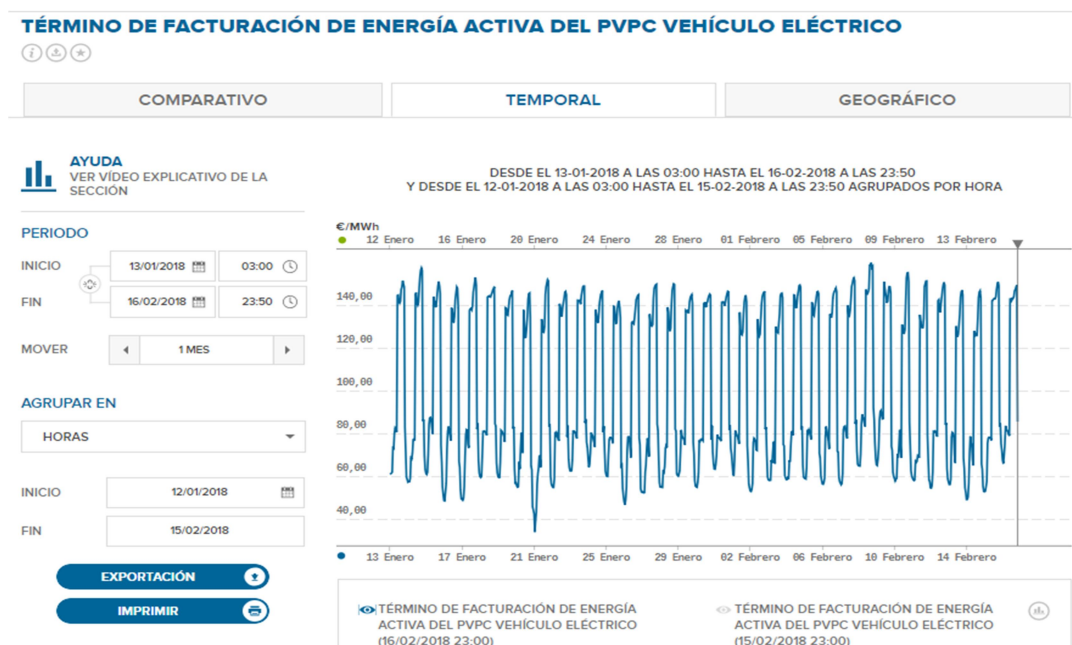


Imagen 16: Evolución temporal del término de energía de la tarifa 2.0.DHS [43]

No consideramos el término de potencia porque en el caso supuesto que se comparte instalación para realizar la carga del vehículo y para la instalación doméstica, el término de potencia sería un coste fijo que se tendría que pagar igual si no se recargase el vehículo eléctrico.

Por tanto el precio de la electricidad que se va considerar en este estudio, será un poco mayor de los 0.06 €/kWh del precio medio de la energía por efecto de los impuestos, pero dado que los impuestos se aplican a toda la base imponible, es decir a los costes fijos más los costes variables, no se aplicarán directamente todos los impuestos, por consiguiente, al precio que resulta de aplicarle los dos impuestos (IVA y el especial de la electricidad), se le descontará un 18 %, que es la cantidad que se estima que corresponde a la parte de impuestos que se paga por la parte fija. Con todo esto, el precio de la electricidad que nos parece significativo para realizar la comparación de costes entre los vehículos tradicionales y los eléctricos es de 0.0624 €/kWh.

Por otra parte, este precio es el resultado de la elección de unas tarifas subvencionadas con ayudas del estado y muy posiblemente temporales, y suponiendo que usamos la misma instalación que la doméstica, dando por hecho que disponemos de un garaje privado para poder hacerlo, cosa que no refleja el coste real que supondría la generación de esta energía. Para realizar un análisis más realista y sobre todo a largo plazo, vamos a coger el precio medio que tiene la electricidad en España, usando los datos que encontramos en el informe anual de la IEA (International Energy Agency) sobre la energía eléctrica [44], donde según el último informe disponible con datos del 2017, el precio medio de la electricidad en España es de 0.2426 €/kWh

Precio electricidad con ayudas	0,0624	€/kWh
Precio electricidad sin ayudas	0,2426	€/kWh

Por la parte de motores de combustión interna, el coste de los carburantes (gasolina y gasoil) es mucho más sencillo de encontrar, ya que en todas las gasolinera podemos encontrar este dato, pero dependiendo de gasolineras, el precio puede cambiar significativamente, por tanto con la ayuda de la página web del Ministerio de Energía Turismo y agenda digital [45], donde nos facilita el precio diario de todos los productos que ofrece cada estación de servicio que hay en el territorio español. Para analizar los precios, primero tenemos que elegir qué tipo de carburante vamos a analizar, pero, tanto en la gasolina como en el gasóleo, cada uno tiene claramente diferenciado el producto más usado, para la gasolina es la Gasolina 95 y para el diésel, es el Gasóleo A. Y para escoger un precio representativo de estos productos, hemos cogido los precios de todas las gasolineras de España que ofrecen estos productos de un día al azar, exactamente el 14/05/2018, ya que hemos considerado que la fluctuación de precios es muy baja a lo largo de los meses, y hemos hecho la media de cada producto, obteniendo los siguientes resultados:

Precio gasolina 95	1,452	€/litro
Precio gasoil A	1,2156	€/litro

Una vez tenemos los precios de todas las energías, a continuación vamos a pasar a la parte del análisis de emisiones de CO₂, donde con los datos de los consumos anteriores, solo nos falta saber las emisiones equivalentes que realizan por litro de combustible y por kWh consumido, para poder completar el balance. Con el citado artículo del IDAE [42], ya tenemos los datos medios de emisiones equivalentes de CO₂ por litro de gasolina y de gasóleo, que son los siguientes:

Emisiones equivalentes gasolina	2,3	kg CO ₂ /litro
Emisiones equivalentes gasoil	2,6	kg CO ₂ /litro

En cuanto a la electricidad es más difícil de determinar las emisiones equivalentes emitidas por kWh consumido, ya que el sistema de generación eléctrica español está formado por centrales de muy diversas tecnologías, que suponen una diferencia de emisiones bastante importante dependiendo de cuál de ellas esté operando. Dada esta complejidad, el Ministerio de Energía junto con el operador del sistema emite un informe [46], proporcionando el dato de emisiones equivalentes medio por kWh consumido, que se resumen en la tabla siguiente (Imagen 17):

RESUMEN DE VALORES PROPUESTOS

	VALORES PROPUESTOS		
	Coeficiente de paso CO ₂ /Energía final (kgCO ₂ /kWh)	Coeficiente de paso Energía Primaria/Energía final	
		(*)	tep e. p./MWh e e.f.
SISTEMA NACIONAL	0,357	0,207	2,403
SISTEMA PENINSULAR	0,331	0,204	2,368
SISTEMAS EXTRAPENINSULARES	0,833	0,259	3,011
Baleares	0,932	0,262	3,049
Canarias	0,776	0,257	2,994
Ceuta y Melilla	0,721	0,240	2,790

Imagen 17: Factores de emisión de CO₂ y coeficientes de paso de energía primaria [46]

Para este análisis cogeremos el valor del sistema nacional, por tanto el coeficiente de paso de emisiones equivalentes de CO₂ por kWh consumido de energía final es:

Emisiones equivalentes electricidad	0,357	kg CO ₂ /kWh
--	-------	-------------------------

Por tanto, ya disponemos de todos los datos para hacer el estudio comparativo tanto a nivel económico como a nivel de emisiones. La tabla siguiente muestra el coste económico que tiene cada tipo de vehículo analizado a los 100 km, así como las emisiones equivalentes de CO₂ que producen cada 100 km recorridos:

	Eléctrico (con ayudas)	Eléctrico (sin ayudas)	Gasolina	Gasóleo
Coste medio (€/100km)	1,1516	4,4774	11,1804	7,5975
Emisiones (kg de CO₂/100km)	6,58875	6,58875	17,71	16,25

Como se muestra en la tabla, vemos que el coche eléctrico gana tanto en coste por kilómetro como en emisiones de CO₂ de manera bastante clara. Vemos que el coste medio del vehículo eléctrico con la tarifa subvencionada, puede llegar a ser el 10% de lo que gastaría un coche gasolina y un 15% del coche de gasóleo recorriendo los mismos kilómetros, cosa que cambia un poco con los precios medios de la electricidad, pero sigue siendo casi la mitad de precio que los vehículos de combustibles fósiles.

En cuanto al tema de emisiones vuelve a ganar el coche eléctrico, como se esperaba, pero no siendo estas emisiones nulas, suponen casi un 40% de las que emiten los vehículos de combustibles fósiles. En segunda posición se quedaría el coche de gasóleo, que aunque es más contaminante que la gasolina, debido a un consumo más reducido, hace que a los 100 km recorridos el balance de emisiones sea menor que el de un coche de gasolina, pero queda muy lejos del coche eléctrico, que aporta otra ventaja en el ámbito de la contaminación, ya que las emisiones generadas por estos vehículos no son a nivel local, como en los de combustión interna, esto favorece que en los sitios más transitados como son las grandes ciudades o principales autovías, no haya un nivel de contaminación en el aire tan elevado.

Por tanto podemos concluir que el vehículo eléctrico es el más barato en cuanto a coste medio y el que menos emisiones de CO₂ genera a los 100 km recorridos, con bastante diferencia respecto a los coches de combustión interna, donde el precio incentivado se prevé que poco a poco vaya aumentando, tendiendo al coste medio de la electricidad a largo plazo, cosa que habrá que tener en cuenta en el futuro cercano. Por otra parte, vemos que el coste medio de los coches de gasolina es mayor que el de los que utilizan gasóleo, y en cuanto a emisiones de CO₂, ambos motores están muy a la par, siendo un poco más limpio el de gasóleo.

ENSAYOS

En este apartado nos centraremos en la parte más decisiva del vehículo eléctrico, el componente encargado de transformar la energía eléctrica en fuerza de tracción, el motor eléctrico. Este es un punto clave en el diseño de un vehículo eléctrico, ya que como hemos visto, existen bastantes tipos de motores eléctricos con diferentes características y diversos modos de funcionamiento. Teniendo en cuenta la diversidad de posibilidades y sobretodo las elecciones que han tomado a día de hoy los grandes fabricantes automovilísticos que han presentado en sus primeros modelos eléctricos, como se ha comentado en apartado del análisis del estado actual, se plantea el ensayo experimental de las principales máquinas eléctricas que más opciones tienen para ser montadas en un coche, con el objetivo de comparar las diversas tecnologías y sus comportamientos delante de las exigencias de un vehículo eléctrico.

Vistos los resultados del análisis del estado actual de los vehículos eléctricos, vemos que, con lo que respecta a la tecnología del motor de tracción, actualmente hay tres tipos de motor diferentes: motor de corriente continua (CC), motor síncrono (CA) y motor asíncrono o de inducción (CA), donde predomina claramente el síncrono con la opción de imanes permanentes. Con esta consideración y con las restricciones de material disponible, se plantea el ensayo de estas tres máquinas eléctricas clásicas, con la intención de obtener los patrones de comportamiento con diferentes puntos funcionamiento de cada uno de ellos. Concretamente los motores que se van a ensayar son: Motor de corriente continua con escobillas, Motor síncrono de rotor bobinado y Motor asíncrono o de inducción.

Método de ensayo

Todos los motores ensayados se ha empleado la misma metodología de ensayo, como se indica en la norma UNE-EN 60349-1 para motores de corriente continua, como en la norma UNE-EN 60349-2 para motores de corriente alterna, uno de los métodos recomendados para ensayar un motor eléctrico es el procedimiento Back to back, el cual consiste en poner el motor a ensayar junto con otro igual de idénticas características, conectados mecánicamente entre ellos, de tal forma que uno trabaje como motor y el otro de generador, de tal forma controlamos la tensión e intensidad de entrada y de salida para que trabajen ambos en puntos de funcionamiento lo más parecidos posible, ya que hay pérdidas del motor que son bastante fáciles de calcular, como las del cobre, que simplemente con la intensidad que circula por los devanados y la resistencia de cada uno de ellos, se pueden calcular, pero existen otras pérdidas, como las del hierro y las de rozamiento y ventilación, que no se pueden medir fácilmente, por esta razón, se ponen los dos motores idénticos conectados, cada uno trabajando en un modo, pero los dos en el mismo punto de funcionamiento, con lo que se puede asumir que las pérdidas que no se pueden calcular fácilmente se pueden considerar iguales en los dos motores, por tanto, controlando la potencia a la entrada y a la salida y restando las pérdidas que si se pueden cuantificar, las otras pueden ser calculadas por diferencia de potencias, y como ahora ya conocemos todas las pérdidas, podemos calcular el par que entrega el motor en ensayo en solitario, y de ahí sacar su rendimiento para cualquier punto de funcionamiento.

Para caracterizar el patrón de funcionamiento de cada motor, el gráfico que mejor lo representa es el de par-velocidad, como ya se ha visto en correspondiente apartado de motores. Aparte de estos dos parámetros, otro esencial va a ser el rendimiento en cada punto de ese gráfico. Por tanto el objetivo de los ensayos, es conseguir diferentes puntos de par y velocidad para

confeccionar el gráfico representativo del comportamiento de cada máquina y por supuesto el rendimiento de cada uno de esos puntos, para poder obtener las curvas de isorendimiento sobre el gráfico par-velocidad y así encontrar las zonas de mayor eficiencia para cada motor, para un posterior análisis comparativo entre ellos y ver cual se adaptaría mejor a las exigencias del vehículo eléctrico.

Con los objetivos y la metodología de los ensayos ya claros, vamos a pasar ya al primer motor en poner a prueba, el motor de corriente continua.

Motor de corriente continua

El motor ensayado es del tipo de corriente continua con escobillas con excitación independiente y dos pares de polos, complementado con devanados de compensación y de polos auxiliares, donde el primero tiene la misión de anular el efecto sobre el estator del campo creado por el rotor, para evitar la deformación del campo y los esfuerzos que se inducen en el estator, y el segundo hace la función de eliminar la corriente de cortocircuito en las escobillas para mejorar la conmutación en el colector de delgas, y así alargar la vida de las mismas evitando que salten chispas. Las características técnicas del motor son: una potencia nominal de 600 W, una velocidad base de 1500 rpm y con un peso de 16.334 kg, lo que significa que su densidad energética es de 36.73 W/kg. Siguiendo la metodología descrita anteriormente, acoplamos mecánicamente las dos máquinas idénticas (Imagen 18), y para la excitación de los devanados de los estatores de las dos máquinas, los alimentaremos los dos juntos puestos en serie con una misma fuente, independiente de la de alimentación del rotor, de tal forma que conseguimos una excitación con la misma corriente en las dos máquinas. Esto es parte de las medidas que hay que adoptar para poder asumir las pérdidas no medibles iguales en los dos motores.

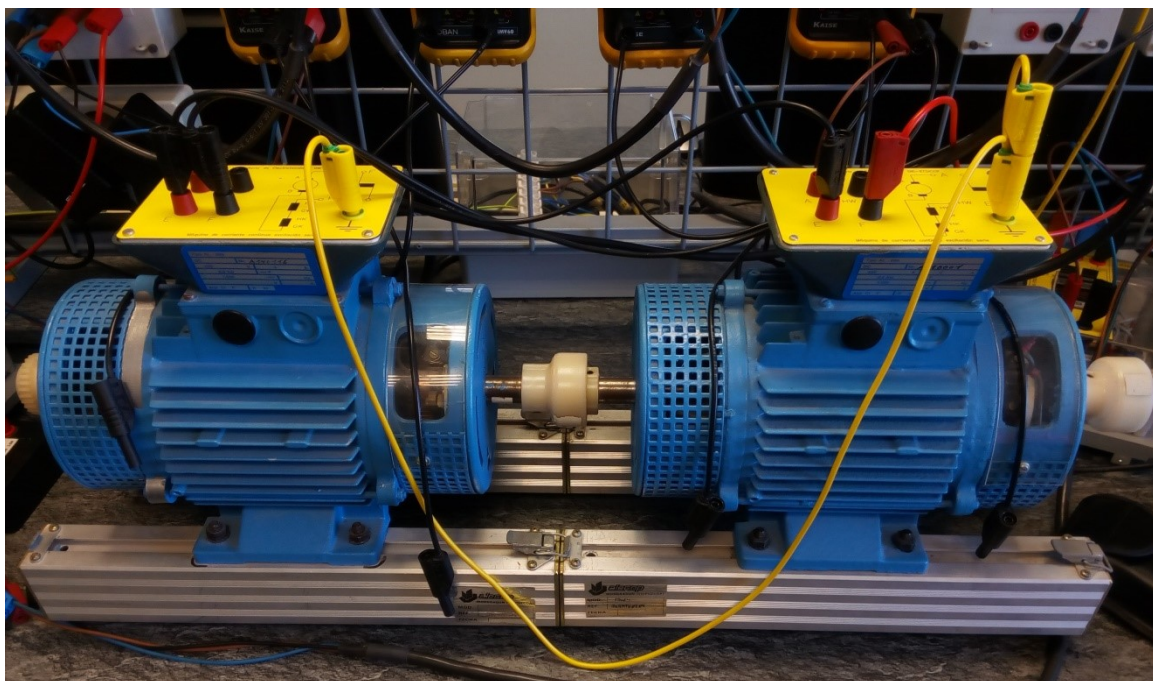


Imagen 18: Detalle del montaje del ensayo del motor de corriente continua: las dos máquinas acopladas mecánicamente con alimentación en serie de los devanados del estator de cada máquina, con una fuente independiente

Por tanto, tenemos dos fuentes de alimentación de corriente continua completamente independientes, una para alimentar la excitación de los devanados de los estatores de los dos motores, que crearán un campo magnético fijo en cada uno de ellos, y la otra para suministrar corriente al rotor, que se transmitirá mediante las escobillas y el colector de delgas, que es el encargado de mantener el campo que se produce en el rotor perpendicular al producido por el estator, y debido a la interacción de estos dos campos, se produce un par mecánico que se transmite a la máquina que actúa como generador, donde el giro del rotor junto con la excitación del mismo, induce un campo magnético en el estator, que al mismo tiempo induce una tensión en los bornes de salida del generador.

Una vez explicado el montaje, pasamos a la forma de funcionamiento. Como hemos comentado ya, el objetivo es obtener el rendimiento para diferentes puntos de par y velocidad, para ello, como sabemos que la tensión de alimentación del rotor es directamente proporcional a la velocidad de giro, iremos variando dicha tensión con pequeños incrementos hasta alcanzar la máxima velocidad, que en este caso, como indica la norma, es un 120% de la base, es decir, 1800 rpm. Pero con el barrido de velocidades no nos basta, para conseguir diferentes pares entregados por el motor en ensayo, tendremos que meter diferentes cargas que consuman la potencia que estamos generando en el segundo motor, con ello conseguimos que para la misma tensión de alimentación y similar velocidad, tengamos puntos con diferentes pares entregados, así cuanto más carga conectamos mayor será el par para una tensión de entrada dada, aquí el límite es la intensidad de alimentación que circula por el rotor, donde podemos alcanzar hasta 3.6 A de forma segura (120% de la nominal).

Una tercera variable que podemos controlar, es la intensidad de la excitación, ya que este motor de corriente continua tiene el estator bobinado y por tanto podemos regular dicha intensidad, donde dependiendo de ella se puede alcanzar mayor o menor par máximo. Por otro lado, los motores de corriente continua que incorporan imanes permanentes en el estator para producir el campo estático, no disponen de regulación de la intensidad de este campo, pero a cambio tienen un rendimiento eléctrico mayor, ya que no necesita energía para crear dicho campo, y vistos los resultados del apartado del estado actual donde se priorizan los rendimientos elevados al control minucioso, hemos optado por hacer diversas medidas con intensidades de excitación constantes, intentando así recrear el comportamiento que tendrían motores de corriente continua de imanes permanentes con diferentes intensidades de campo, es decir con imanes más potentes o menos, y a la vez analizar la influencia de la intensidad de excitación sobre el rendimiento de la máquina.

Para elegir distintos valores de la corriente de excitación hemos tenido en cuenta que el límite en este caso sería la intensidad nominal (3 A) y también la saturación del hierro de la máquina, para ello hemos hecho dos ensayos de saturación, uno para cada máquina y los resultados son los que se muestran en las figuras 19 y 20. Para ver dicha influencia de la corriente de excitación sobre el rendimiento, se harán tres ensayos diferentes con intensidades de excitación constantes y teniendo en cuenta que la zona más idónea para trabajar es la lineal de la curva de saturación, se han elegido los siguientes puntos: uno con excitación de 1 A, otro con 2 A y finalmente otro con 3 A.

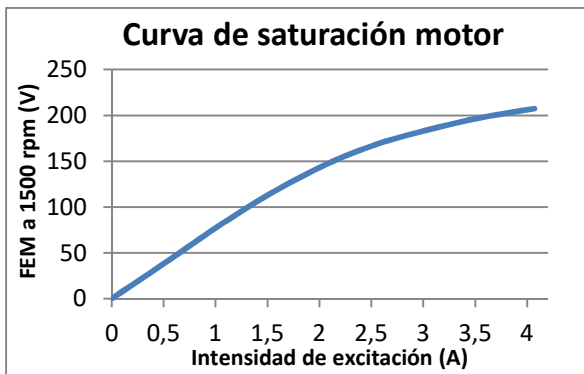


Imagen 19: Curva de saturación del modo motor de la máquina de corriente continua

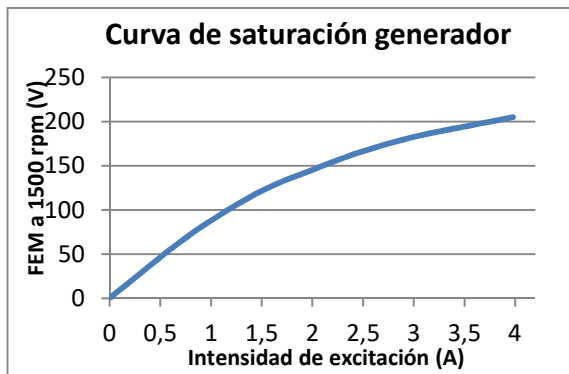


Imagen 20: Curva de saturación del modo generador de la máquina de corriente continua

Teniendo claros los límites que existen, ajustando las variables de control y midiendo todos los parámetros necesarios, obtenemos los siguientes mapas de puntos de funcionamiento par-velocidad para cada valor de intensidad de excitación:

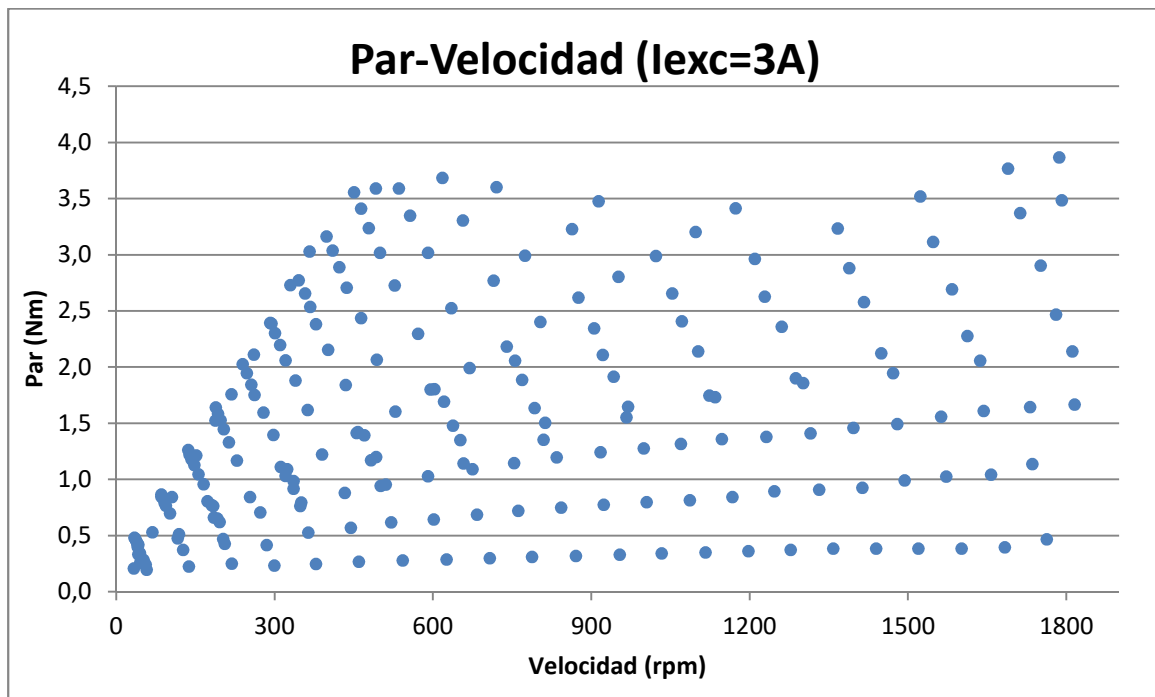


Imagen 21: Gráfica Par-Velocidad con diferentes puntos de funcionamiento de la máquina de corriente continua con una intensidad de excitación de 3A

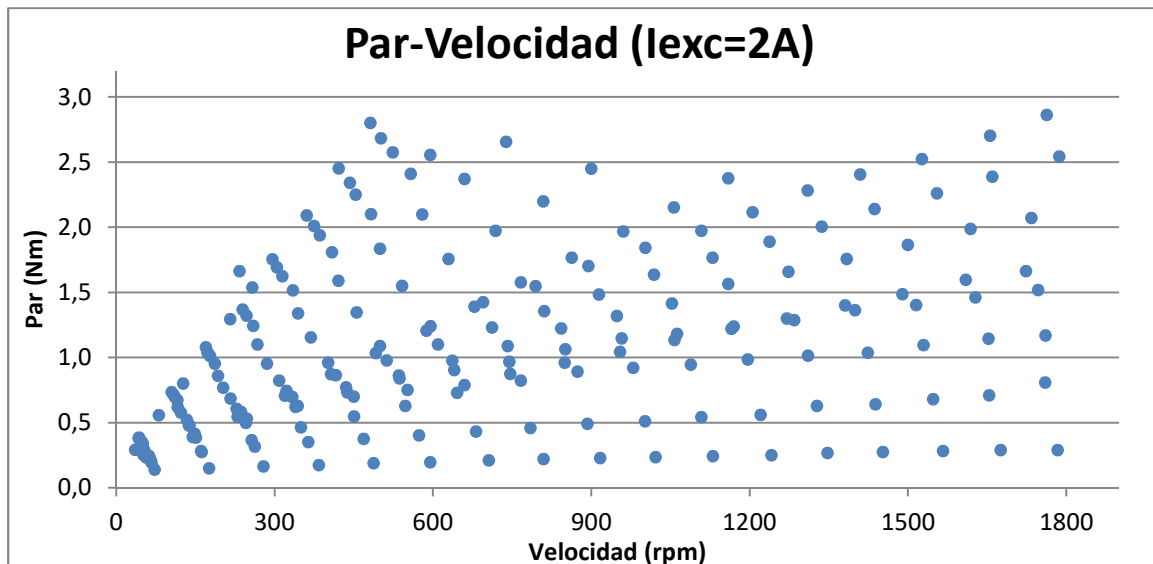


Imagen 22: Gráfica Par-Velocidad con diferentes puntos de funcionamiento de la máquina de corriente continua con una intensidad de excitación de 2A

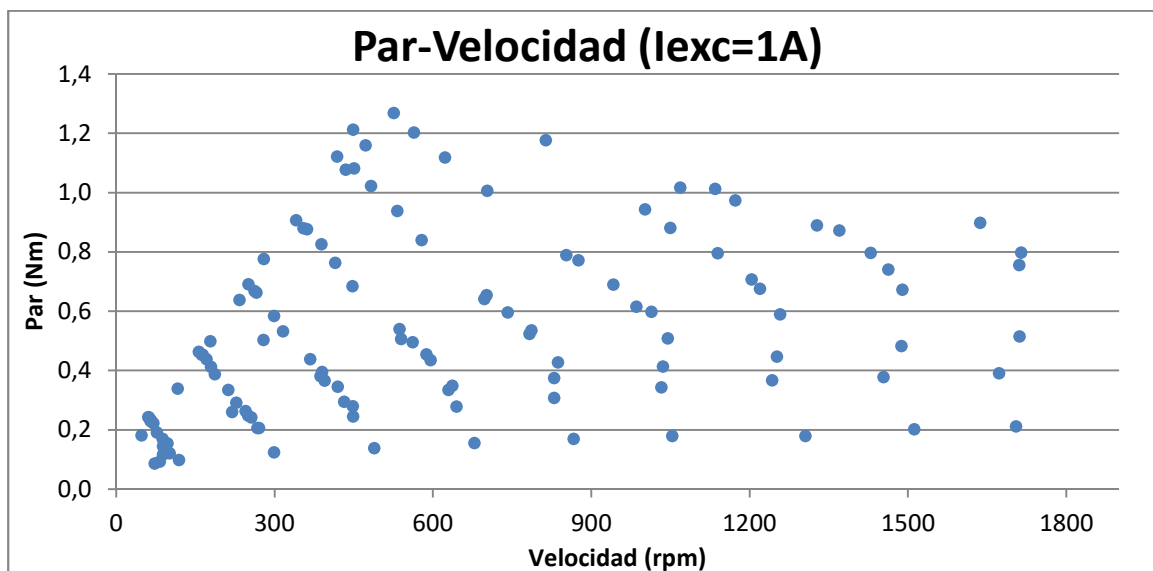


Imagen 23: Gráfica Par-Velocidad con diferentes puntos de funcionamiento de la máquina de corriente continua con una intensidad de excitación de 1A

Como ya hemos avanzado, la diferencia más significativa de la variación de intensidad de excitación, es la de la reducción del par máximo a medida que se disminuye dicha intensidad. Otra característica que se puede apreciar en estos gráficos es la imposibilidad de obtener puntos con pares grandes a velocidades muy pequeñas, esto una restricción que tiene la metodología empleada, ya que incluso con la máxima carga, es decir, en cortocircuito la máquina que actúa como generador, que representaría la serie de puntos con mayor pendiente, no es capaz de demandar grandes pares a bajas velocidades, esto es debido a que como las dos máquinas están acopladas mecánicamente, porque el motor sí que es capaz de suministrar mayores pares a esas velocidades, pero al estar los dos ejes unidos, la fuerza de rozamiento de la máquina generadora y todas las pérdidas asociadas a su funcionamiento, hacen que no se pueda alcanzar el máximo par a muy bajas velocidades. Este fenómeno se repetirá en el resto de ensayos también, ya que este problema es una restricción que tiene la metodología escogida para hacer los ensayos.

Aparte de las gráficas de par-velocidad, el otro objetivo era tratar de dibujar las curvas de isorendimiento sobre el mismo, con el objetivo de identificar las zonas de funcionamiento con mayor eficiencia. Para ello, con los rendimientos de cada uno de los puntos anteriores, y con la ayuda del software Surfer, el cual a partir de los datos de par, velocidad y rendimiento de cada punto, elabora una malla de puntos interpolando a partir de los datos mediante el método de Kriging, y a continuación representa dicha malla de puntos en un mapa de contornos, dibujando las líneas de isorendimiento que nos interesan. Cabe destacar que, como las unidades de los ejes vertical y horizontal (par y velocidad) son muy distintas en el orden de magnitud y con la intención de poder comparar después los resultados de las otras máquinas a ensayar, se ha optado por referenciar las variables de par y velocidad respecto de la nominal, 1500 rpm para la velocidad y 3.82 Nm para el par.

En este caso, como la excitación de los motores se alimentaba desde una fuente independiente y sobre todo para ver la influencia de la intensidad de excitación en el rendimiento de la máquina y poder comparar los rendimientos de una máquina de corriente continua de estator bobinado con una de estator con imanes permanentes, hemos calculado dos tipos de rendimientos, uno incluyendo la energía consumida para excitar el estator, que sería el rendimiento que correspondería a la máquina con estator bobinado, y otro rendimiento sin incluir la excitación, que sería el rendimiento si el estator fuera de imanes permanentes. Este procedimiento se repetirá para cada valor de los tres niveles de corriente de excitación del estator.

Comenzando con el rendimiento que incluye la excitación, es decir, el natural de la máquina con estator bobinado, que es la máquina que estamos ensayando, obtenemos los siguientes gráficos

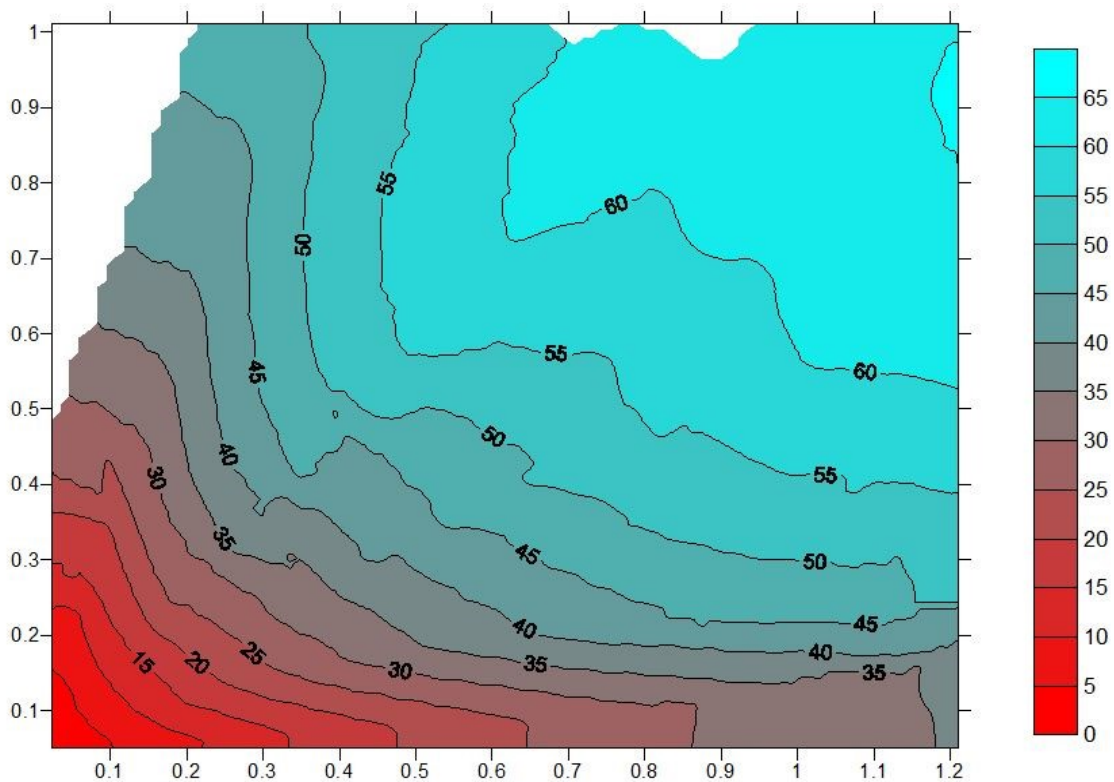


Imagen 24: Gráfico Par-Velocidad del modo motor de la máquina de cc con curvas de isorendimiento incluyendo la excitación para $I_{exc}=3A$

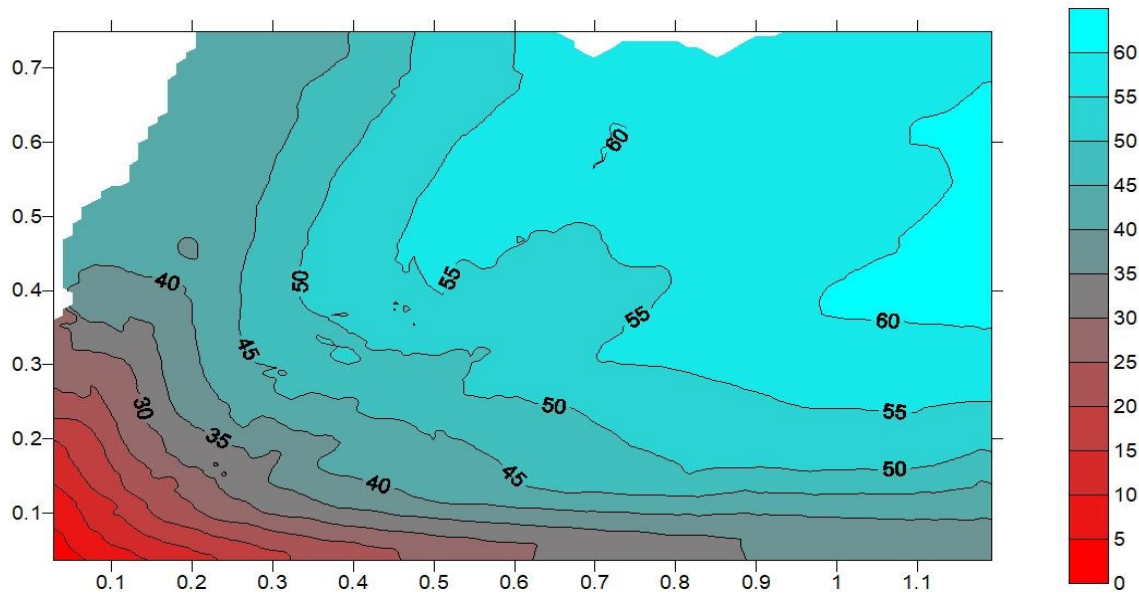


Imagen 25: Gráfico Par-Velocidad del modo motor de la máquina de cc con curvas de isorendimiento incluyendo la excitación para $l_{exc}=2A$

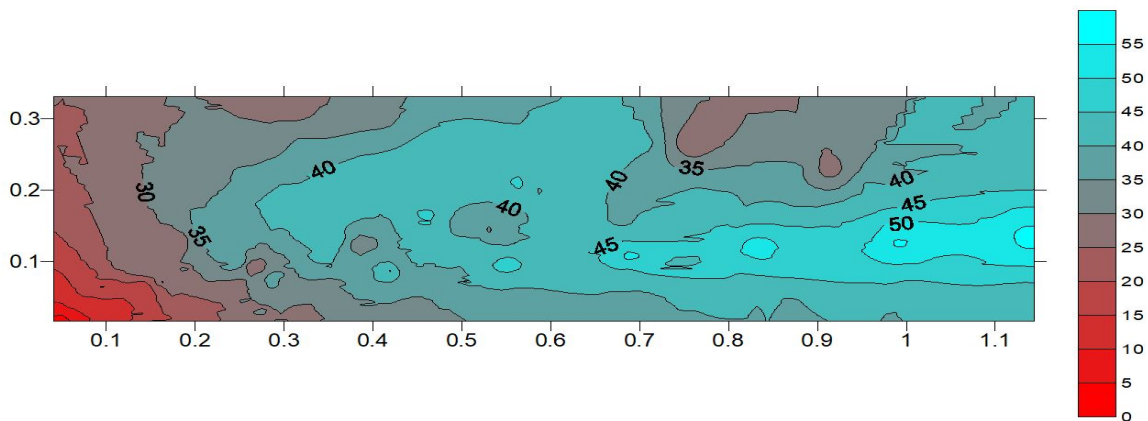


Imagen 26: Gráfico Par-Velocidad del modo motor de la máquina de cc con curvas de isorendimiento incluyendo la excitación para $l_{exc}=1A$

Como se puede apreciar claramente, los puntos de mayor rendimiento se alcanzan a velocidades un poco mayores a la nominal, y en cuanto a la excitación, cuanto mayor es, mejor rendimiento tiene en casi todos los puntos de funcionamiento, estos resultados tienen bastante sentido, ya que una máquina se diseña para que trabaje en un régimen de trabajo cercano a los valores nominales, por tanto cuando nos alejamos bastante de ellos, el rendimiento cae de forma apreciable. Por tanto, la gráfica más representativa del patrón de funcionamiento de esta máquina es la imagen 28, la cual está excitada a intensidad nominal (3 A), fijándonos en dicha imagen, vemos que la zona de mayor rendimiento se consigue a velocidades ligeramente mayores de la nominal y a pares también cercanos al nominal, y vemos como no se cierran las líneas de isorendimiento, lo que evidencia que la zona de mayor eficiencia está muy escorada, de tal manera que una parte de ella queda fuera de los límites de funcionamiento, y por tanto no se han podido obtener más puntos para su comprobación. Este hecho se puede deber a que los motores ensayados son de uso educativo y de muy poca potencia, por esta razón no están optimizados para trabajar en amplios rangos de par y velocidad, como demanda el vehículo eléctrico.

Por otra parte, vemos que la zona más crítica es cuando funciona con pares bajos a velocidades bajas, y las líneas de isorendimiento siguen una forma hiperbólica con asíntotas en los ejes, lo cual le confiere una amplia zona de funcionamiento donde los rendimientos cambian muy poco, lo cual es positivo para la aplicación en estudio de este proyecto.

Una vez analizados los rendimientos incluyendo la excitación, es hora de pasar a los que no tienen en cuenta la potencia suministrada para excitar el estator, es decir, el rendimiento que tendría una máquina con imanes permanentes en el estator, y los resultados son los siguientes:

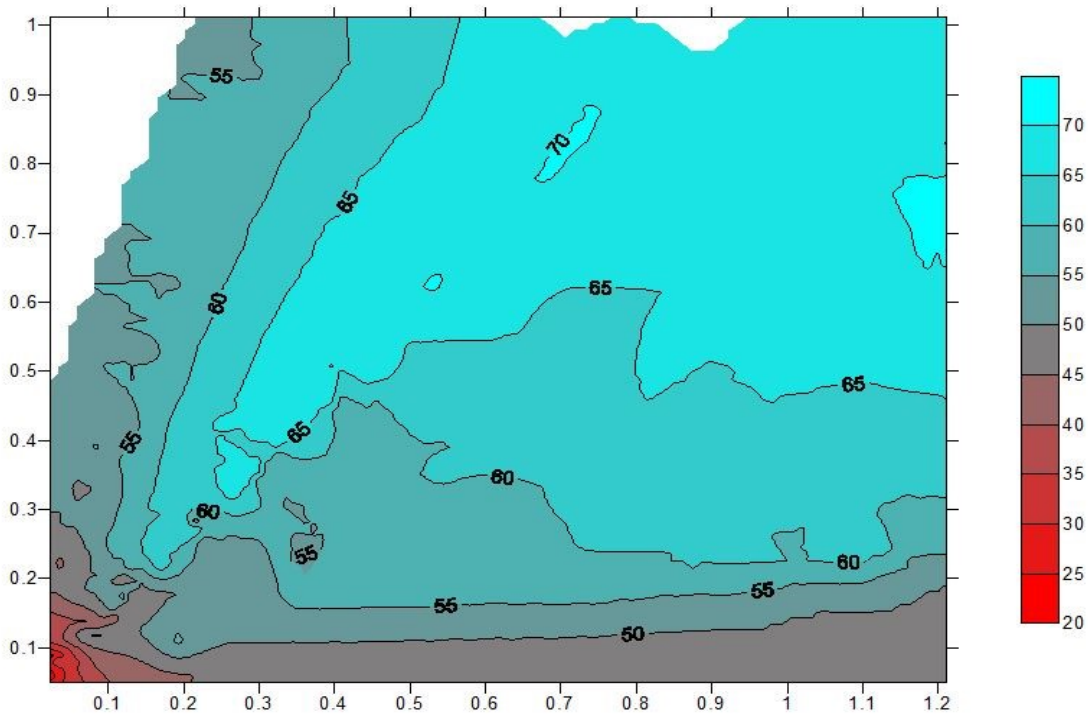


Imagen 27: Gráfico Par-Velocidad del modo motor de la máquina de cc con curvas de isorendimiento excluyendo la excitación para $l_{exc}=3A$

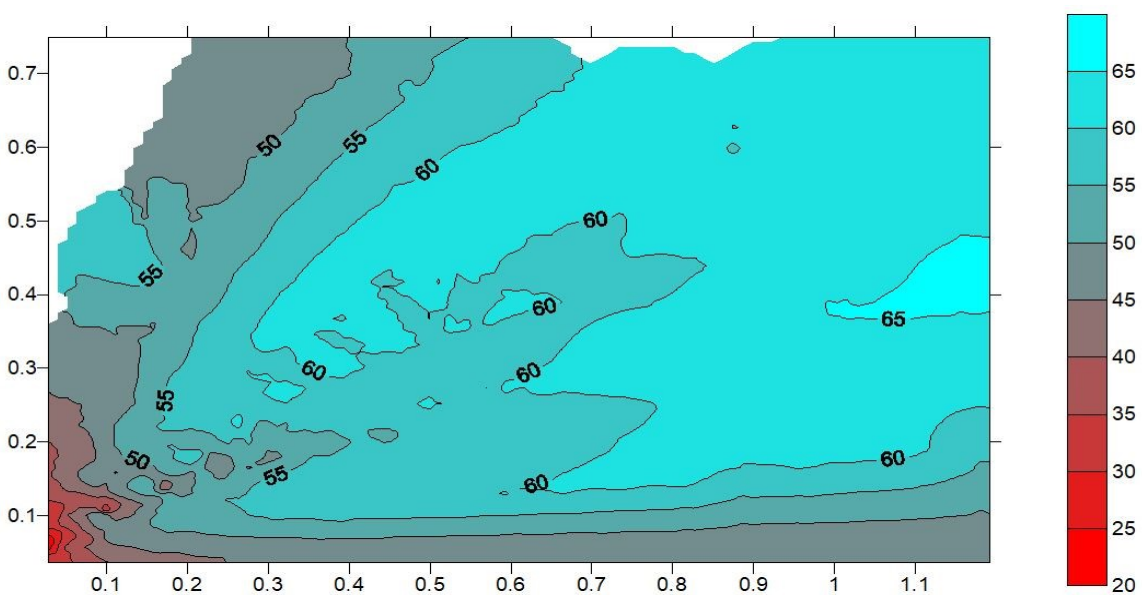


Imagen 28: Gráfico Par-Velocidad del modo motor de la máquina de cc con curvas de isorendimiento excluyendo la excitación para $l_{exc}=2A$

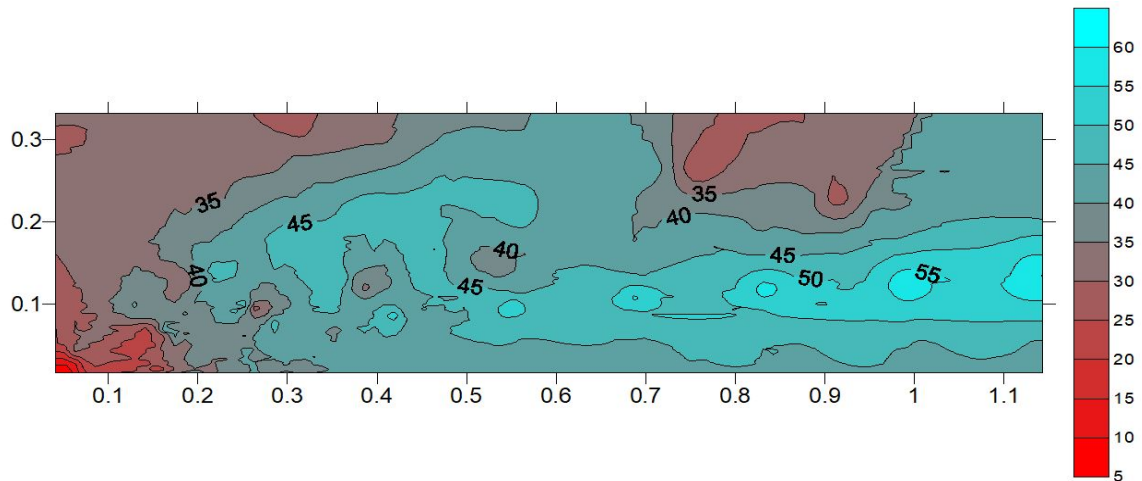


Imagen 29: Gráfico Par-Velocidad del modo motor de la máquina de cc con curvas de isorendimiento excluyendo la excitación para $l_{exc}=1A$

Observamos claramente, que al no tener en cuenta la energía de excitación, como era de esperar, el rendimiento para los mismos puntos sube considerablemente, y debido a que la potencia de excitación es un consumo constante para todos los puntos, lo que sucede al no tenerlo en cuenta ahora, es que se deforman y se obtienen unas gráficas bastante distintas, como se puede observar. En estas se puede identificar una zona más grande con rendimientos máximos, donde hay muy poca variación de rendimiento para casi todos los puntos de funcionamiento, lo cual es una clara ventaja para la aplicación que se propone en este trabajo, ya que tener un rango muy amplio de trabajo tanto en velocidades como en par, con una variación mínima de rendimiento, será clave para optar a la propulsión de un vehículo. Por tanto, el concepto teórico de mantener la excitación constante para simular el comportamiento de la máquina con imanes permanentes con una de estator bobinado, es correcto, pero los resultados obtenidos están altamente influenciados por el funcionamiento de la máquina con estator bobinado, por tanto, puede que las gráficas, sobretodo las de baja excitación, difieran bastante de las que tendrían unas máquinas con estator de imanes permanentes de la misma intensidad de campo.

Ahora nos disponemos a analizar el mismo motor, pero en el modo generador, ya que un requisito importante de impone un vehículo eléctrico, es el poder implementar el freno regenerativo, lo que significa, que la máquina tiene que poder cambiar del modo motor al modo generador para poder recuperar energía en las frenadas. Este análisis se hará usando los mismos puntos de funcionamiento medidos mostrados anteriormente, calcularemos el rendimiento de la máquina funcionando como generador, y una vez más, con la ayuda del software Surfer, se obtendrán los diferentes gráficos par-velocidad con las líneas de isorendimiento, para cada una de las intensidades de excitación. Y al igual que en el caso del motor, calcularemos dos tipos de rendimientos, uno incluyendo la energía de excitación en el balance, y otro sin contarla, con la intención de ver el comportamiento que tendría una máquina con imanes permanentes en el estator funcionando como generador.

Comenzaremos con la gráficas que muestran los rendimientos que incluyen la excitación, lo que es lo mismo, el rendimiento que equivale al comportamiento de una máquina de estator bobinado funcionando como generador:

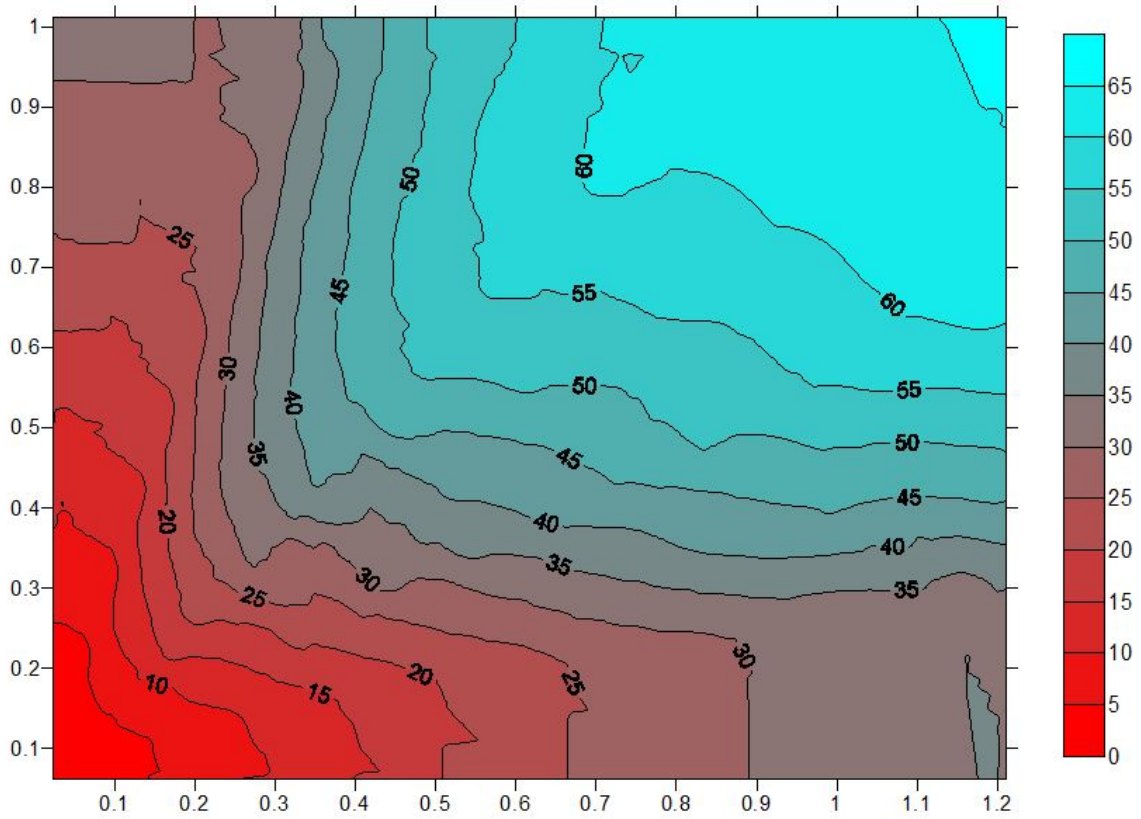


Imagen 30: Gráfico Par-Velocidad del modo generador de la máquina de cc con curvas de isorendimiento incluyendo la excitación para $I_{exc}=3A$

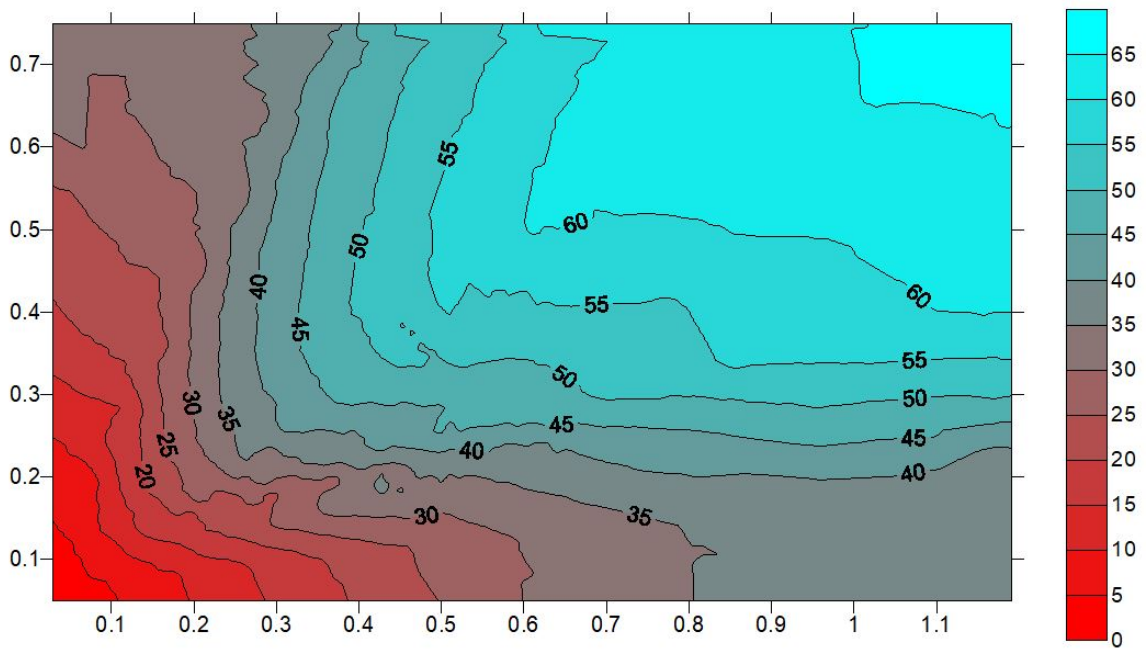


Imagen 31: Gráfico Par-Velocidad del modo generador de la máquina de cc con curvas de isorendimiento incluyendo la excitación para $I_{exc}=2A$

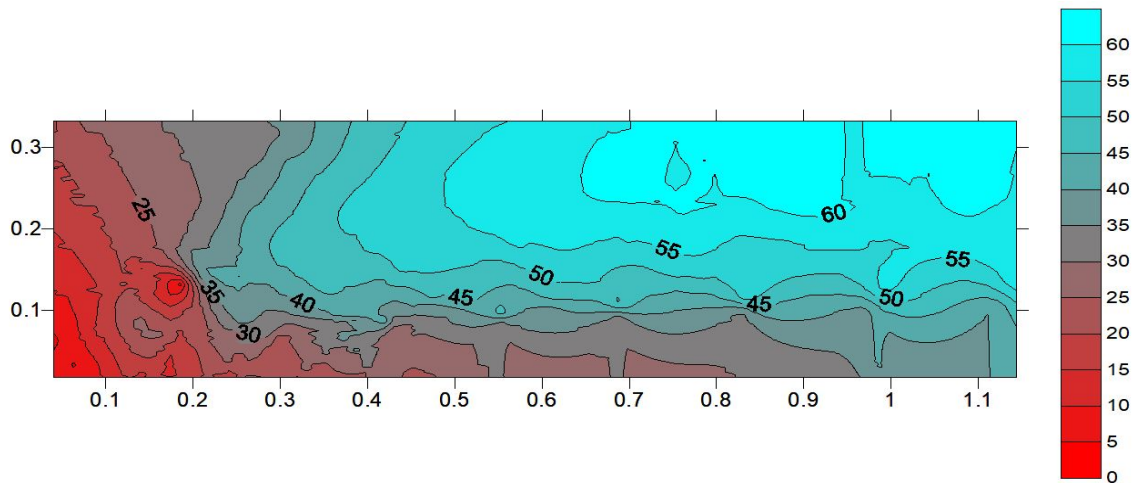


Imagen 32: Gráfico Par-Velocidad del modo generador de la máquina de cc con curvas de iso-rendimiento incluyendo la excitación para $I_{exc}=1A$

Se puede observar claramente que la forma de los gráficos del modo generador no se diferencian demasiado de los del modo motor, lo que es razonable, ya que es el mismo principio de funcionamiento en modo inverso. Lo que es más destacable es el valor de los rendimientos, los cuales son todos ligeramente inferiores a bajas velocidades, pero a medida que las velocidades son mayores, se igualan los rendimientos y para las grandes velocidades la máquina alcanza mejores rendimientos en el modo generador. Esto significa que tenemos diferentes gradientes de rendimiento para cada modalidad de funcionamiento. Este comportamiento es debido al aumento de las pérdidas en el cobre del funcionamiento como motor, que incrementan considerablemente con la velocidad, a diferencia del modo generador, donde esta relación es mucho menos acusada, esto es una consecuencia directa de la diferencia de intensidades entre entrada y salida.

A continuación pasaremos a las gráficas que muestran el rendimiento del modo generador, ahora excluyendo la excitación, es decir, el que representa una máquina de corriente continua con estator de imanes permanentes, trabajando como generador:

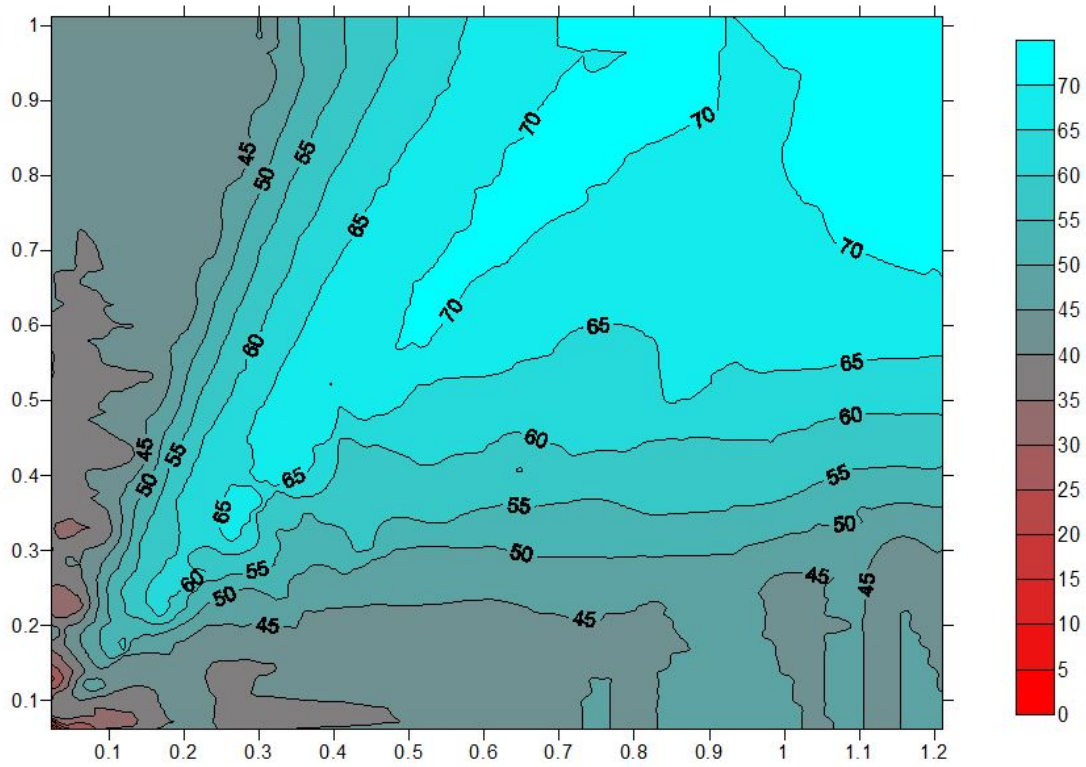


Imagen 33: Gráfico Par-Velocidad del modo generador de la máquina de cc con curvas de isorendimiento excluyendo la excitación para lexc=3A

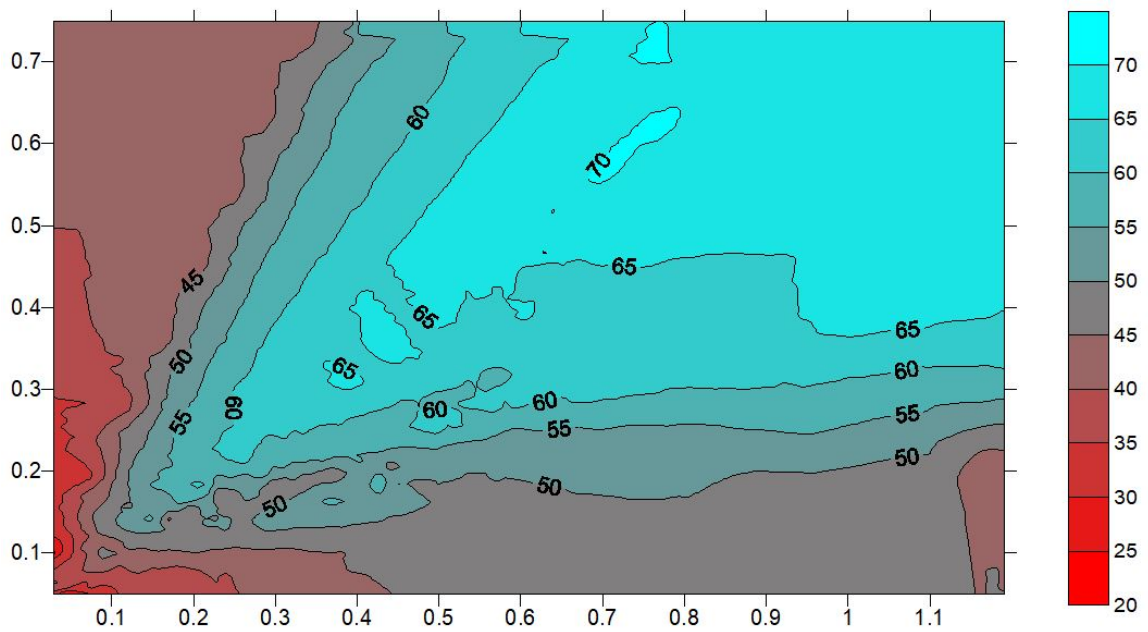


Imagen 34: Gráfico Par-Velocidad del modo generador de la máquina de cc con curvas de isorendimiento excluyendo la excitación para lexc=2A

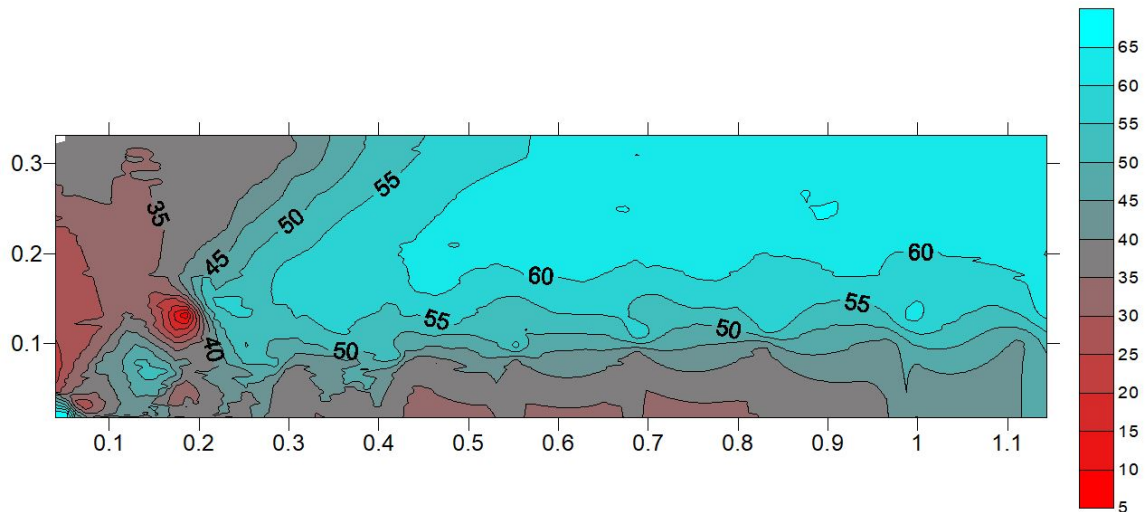


Imagen 35: Gráfico Par-Velocidad del modo generador de la máquina de cc con curvas de isoeficiencia excluyendo la excitación para $I_{exc}=1A$

Pues al igual que con el rendimiento incluyendo la excitación, las gráficas muestran resultados muy parecidos para la máquina de corriente continua con estator de imanes permanentes tanto trabajando en modo motor, como en modo generador. Simplemente destacar las diferencias de rendimiento, donde a velocidades bajas la máquina funciona mejor como motor, pero a velocidades altas el modo generador es más eficiente, siendo la principal causa, al igual que antes, la diferencia entre corrientes de entrada al motor y salida del generador, lo que provoca que las pérdidas en la máquina motora sea muy importantes a grandes velocidades, mientras que en el modo generador esta corriente no aumenta tanto con la velocidad y por tanto hay menos pérdidas en el cobre, que dotan a este modo de un rendimiento mayor a altas velocidades.

También cabe mencionar, que como se ha argumentado también en el caso de modo motor, la máquina de imanes permanentes tiene mayores rendimientos que la de estator bobinado también cuando trabaja como generador, y la justificación obvia es que la de imanes permanentes no utiliza ninguna energía para crear el campo del estator, mientras que la otra variante tiene que alimentar sus bobinas del estator para crear dicho campo.

Con lo que respecta al control de dicho motor, se realiza con un autotransformador para regular la tensión de alimentación del rotor, y otro para regular la excitación del estator, y luego para conseguir puntos con diferentes pares con la misma tensión de entrada, se conectan cargas resistivas de diferentes valores. Durante los ensayos se ha visto que su comportamiento es facil de controlar, ya que solo tiene dos variables de control como ya se ha dicho, y están directamente relacionadas con los parámetros más importantes, así la tensión del rotor está relacionada directamente con la velocidad de la máquina, y la intensidad de excitación con el par que entrega la misma. Se observa que este tipo de motor es muy robusto, ya que soporta un control con grandes variaciones de carga y de tensión, e incluso puede funcionar en un rango bastante amplio por encima de las condiciones nominales sin detenerse, lo que significa una gran fiabilidad, característica que siempre es importante para elementos de un vehículo.

Por otro lado, posiblemente el punto más débil del motor sería el de las escobillas de rozamiento, el sistema encargado de transmitir la corriente al rotor mientras está rodando. Estas escobillas son normalmente de grafito, y por tanto conductor de electricidad, estas rozan con el colector de delgas que está en rotación, de tal manera que le transmiten la electricidad al devanado del rotor, pero como es de esperar, dichas piezas de carbon, con el tiempo se desgastan con el rozamiento, por tanto cada cierto tiempo de funcionamiento hay que cambiarlas, pero para la aplicación del vehículo eléctrico, estos tiempos puede que no sean un problema, especialmente para los coches, ya que las horas de funcionamiento al año de estos vehículos son bastante reducidas respecto a las horas de funcionamiento de estos motores en aplicaciones industriales tradicionales, de tal manera que la frecuencia de mantenimiento de este motor sería comparable al de los motores actuales de combustión interna.

Otra característica importante de este motor, es que solo consume corriente continua, tanto para la alimentación del rotor como para la de la excitación. Este tipo de corriente, es también la que suministran las baterías, por tanto esto significa que todos los elementos principales que componen la tracción del vehículo consumen corriente continua, es decir, no harían falta ningún tipo de convertidor, cosa que si que se necesitan para los motores de alterna, esto significa que habrían menos pérdidas y por tanto mayor rendimiento en el conjunto.

Con esto damos por concluido el análisis del primer motor ensayado y ahora nos disponemos a pasar a los motores de corriente alterna, comenzando por el motor síncrono.

Motor síncrono

La segunda máquina ensayada es un motor de corriente alterna síncrono, de rotor bobinado, con 2 pares de polos, alimentación trifásica conectado en triángulo, donde su potencia nominal es de 600 W y su velocidad nominal de 1500 rpm, la tensión de alimentación es de 220 V y la corriente nominal de excitación de 0.6 A, siendo su par nominal 3.82 Nm, todo con un peso de 16.85 Kg, lo que significa una densidad energética de 35.61 W/kg, ligeramente menor que la máquina de continua.

Empleando la misma metodología explicada, ahora tenemos un motor donde el estator tiene que ser alimentado con corriente alterna y la excitación del rotor con corriente continua, para conseguir esta última lo haremos como en el ensayo anterior, con un rectificador alimentado desde la red, pero para la corriente alterna no es tan sencillo, porque la red lleva mucho ruido de armónicos difíciles de filtrar, lo que hace muy difícil la toma precisa de datos para el análisis, por tanto la opción elegida ha sido la de generar nuestra propia corriente trifásica, con otro par de motores, uno asíncrono como motor y otro síncrono como generador, de tal manera que conseguimos una corriente trifásica prácticamente sinusoidal con la que alimentaremos a la pareja de motores síncronos en ensayo, como muestran las imágenes 36 y 37.

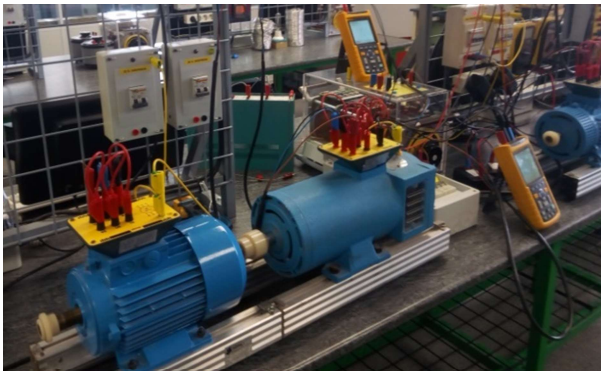


Imagen 36: Pareja de motores asíncrono-síncrono que genera la alimentación para el ensayo

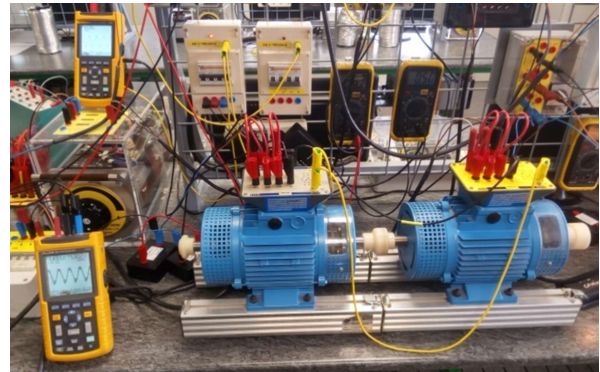


Imagen 37: Pareja de motores síncrono-síncrono objeto de ensayo

En este montaje ahora disponemos de tres motores síncronos, dos actuarán como generadores y el otro como motor, lo que significa que los tres necesitan corriente continua para la excitación, y siguiendo el mismo razonamiento que utilizamos para el ensayo anterior, las dos excitaciones de los motores en ensayo se alimentarán en serie, para garantizar que la hipótesis de que los dos motores funcionan en las mismas condiciones de funcionamiento es cierto y así poder calcular los rendimientos en base a esto.

Pero ahora esto no es todo, porque tenemos otro par de motores que tenemos que controlar, en el caso del asíncrono es más sencillo ya que solo necesita ser alimentado por corriente trifásica y para poder controlar la velocidad de la máquina, se instala un variador de frecuencia entre la red y la entrada del motor, que controlará la frecuencia de la corriente alterna que suministra al motor, y como se trata de un motor asíncrono de jaula de ardilla, no necesita ningún tipo de excitación. En cambio la máquina a la que esta acoplada mecánicamente, un motor asíncrono, sí que necesita una corriente de excitación en el rotor para que se induzca un tensión en los bornes del estator. Por tanto, y con la intención de eliminar una variable de control que sería la excitación del generador, se ha optado por poner en serie las tres excitaciones de los tres motores síncronos, de tal manera que con una misma fuente se controlan la excitación de los tres motores.

Una vez visto el montaje y alimentación de todos los motores, vamos a pasar a explicar el funcionamiento. Comenzando con la generación, exactamente por el motor asíncrono, alimentado por el variador de frecuencia, donde debido a que la frecuencia está relacionada con la velocidad del campo giratorio producido por el estator, el variador controla la velocidad de giro de la máquina, que hace girar el eje de la máquina síncrona a la cual está unida mecánicamente, donde cuando se le aporta corriente al devanado de excitación del rotor, se induce tensión en los bornes del estator, de aquí es de donde se alimentará el motor del par de máquinas en ensayo, consiguiendo una corriente alterna con una forma de onda bastante limpia para la recogida de datos. Una de las características de los motores síncronos es que la velocidad del campo magnético giratorio del estator siempre es la de sincronismo, y esta solo depende de la frecuencia y de los pares de polos de la máquina, por tanto a efectos prácticos, para regular la velocidad solo la podemos controlar con el variador de frecuencia que alimenta a la máquina asíncrona, ya que la velocidad que saque esta en el eje, será también la que girarán el par de máquinas en ensayo, por la sencilla razón de que una máquina síncrona su velocidad solo depende de la frecuencia a la que la alimentes, independientemente de la potencia que esté consumiendo o generando, el generador que esta acoplado a la máquina asíncrona producirá una corriente alterna con una frecuencia acorde con la velocidad del eje, y dicha corriente de salida es la que alimenta al motor asíncrono del otro par de máquinas en ensayo, que al ser también síncronas, el motor alimentado con dicha frecuencia tendrá una velocidad idéntica que la del par de máquina asíncrona/síncrona de generación.

En cuanto a las variables de control del montaje, solo son dos, como ya hemos mencionado, la frecuencia de alimentación, que se controla con el variador de frecuencia, y como se ha explicado, está directamente relacionada con la velocidad de giro de las máquinas en ensayo, aquí el límite será la velocidad máxima de giro de las máquinas, que es de 1650 rpm (un 110% de la nominal), y por tanto la correspondiente frecuencia máxima que se puede alcanzar es de 55 Hz. La otra variable de control es la intensidad de excitación, donde al igual que pasa en la máquina de continua, esta está relacionada directamente con el par máximo que puede entregar la máquina, el límite de esta variable sería la corriente nominal (0.6 A), pero debido a que hemos alimentado los devanados de excitación de las tres máquinas en serie, y dado que la resistencia de cada uno está alrededor de los 350 ohmios, ni la fuente de más alta tensión disponible (400 V) nos permite alcanzar los 0.6 A de la corriente nominal, se queda en 0.5 A, por tanto hemos optado por que este sea el máximo de esta variable.

Al igual que en el anterior ensayo, haremos varios ensayos con intensidades de excitación diferentes, dejándolos constantes durante todo el ensayo, para así recrear el funcionamiento que tendría la máquina si en vez de ser de rotor bobinado fuese de imanes permanentes, este modo de ensayo se justifica sobradamente con los resultados de la tabla 1 en la sección de estado actual, donde se observa que el motor claramente predominante en los sistemas de propulsión que llevan los vehículos eléctricos hoy en día, es el motor síncrono con imanes permanentes, por tanto con esta práctica podremos identificar el patrón de comportamiento de los mismos sin disponer de uno de ellos, y variando la intensidad de excitación observaremos la influencia que tendría la intensidad magnética de diferentes imanes sobre el rendimiento de la máquina. Para determinar los saltos de dicha intensidad, realizamos un ensayo de saturación para cada máquina, y los resultados son los que se muestran en las imágenes 38 y 39

Teniendo en cuenta que el máximo se ve restringido a 0.5 A y que la zona más idónea para trabajar es la zona lineal, ya que se mantiene el flujo constante, por tanto se ha optado por hacer dos ensayos con intensidades de excitación constantes, uno a 0.5 A y otro a 0.25 A.

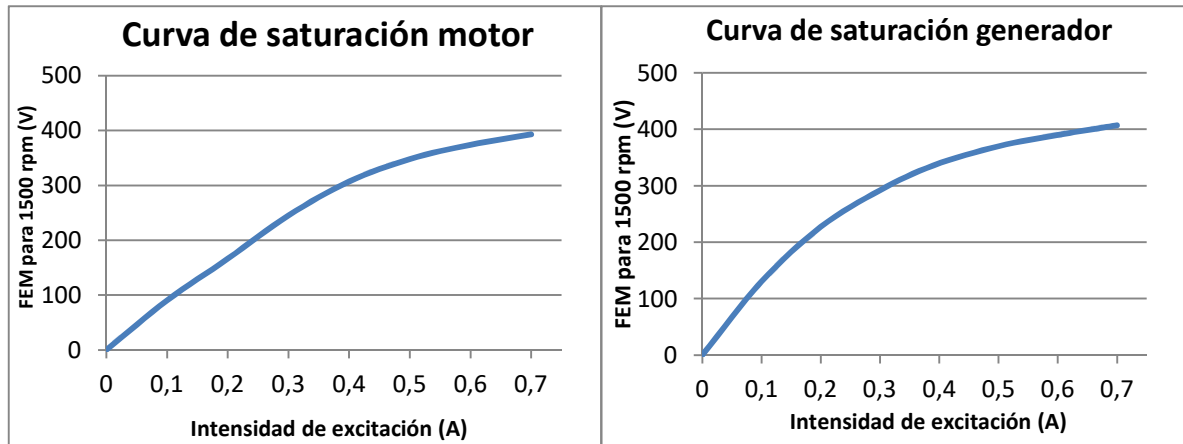


Imagen 38: Curva de saturación del modo motor de la máquina síncrona

Imagen 39: Curva de saturación del modo generador de la máquina síncrona

Una vez fijados los límites y la metodología, se procede al ensayo, que consistirá en fijar una intensidad de excitación e ir variando la frecuencia de alimentación, y para cada frecuencia, o lo que es lo mismo, para cada velocidad de giro, se conectan diversas cargas resistivas a la salida del generador en análisis y se varía gradualmente la carga, haciendo así que la potencia generada sea mayor y por tanto el par producido por la máquina motora. Pero esto tiene un problema, porque como ya se ha comentado, la máquina síncrona siempre gira a velocidad de sincronismo, por tanto cuando cambiamos la potencia demandada, el motor sigue girando a la misma velocidad, y lo único que varía es el par generado, de manera que cuando le pedimos al motor que nos dé una potencia por encima de la que puede dar, se para. Esto junto con la condición de que este tipo de motor, como su velocidad depende de la frecuencia, para arrancar son necesarias frecuencias bajas para que el rotor coja la velocidad del campo magnético giratorio producido por el estator. Por estos dos condicionantes, se pone una protección, un interruptor para evitar alimentar con frecuencias altas al motor con el rotor parado, de tal manera que cuando vamos conectando cargas, y aumentando la potencia entregada y llega el punto que se para el motor, accionamos el interruptor y cortamos la alimentación.

Procediendo de la forma descrita para cada una de las dos intensidades de excitación y teniendo en cuenta la hipótesis de que las pérdidas que no se pueden obtener, se reparten a partes iguales entre las dos máquinas, y luego se calculan mediante el balance de potencias, obteniéndose los siguientes resultados expresados en gráficas par-velocidad:

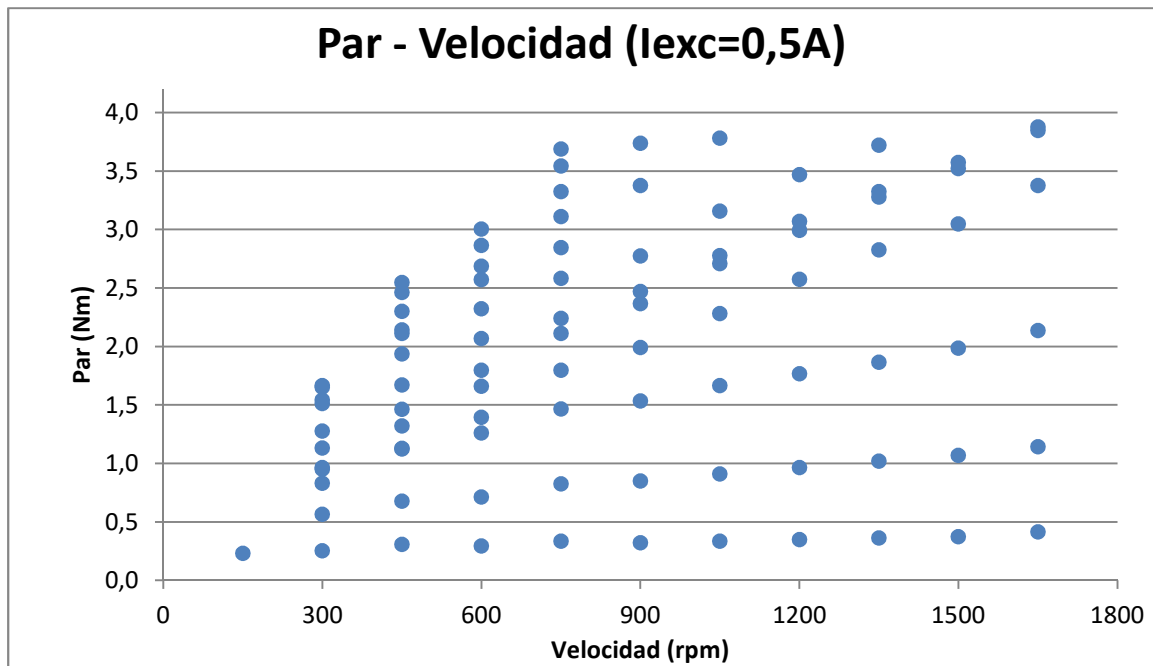


Imagen 40: Gráfica Par-Velocidad con diferentes puntos de funcionamiento de la máquina síncrona con una intensidad de excitación de 0.5A

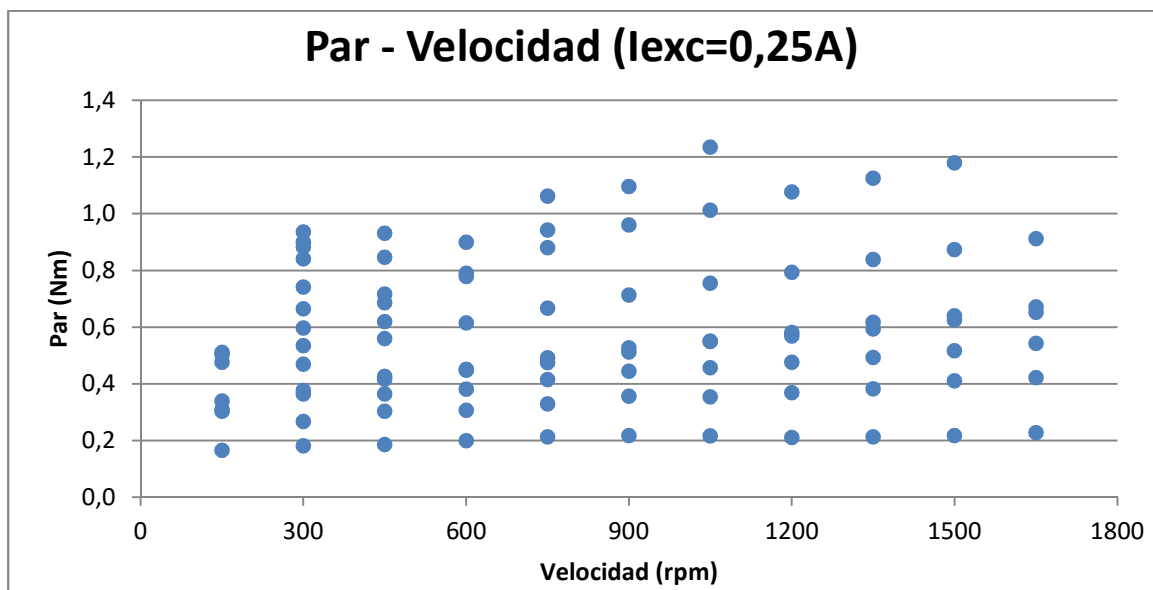


Imagen 41: Gráfica Par-Velocidad con diferentes puntos de funcionamiento de la máquina síncrona con una intensidad de excitación de 0.25A

Como se puede observar en los gráficos, y al igual que pasaba en el motor de corriente continua, la principal diferencia entre las dos intensidades de excitación es el par máximo entregado, de modo que cuanto menor es la intensidad, menor es el par máximo entregado de la máquina, que extrapolado al comportamiento de los motores síncronos con estator de imanes permanentes, significa que cuanto más potente sea el imán permanente, en cuanto a intensidad de campo, mayor será el par máximo entregado. Otro factor destacable sería el que ya ha sido mencionado en el ensayo anterior, relativo a la imposibilidad de obtener puntos de bajas velocidades y grandes pares, debido a la metodología empleada, como se argumentaba en dicha sección.

En estos gráficos se refleja muy claramente el sistema de ensayo utilizado, y cada variación de frecuencia que se ha realizado, que hace que la principal característica del motor síncrono de mantener siempre la misma velocidad se aprecie claramente en los gráficos, simplemente al pedirle más potencia, este motor aumenta el par entregado como se puede ver, dejando intacta la velocidad de giro.

Al igual que para el ensayo anterior, utilizaremos el software Surfer para realizar los mapas de contorno de par-velocidad con las líneas de isorendimiento, referenciando tanto el par como la velocidad a sus valores nominales (3.82 Nm y 1500 rpm, respectivamente).

Aquí también se hará distinción entre dos tipos de rendimiento, contando la potencia de excitación como parte de la potencia aportada, y sin contarla, de esta forma compararemos los rendimientos de la máquina con rotor bobinado, con una de la misma potencia, pero con imanes permanentes en el rotor, con el objetivo de ver la influencia en el patrón de comportamiento de una y otra tecnología, así como ver las diferencias entre diferentes intensidades de excitación.

Así pues, comenzando con los rendimientos correspondientes a la máquina con rotor bobinado, es decir, los que incluyen la potencia de la excitación como potencia absorbida, obtenemos los siguientes resultados:

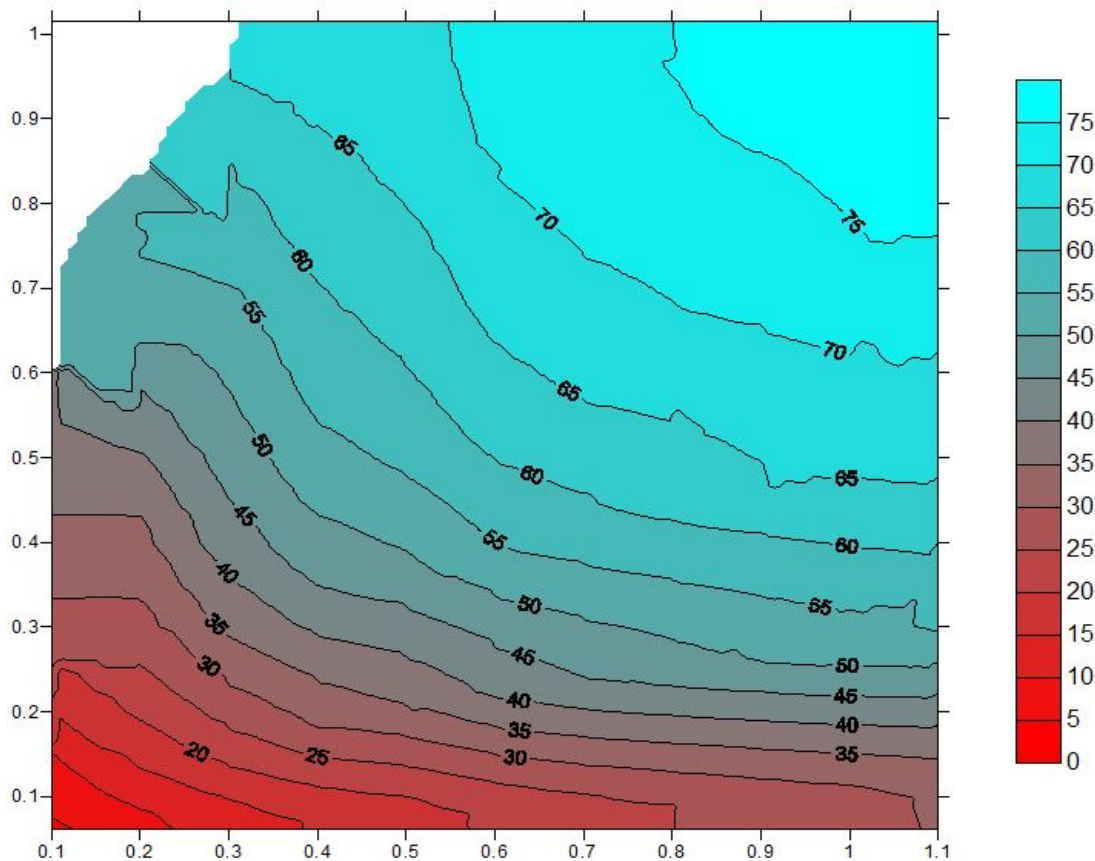


Imagen 42: Gráfico Par-Velocidad del modo motor de la máquina síncrona con curvas de isorendimiento incluyendo la excitación para $I_{exc}=0.5A$

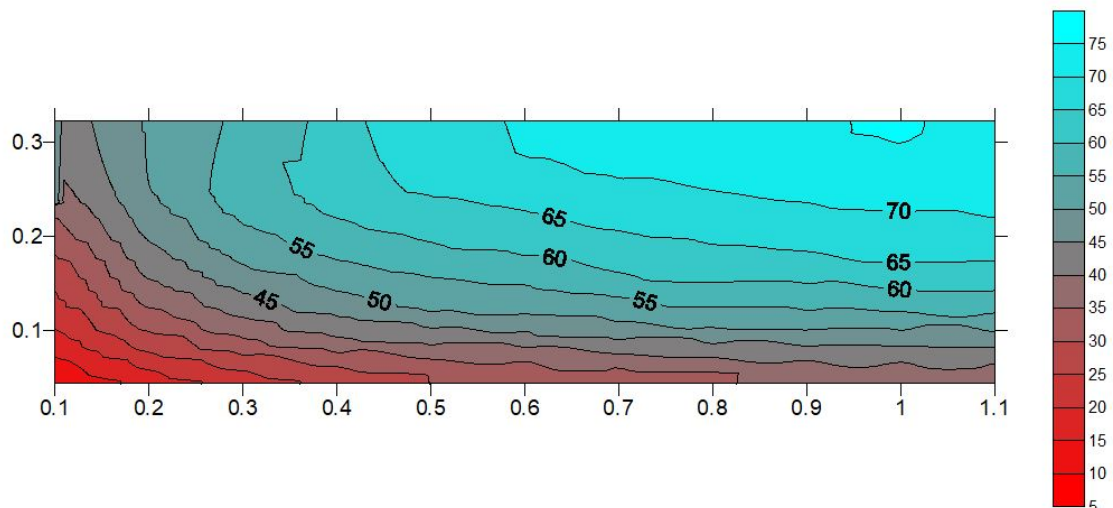


Imagen 43: Gráfico Par-Velocidad del modo motor de máquina síncrona con curvas de isorendimiento incluyendo la excitación para $I_{exc}=0.25A$

Estos gráficos muestran que la zona de trabajo de mayor rendimiento de este motor, está a velocidades cercanas a la nominal o ligeramente superiores, y con pares bastante grandes, y como se puede observar las líneas no se cierran, lo que hace suponer que el punto de máximo rendimiento está fuera de la zona de trabajo de este motor, esto no es habitual en este tipo de motores, ya que se diseñan para que la máquina trabaje en el punto de máximo rendimiento el mayor tiempo posible, por tanto esto se podría deber a que son motores para uso educativo y no están optimizados para ningún régimen de trabajo.

En cuanto a la forma de las líneas de isorendimiento, son bastante regulares y bastante equiespaciadas, lo que denota un comportamiento con suaves cambios de rendimientos, y vemos también que, exceptuando a velocidades bajas, las líneas son bastante horizontales, lo que significa, que el rendimiento no depende casi de la velocidad de gira, sino que depende mayormente del par generado, y estos aspectos denotan una zona de trabajo bastante amplia con rendimientos elevados, y una baja influencia de la velocidad en el rendimiento, lo que supone una aproximación bastante buena a los requisitos del vehículo eléctrico.

Otro aspecto a destacar, es la influencia de la intensidad de excitación, como vemos, aparte de bajar el par máximo, hace que los puntos donde para una excitación alta tuvieran rendimientos inaceptables, bajando la excitación, se consigue que los rendimientos sean mucho mejores. También se puede ver que a bajas intensidades de excitación, la zona de mayores rendimientos se ensancha hacia velocidades más bajas y las líneas de isorendimiento se hacen aún más horizontales, que como hemos explicado, este rasgo es bastante beneficioso para el vehículo eléctrico. Por todas estas razones, esta puede ser una variable de control interesante para conseguir la máxima eficiencia para patrones de funcionamiento muy cambiantes como es el caso que estamos analizando.

Ahora pasamos al otro tipo de rendimiento analizado, donde no se tiene en cuenta la potencia de excitación para recrear el comportamiento que tendría una máquina síncrona con imanes permanentes en el rotor y las siguientes imágenes muestran los resultados.

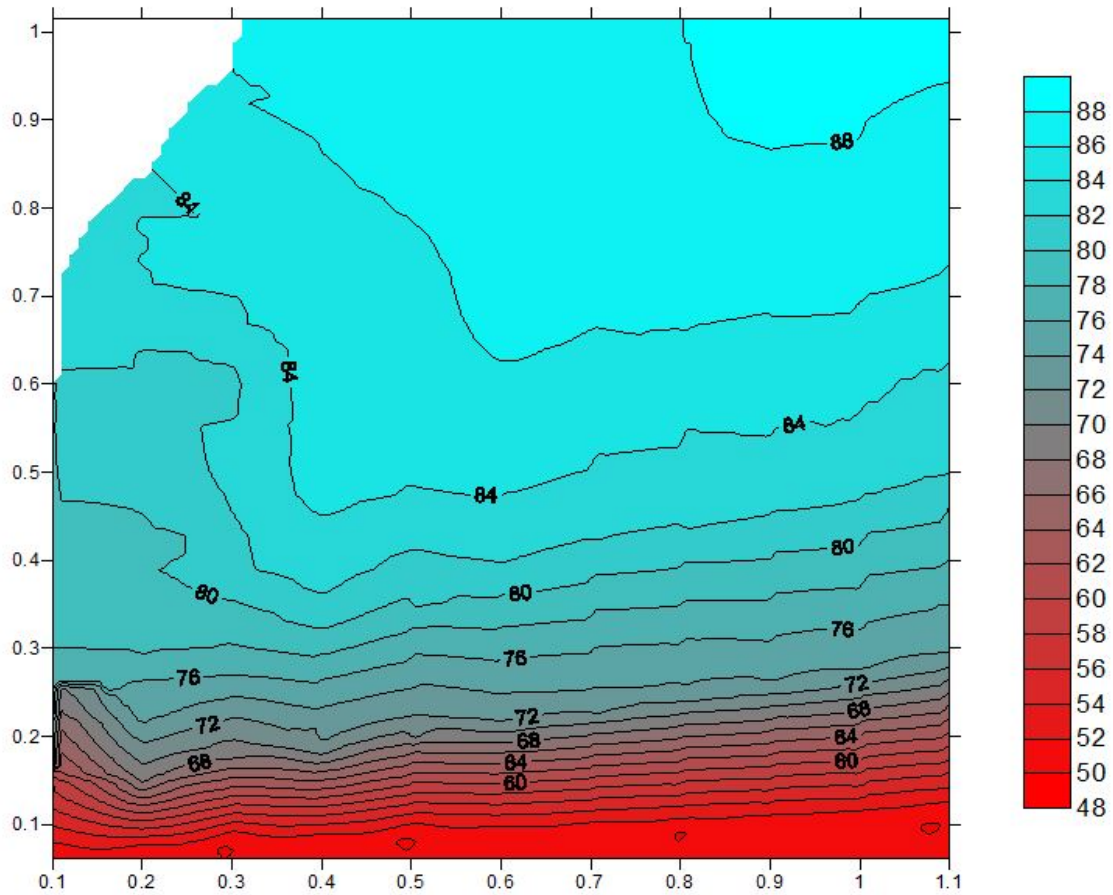


Imagen 44: Gráfico Par-Velocidad del modo motor de la máquina síncrona con curvas de isorendimiento excluyendo la excitación para $I_{exc}=0.5A$

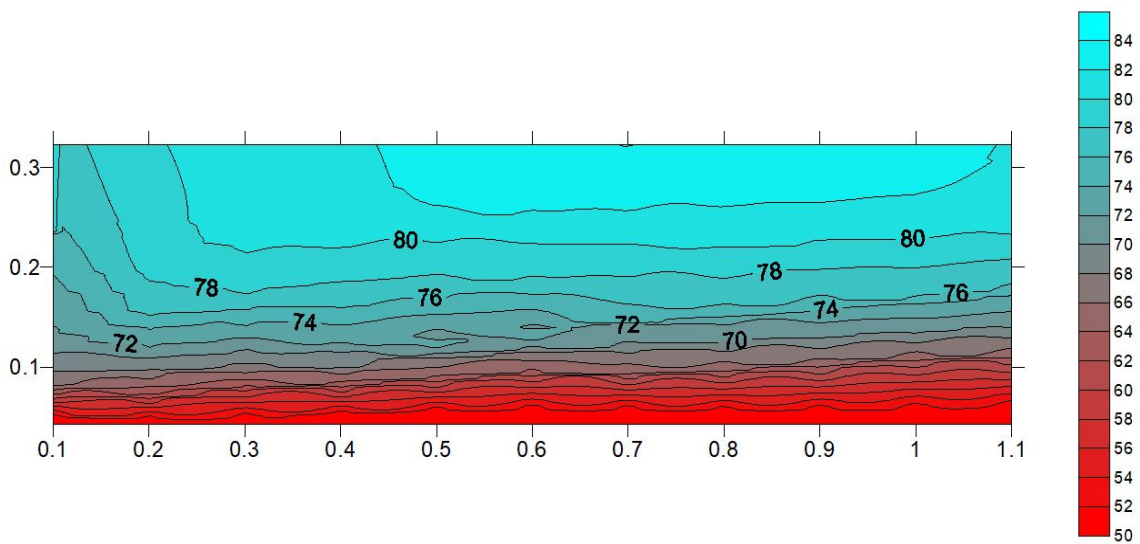


Imagen 45: Gráfico Par-Velocidad del modo motor de la máquina síncrona con curvas de isorendimiento excluyendo la excitación para $I_{exc}=0.25A$

Como se esperaba, al excluir la potencia consumida en la excitación del balance, los rendimientos ahora son notablemente más altos, y la forma tan distinta de la gráfica respecto a los anteriores rendimientos, es debido a que la potencia de excitación es un consumo constante e independiente del punto de funcionamiento de la máquina, y por tanto a bajas potencias, es decir a bajos pares y bajas velocidades, donde la potencia de excitación tiene un gran peso respecto al total de potencia consumida, es donde la gráfica varía más su forma.

Como se aprecia en las figuras, el comportamiento simulado de la máquina con imanes permanentes en el rotor, tiene unas zonas de rendimientos máximos mucho más amplias que las de rotor bobinado, y vemos que las líneas de isorendimiento son totalmente planas, y se ve claramente que la zona más conflictiva es la de pares bajos, ya que a medida que el par generado es menor, las líneas de isorendimiento están cada vez más juntas, lo que indica una caída bastante acusada del rendimiento.

En cuanto a la intensidad de excitación, que en este caso se referiría a la intensidad magnética de los imanes del rotor, se observa el mismo fenómeno descrito en las anteriores gráficas, donde con una excitación baja se aumenta el rendimiento considerablemente las zonas de bajo par, desplazando aún más la caída de rendimiento hacia pares más bajos, con la consecuencia de perder par máximo.

Por tanto esta variante, con imanes permanentes, tiene mucho potencial para el caso en estudio, ya que como podemos observar dispone de una gran zona de operación con rendimientos bastante constantes y muy altos, y otra característica importante, es la independencia casi total del rendimiento con la velocidad, lo que le confiere grandes posibilidades para ser la máquina que proporcione la tracción en un vehículo eléctrico, como ya han hecho muchos fabricantes automovilísticos con sus primeros modelos eléctricos, como se comentó en el apartado de estado actual. Pero por el contrario, los imanes permanentes no permiten la regulación en la intensidad de excitación, con lo que a bajos pares, el rendimiento cae considerablemente, donde no podemos mejorarlo, por tanto, se tendrá que llegar a una solución de compromiso, entre el mínimo rendimiento que se quiere tener a bajos pares y el par máximo producido, para determinar la intensidad de campo de los imanes permanentes.

Ahora es el turno de analizar la máquina síncrona funcionando como generador, por tanto, al igual que se hizo en máquina anterior, se realizarán los gráficos con las curvas de isorendimiento para los dos niveles de intensidad ensayados, y al mismo tiempo se calcularán dos tipos de rendimiento, uno incluyendo la excitación y otro sin contarla, para ver las diferencias de comportamiento que tiene una máquina síncrona con rotor bobinado de una con rotor con imanes permanentes funcionando como generador.

Comenzaremos con el rendimiento que corresponde a la máquina ensayada, es decir, a la que incluye la potencia consumida en la excitación en el balance de rendimientos, a continuación se muestran las gráficas con los resultados:

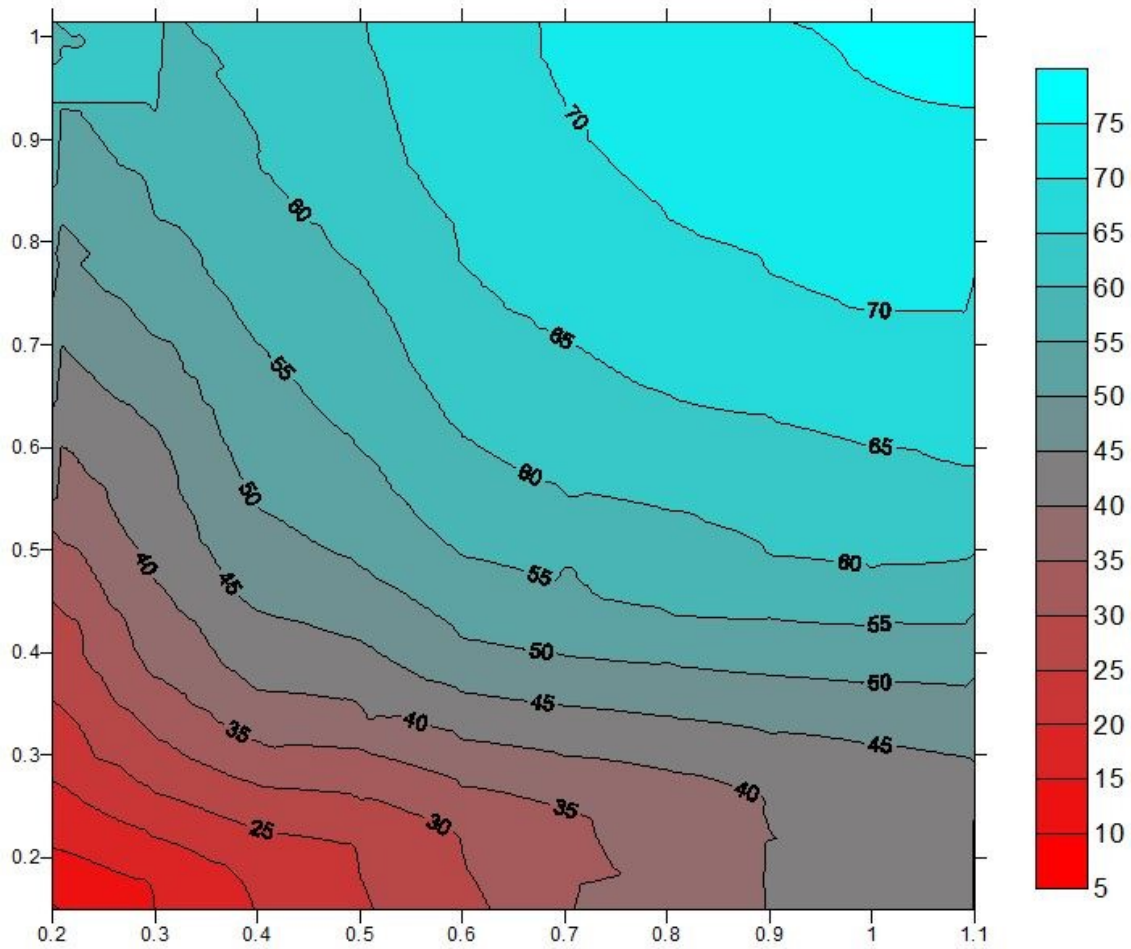


Imagen 46: Gráfico Par-Velocidad del modo generador de la máquina síncrona con curvas de isorendimiento incluyendo la excitación para $I_{exc}=0.5A$

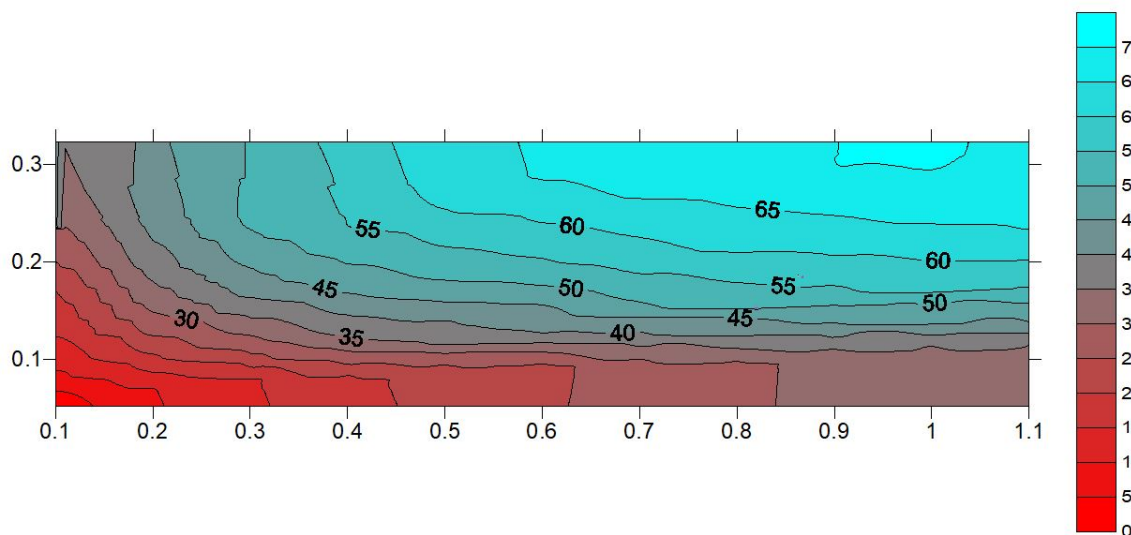


Imagen 47: Gráfico Par-Velocidad del modo generador de la máquina síncrona con curvas de isorendimiento incluyendo la excitación para $I_{exc}=0.25A$

Se aprecia que la forma de las líneas de isorendimiento son muy parecidas a las del funcionamiento como motor, lo cual es bastante lógico, tratándose de la misma máquina solamente invirtiendo el modo de funcionamiento. Por otro lado cabe destacar, que los valores de los rendimientos, son ligeramente superiores funcionando como motor que como generador en todo el rango de velocidades, la uniformidad de esta diferencia eficiencia se debe a que las pérdidas en el cobre, tanto en modo generador, como en modo motor, son muy parecidas para cada velocidad de la máquina. Por tanto la principal razón de esta diferencia de rendimientos es la potencia a la cual está siendo ensayada cada modo de funcionamiento, ya que al realizar el ensayo con dos máquinas idénticas acopladas mecánicamente, la que trabajaba como motor lo hacía a una potencia más alta que la que trabajaba como generador, ya que la potencia de esta última es mucho menor debido a la cantidad de pérdidas que se producen entre la alimentación de la máquina motora y la potencia generado por esta. Por tanto se puede concluir, que como no están ensayadas a la misma potencia, no se pueden comparar los rendimientos obtenidos de ambos modos de funcionamiento.

A continuación seguiremos con los rendimientos característicos de una máquina síncrona de rotor con imanes permanentes trabajando como generador, o lo que es lo mismo, presentamos los gráficos con las curvas de isorendimiento que no incluyen la excitación en su cálculo:

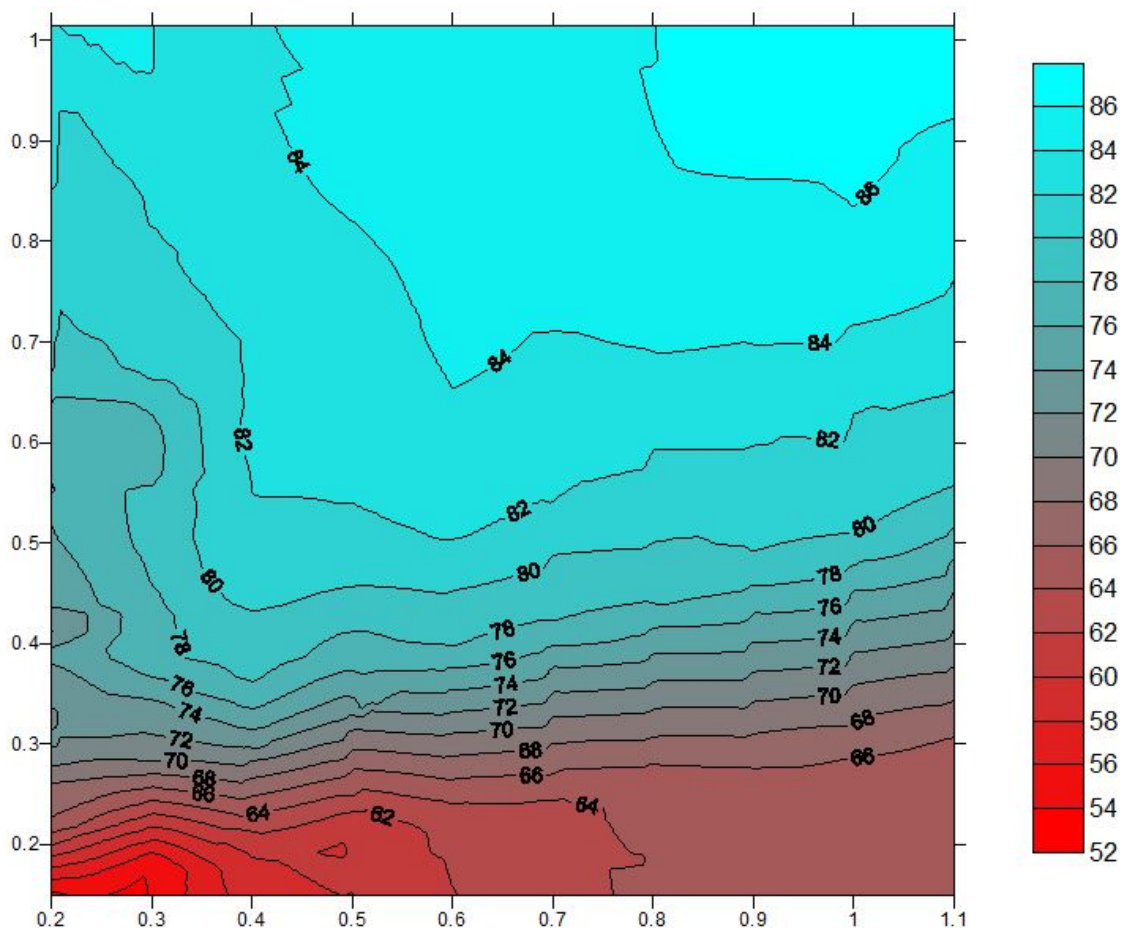


Imagen 48: Gráfico Par-Velocidad del modo generador de la máquina síncrona con curvas de isorendimiento excluyendo la excitación para $I_{exc}=0.5A$

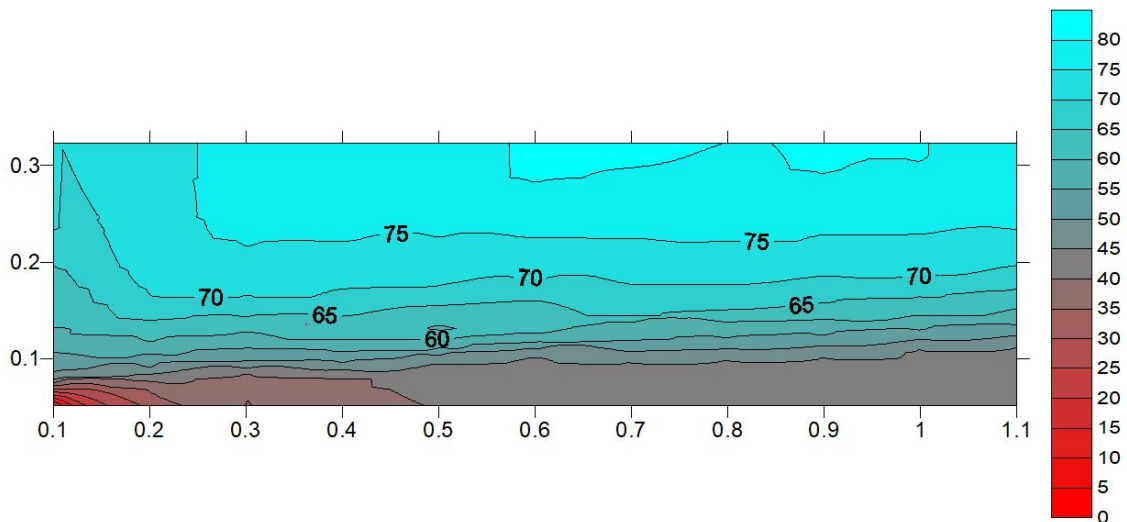


Imagen 49: Gráfico Par-Velocidad del modo generador de la máquina síncrona con curvas de isorendimiento excluyendo la excitación para $I_{exc}=0.25A$

De estos gráficos se pueden sacar las mismas conclusiones que de los anteriores, donde se aprecia que las líneas de isorendimiento siguen la tendencia horizontal, característica singular también del funcionamiento como motor, con la importante apreciación de que el modo generador es menos eficiente, que se debe principalmente a la diferencia de potencias a las que han sido ensayadas de las dos modos, como se ha argumentado anteriormente, con lo que se concluye que estos datos no son comparables entre los dos modos de funcionamiento.

Destacar, que la máquina síncrona de rotor de imanes permanentes es más eficiente que la de rotor bobinado, tanto en modo motor como en modo generador, y es por la simple razón de que los imanes permanentes, a diferencia de las bobinas, no consumen potencia para crear un campo, por lo tanto el balance de rendimientos siempre saldrá a favor del rotor con imanes permanentes.

Por lo que respecta al control de este motor, es bastante sofisticado debido a su principio de funcionamiento, ya que el estator crea un campo giratorio, donde su velocidad depende de la frecuencia, y el rotor crea un campo magnético fijo, ya sea con imanes permanentes o con un devanado de excitación, entonces para que esta máquina funcione, tienen que ir el rotor a la velocidad del campo giratorio creado por el estator, lo que implica que para arrancarlo, la frecuencia de entrada tiene que ser muy pequeña, ya que si es más grande el rotor no puede alcanzar la velocidad del campo.

Pero sin duda el principal problema de control de esta máquina es el de evitar que la máquina se pare cuando el par requerido es muy grande, esto sucede porque el motor síncrono tiene la cualidad de siempre ir a la misma velocidad y cuando se le pide más potencia sigue con la misma velocidad, solo que aumenta el par entregado, de tal forma que llega un punto que el campo fijo del rotor no tiene suficiente fuerza para seguir al del estator y se para. Esto se puede evitar controlando la excitación del rotor, es decir dándole más fuerza a ese campo para que sea capaz de suministrar el par requerido, este control requiere el seguimiento de la resultante del campo giratorio del estator y un control óptico de la posición del rotor, para evitar que la diferencia entre velocidades sea demasiada, y así controlando la diferencia de velocidades y regulando la

excitación del rotor se puede conseguir evitar la parada de este motor. Pero este sistema de control solo es aplicable a los motores con rotor bobinado, ya que los de imanes permanentes no podemos cambiales la intensidad de campo.

Por tanto, tenemos un motor con dos opciones de funcionamiento, donde la variante del rotor bobinado tiene menor rendimiento y la zona de mayores eficiencias es más estrecha que la variante de rotor con imanes permanentes, pero a cambio el de rotor bobinado tiene la opción de variar la excitación del rotor para cuando los pares requeridos sean pequeños bajar la excitación y así conseguir rendimientos mucho mejores, y también implementar un sistema de control para evitar la parada no deseada del motor cuando se exigen pares muy altos, con un sistema de seguimiento de la posición del rotor y de la resultante del campo giratorio producido por el estator, para así regular la excitación del rotor y vencer el que es el mayor inconveniente de este motor, cosa que con la variante de imanes permanentes no se puede hacer.

Otro aspecto a considerar, es el de la necesidad de disponer de dos tipos de corrientes diferentes para alimentar a la máquina de rotor bobinado, ya que para alimentar la excitación se necesita corriente continua y para el estator, corriente alterna, lo que significa que se necesitan convertidores, lo que se traduce en pérdidas. Pero teniendo en cuenta que todas las baterías trabajan con continua, y la necesidad de convertir dicha corriente en alterna para las dos variantes, puede que no exista diferencia entre ambas, ya que se requerirán los mismos elementos para la alimentación de las mismas.

Con esto concluimos el análisis de la segunda máquina ensayada, dando paso al último motor que se analizará en este trabajo, el motor asíncrono o de inducción.

Motor asíncrono o de inducción

En esta sección, la máquina ensayada se trata de un motor de corriente alterna de inducción o asíncrono, con rotor de jaula de ardilla, con 2 pares de polos, alimentación trifásica conectado en triángulo. Sus datos técnicos son: potencia nominal 616 W, velocidad nominal 1500 rpm, tensión nominal 380 V, con lo que su par nominal es de 3.92 Nm, y un peso de 15.45 kg, lo que corresponde con una densidad energética de 39.87 W/kg, la mayor de todos los motores ensayados.

Aplicando la misma metodología que en el resto de máquinas, acoplamos dos motores idénticos mecánicamente (Imagen 50), donde el que actúa como motor lo alimentaremos desde un variador de frecuencia que a su vez está alimentado por la red, y para evitar problemas de ruido y armónicos que nos distorsionen la medida, colocamos antes una bobina de gran tamaño para que sirva de filtro y podamos obtener medidas más estables. El principal problema de este montaje es la excitación del rotor de la máquina que funciona como generador, y la solución que se ha adoptado ha sido la autoexcitación, de tal forma que se conectan diversas baterías de condensadores a los bornes de salida del generador, para que suministren la reactiva suficiente para que el rotor del mismo se sature y se autoexcite y sea capaz de inducir tensión en los bornes de salida.

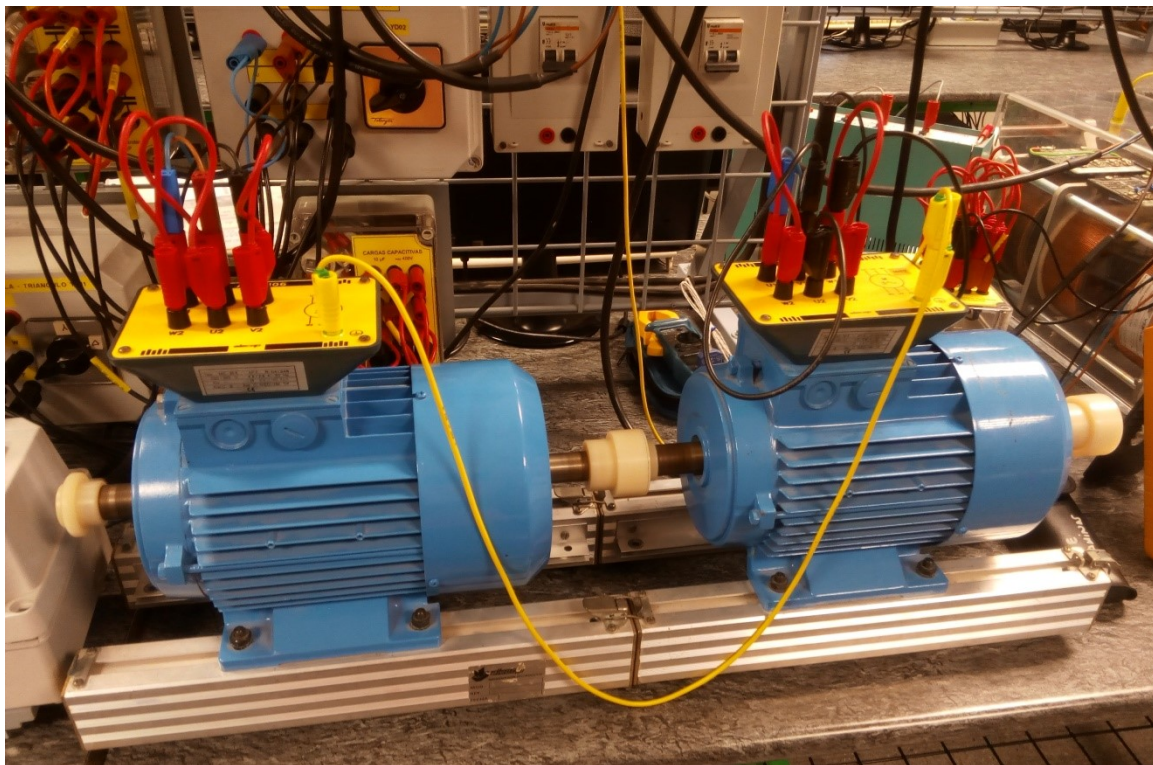


Imagen 50: Detalle del montaje del ensayo del motor asíncrono: motores acoplados mecánicamente y debidamente alimentados

Por tanto ahora el control de la excitación es mediante la adición de baterías de condensadores, para que se mantenga el rotor de la máquina saturado, ya que a medida que se conectan cargas y la potencia demandada sube, el rotor pierde excitación y cae la tensión de salida del generador progresivamente hasta que llega a un límite que se desexcita y la tensión cae rápidamente a cero, dejando de generar potencia. Pero esta tensión de desexcitación depende

de la velocidad de giro que lleve el eje, y por tanto de la frecuencia de que alimentemos a la máquina motora, lo que se traduce en un desplazamiento de la curva hacia tensiones menores cuanto menor es la frecuencia, es decir, la tensión de desexcitación del rotor es cada vez mayor a medida que aumentamos la frecuencia. Este comportamiento se observa perfectamente en las curvas de saturación del rotor a diferentes frecuencias, que se muestran en las imágenes 51 y 52

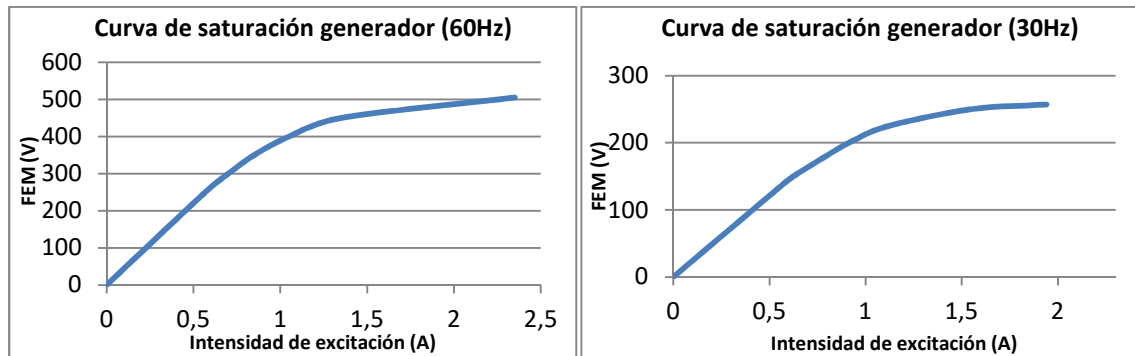


Imagen 51: Curva de saturación del modo generador de la máquina asíncrona para 60 Hz de frecuencia en la máquina motora (1800rpm)

Imagen 52: Curva de saturación del modo generador de la máquina asíncrona para 30 Hz de frecuencia en la máquina motora (900rpm)

Como se puede deducir a partir de los gráficos, cuanto más baja es la frecuencia, más cerca está la tensión de desexcitación de la de saturación máxima, y debido a que la autoexcitación del rotor se produce cuando se dan las condiciones de saturación máxima, a medida que bajamos la frecuencia es más difícil de autoexcitar el rotor. Esto se puede compensar aumentando la potencia reactiva inyectada con más condensadores, es decir aumentar la intensidad de excitación, pero a medida que bajamos la frecuencia el número de baterías de condensadores necesarios para conseguir la misma intensidad de excitación crece exponencialmente.

Por estas razones, la metodología que se emplea en este montaje es, controlar la frecuencia de alimentación del motor y su tensión, variando proporcionalmente la tensión con la frecuencia, con la intención de mantener constante el flujo en la máquina, para esto conectaremos un autotransformador para regular la tensión entre la red y la entrada del variador de frecuencia. Por otra parte, para regular la excitación del rotor, se usa otro autotransformador, ya que los condensadores están agrupados en baterías, y la conexión de una supone un escalón muy grande para poder realizar un control preciso de dicho motor. Siguiendo la línea de la metodología escogida para realizar todos los ensayos, para que los dos motores trabajen en las mismas condiciones de funcionamiento, la tensión de salida del generador se busca que sea la misma que la de alimentación de la máquina motora, por tanto como depende, como hemos visto en los gráficos anteriores de la intensidad de excitación, con el autotransformador que regula la cantidad de reactiva inyectada hacia el generador, ajustaremos dicha tensión que variara para cada punto de funcionamiento. Y como en el resto de ensayos, para conseguir diferentes puntos de funcionamiento, aparte de variar la frecuencia de alimentación, se conectarán progresivamente diversas cargas resistivas que harán que aumente principalmente el par generado por la máquina.

Por tanto una vez claro que variables de control tenemos, pasamos a ver en que rangos nos podemos mover con seguridad, para el control de frecuencia, el principal límite es el de velocidad, siendo este un 120% de la nominal, es decir 1800 rpm, lo que corresponde con la frecuencia de 60 Hz. En cuanto a la excitación, hay un límite que también está relacionado con la

potencia generada, que depende directamente de las cargas que se conectan, y este límite es, la corriente máxima del devanado del estator, tanto de la máquina generadora como de la motora, que está fijado en 3 A (120% de la nominal).

El principio de funcionamiento de este montaje es el siguiente, con la alimentación del estator de la máquina motora con una corriente alterna trifásica, con una frecuencia determinada, se produce un campo magnético giratorio, y como el rotor está compuesto por una estructura de jaula de ardilla, que se compone por espiras cortocircuitadas, donde al encontrarse en influencia del campo magnético del estator, se induce una corriente por ellas, que al mismo tiempo crea otro campo magnético, que al interactuar con el del estator, provoca que el rotor comience a girar, y como las dos máquinas están unidas mecánicamente, el rotor del generador también va a la misma velocidad. Para que en el generador se induzca tensión en los bornes del estator, se tiene que excitar el rotor, de tal manera que como se ha explicado, se procede a alimentar el generador con potencia reactiva hasta que el rotor quede saturado y se induzca tensión en la salida del generador.

Teniendo en cuenta estas limitaciones y que este motor solo admite un modo de ensayo, que es el que se ha descrito, se obtiene la siguiente gráfica par-velocidad:

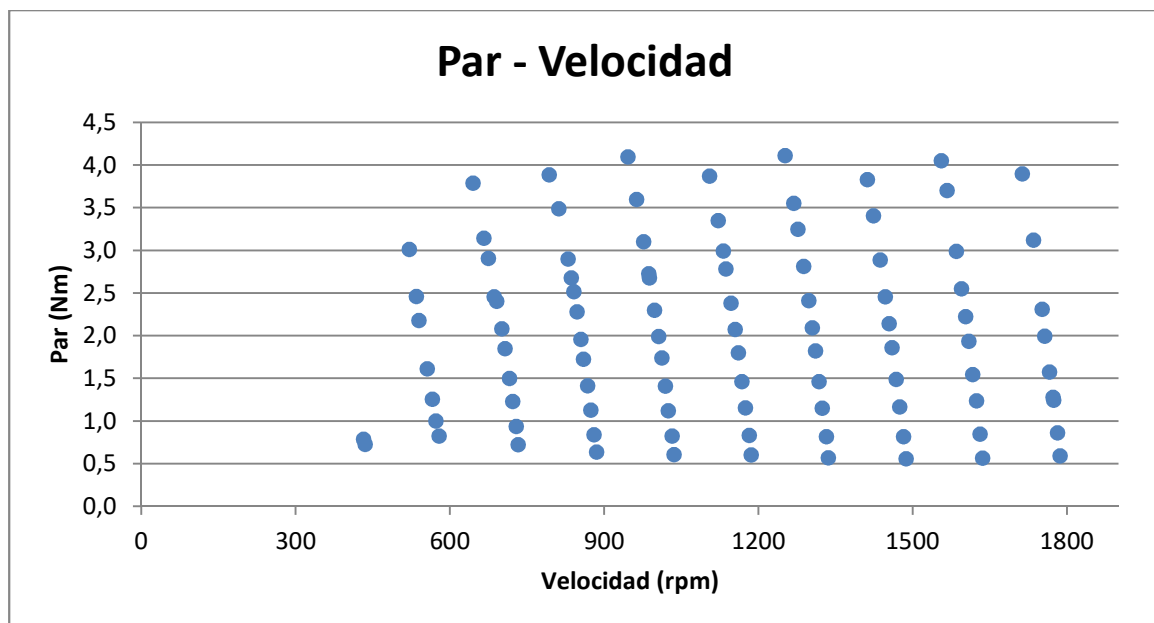


Imagen 53: Gráfica Par-Velocidad con diferentes puntos de funcionamiento de la máquina asíncrona

En esta imagen se aprecia claramente, los saltos de frecuencia realizados durante los ensayos, y vemos que para una misma frecuencia, la velocidad disminuye ligeramente a medida que conectamos cargas y aumentamos el par generado, esto es una de las principales características de las máquina asíncronas, a diferencia de las síncronas, no trabajan a la velocidad de sincronismo, sino que siempre giran a una velocidad ligeramente menor que esta. La diferencia entre la velocidad de giro y la de sincronismo, respecto a la de sincronismo, es lo que se llama deslizamiento, y las máquinas asíncronas están diseñadas para trabajar con deslizamientos del orden del 0.1 donde los rendimientos son máximos y el comportamiento es estable, y en este gráfico se aprecia cómo se aumenta el deslizamiento a medida que se añaden más cargas y se incrementa la potencia demandada.

Otro factor a resaltar, sería la incapacidad de obtener más puntos para bajas velocidades, esto es debido a que, al reducir la frecuencia de alimentación, la cantidad necesaria de condensadores para autoexcitar el rotor del generador, incrementa exponencialmente, y para muy bajas frecuencias, incluso usando todos los recursos disponibles, no conseguimos saturar el rotor, con lo que tampoco generar potencia. Pero estos problemas solo afectan a la parte de generación, lo que afecta a la cantidad de datos recogidos, pero en cuanto al funcionamiento del motor, nada de esto afecta, con lo que tenemos un motor que funciona bien a bajas velocidades e incluso es muy estable, pero no podemos medir los datos que nos dan la información de su funcionamiento a esas velocidades.

Pasando al tema de los rendimientos, y procediendo del mismo modo que en los casos anteriores, con el uso del software Surfer se obtienen los mapas de contorno, donde sobre el gráfico par-velocidad, están dibujadas las curvas de isorendimiento, referenciado los variables de par y velocidad a los valores nominales (3.92 Nm y 1500 rpm respectivamente). A diferencia de los dos ensayos anteriores, aquí no diferenciamos entre dos rendimientos diferentes, ya que este motor solo tiene un modo de funcionamiento y porque aquí no se consume potencia activa en la excitación, por tanto no tiene sentido calcular un rendimiento distinto. El resultado de la aplicación del procedimiento descrito es el que se muestra en la figura 54.

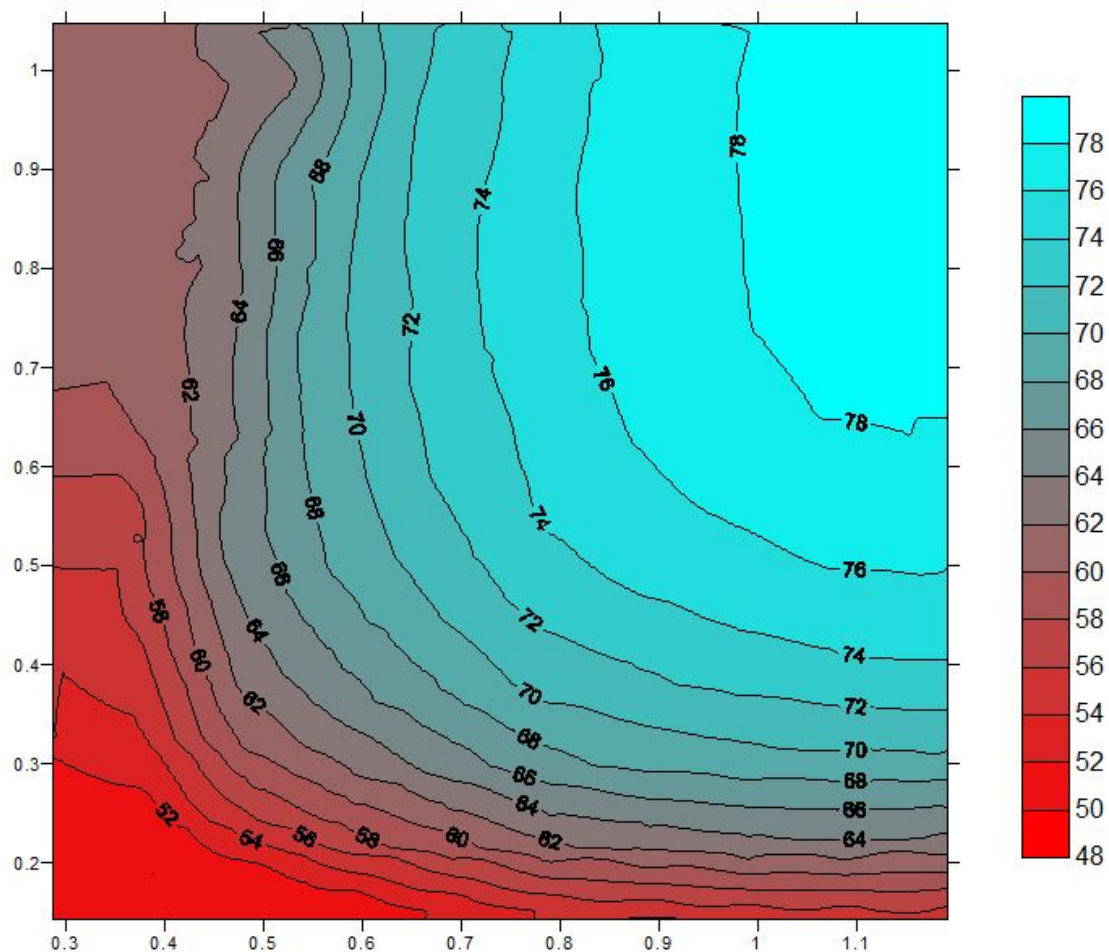


Imagen 54: Gráfico Par-Velocidad con curvas de isorendimiento del modo motor de la máquina asincrónica

Como vemos, en este mapa de contornos las líneas de isorendimiento tampoco se cierran dentro de la zona de trabajo, encontrándose los rendimientos más altos a velocidades ligeramente superiores a la nominal y pares cercanos también al valor nominal. La zona más crítica en cuanto a rendimiento, se encuentra a velocidades bajas y pares bajos. En referencia a la trayectoria que describen las líneas de isorendimiento, se puede observar una trayectoria hiperbólica con las asíntotas en los ejes, que indica que a velocidades medias el rendimiento no depende casi del par entregado, y para velocidades ligeramente superiores a la nominal, las curvas son casi horizontales, que refleja la independencia del rendimiento de la velocidad. Con esta peculiar forma, se crea una zona de rendimientos elevados bastante amplia, que es una ventaja considerable para patrones de comportamiento cambiantes como el que tiene un vehículo.

Ahora pasamos al análisis de esta misma máquina, pero funcionando como generador, donde a partir de los mismos puntos ensayados se calculará el rendimiento del funcionamiento como generador, que se representa en un gráfico par-velocidad mediante las líneas de isorendimiento, como se muestra en la siguiente imagen:

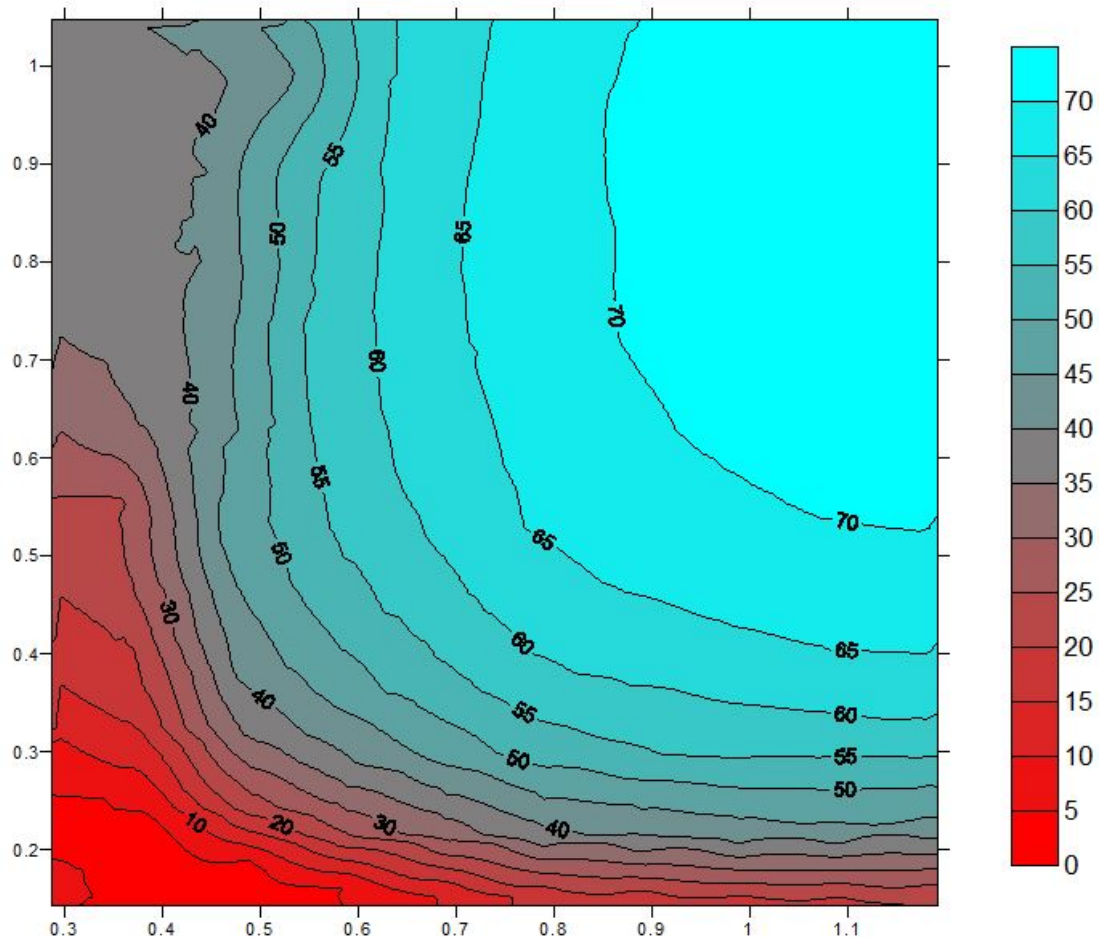


Imagen 55: Gráfico Par-Velocidad con curvas de isorendimiento del modo generador de la máquina asíncrona

Observamos que la forma de las curvas de isorendimiento son casi iguales tanto en modo motor como en modo generador, pero lo relevante es que no tienen los mismos rendimientos los dos modos de funcionamiento, como cabría esperar, sino que el funcionamiento de la máquina asíncrona como motor, es más eficiente que como generador. Pero este comportamiento es debido principalmente a que los dos modos de funcionamiento fueron ensayados con los mismos puntos, pero a diferentes potencias, lo que significa que estos resultados no son válidos para la comparación entre los dos modos de funcionamiento, por tanto lo que cabe esperar es que la misma máquina se comporte de forma bastante similar en los dos modos.

Con lo que respecta al control, el punto más complicado del ensayo, es la regulación de la excitación del rotor del generador, donde con la ayuda de un autotransformador regulamos la potencia reactiva que suministramos al generador y con ello fijamos la intensidad de excitación y la tensión de salida. Pero, como ya se ha comentado, existe una tensión mínima de desexcitación que si se supera la máquina deja de generar potencia, y al mismo tiempo depende de la velocidad de giro del eje, es decir, de la frecuencia de alimentación. Pero estos problemas solo afectan para la recogida de datos, ya que la excitación solo es necesaria en el generador. Con lo que respecta al funcionamiento como motor, es un motor muy estable y robusto, y su única variable de control es la frecuencia, lo que hace que su control sea muy simple.

A pesar de los problemas de obtención de datos, tenemos bien caracterizado el comportamiento del motor de inducción, y hemos visto que con un control simple, se consigue una zona bastante amplia de rendimientos máximos sobre los valores nominales de la máquina con un comportamiento muy estable a cualquier velocidad, con la única limitación que la intensidad de los devanados del estator para pares demandados muy altos. Y con lo que respecta al rendimiento, presenta dos propiedades diferentes muy interesantes, la independencia del rendimiento del par demandado a velocidades medias y la no dependencia del rendimiento de la velocidad para velocidades ligeramente superiores a la nominal, lo que le da a este motor unas ventajas que pueden compensar los rendimientos a velocidades bajas, ya que delante de un patrón de comportamiento variable como el de un vehículo, una zona de trabajo amplia con rendimientos altos es la mejor opción para optimizar el comportamiento, y este motor puede tener posibilidades, por su fácil control y su robustez, de ser candidato a propulsar el vehículo eléctrico.

Y por último, comentar que a causa de que este motor solo consume corriente alterna, y dado que las todas baterías funcionan con corriente continua, este motor necesitaría un convertidor para pasar de corriente continua a alterna, lo que significa que se introducen pérdidas y que el rendimiento global sería un poco menor que el del motor. Pero el hecho de que solo consuma alterna, le puede dar una pequeña ventaja sobre los motores síncronos de rotor bobinado que necesitan alterna y continua, y lo que puede significar más pérdidas y menor rendimiento global.

Con esto damos por concluidos los ensayos de los diferentes motores y después de este análisis individual de cada motor, damos paso al apartado donde se hace un análisis comparativo de todos los resultados obtenidos.

Análisis comparativo de los resultados

En este apartado se pretende analizar los tres tipos de motores ensayados de forma conjunta, resaltando las ventajas e inconvenientes de cada uno para la aplicación del vehículo eléctrico, concluyendo cuales tienen más opciones de ser los candidatos para propulsar dicho vehículo.

En primer lugar, para poder hacer bien la valoración, tenemos que recordar los requisitos que exige el vehículo eléctrico a su motor. La parte más exigente para un motor en cualquier vehículo es el arranque, donde debe de suministrar mucho par a muy poca velocidad de giro, y así poder aumentar la inercia del vehículo. Pero si hablamos de la zona de trabajo más habitual de un motor de automóvil, se tiene que definir el ambiente por donde se hace funcionar, ya que por ejemplo si se trata de un ámbito urbano, el vehículo no alcanza grandes velocidades y está constantemente arrancando y parando, pero sin embargo, cuando vamos por una autovía el motor trabaja a grandes velocidades y bajos pares, solo se incrementa el par cuando subimos alguna cuesta. Por tanto concluimos que el motor necesita una zona de trabajo bastante amplia para adaptarse a todas las situaciones que requiere un vehículo habitual, priorizando las zonas de bajas velocidades y altos pares, para el arranque, y altas velocidades y bajos pares para el modo crucero.

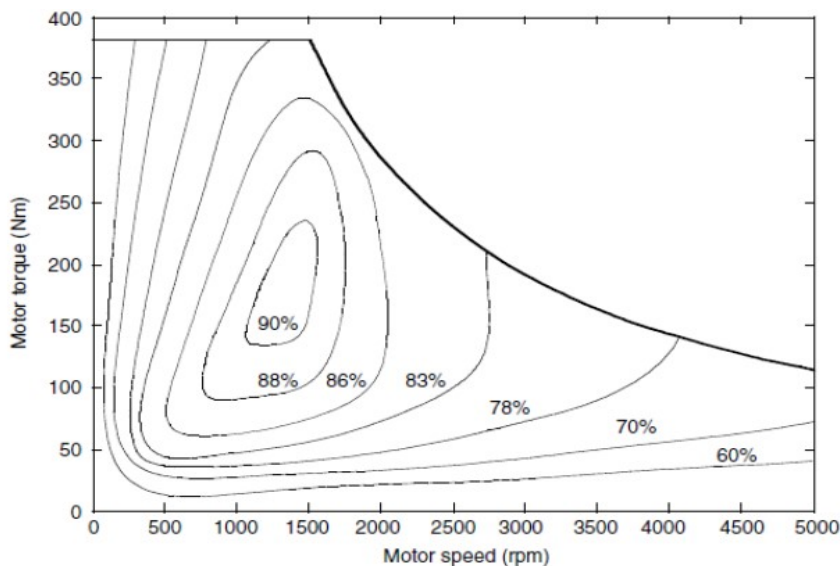


Imagen 56: Ejemplo de mapa de rendimientos de un motor eléctrico ideal para el vehículo eléctrico [47]

En dichas zonas interesa que los rendimientos sean lo más grandes posibles ya que serán las zonas de trabajo más usadas, y otra característica a tener en cuenta son las líneas de isorendimiento, ya que interesa que en la zona de arranque el rendimiento sea independiente del par ejercido, es decir, líneas de isorendimiento verticales, y por el contrario, para la zona de crucero, interesa que el rendimiento no dependa de la velocidad, esto significa que las líneas de isorendimiento sean horizontales, como se muestra en la imagen 56, que define el mapa de rendimientos de un motor eléctrico optimizado para los requisitos de un vehículo. Y finalmente un aspecto también importante es la posibilidad de dicho motor de incorporar un sistema de freno regenerativo, el cual no es más que el funcionamiento de la misma máquina como generador, que pueda cambiar de modo a una velocidad media y pueda extraer energía del eje mientras lo frena. Y todo esto, combinado con un control de todas las variables cuanto más sencillo mejor.

Una vez refrescados los requisitos del motor ideal que buscamos, vamos a analizar cómo de bien se adaptan los motores ensayados a estos requisitos, comenzando por el motor de corriente continua.

El motor de corriente continua, como ya hemos visto, dispone de un control muy sencillo, solamente de la tensión de alimentación, para el caso del estator con imanes permanentes, y para la variante de estator bobinado también la intensidad de excitación. Las principales diferencias entre las dos variantes son que, con imanes permanentes el rendimiento es mayor y la zona de trabajo con rendimientos altos es más amplia, pero a cambio de tener un menor control sobre el par máximo y los rendimientos a bajos pares requeridos. También hay que resaltar que, para la opción de estator bobinado, los ensayos se han hecho con excitación independiente, este sistema de excitación será bastante difícil de implementar en un vehículo, ya que requiere de dos fuentes de alimentación independientes entre sí, por tanto habrá que optar por otra forma de conexión de la excitación, lo que repercute en el control del mismo, siendo la mejor opción para el control la de la excitación compuesta, como ya se explicó en la sección de motores. Con lo que, con esta solución, también se tiene una variable de control con la opción del estator bobinado

En cuanto a la forma de las líneas de isorendimiento, se ajustan bastante a las características que se han marcado como patrón, especialmente en la variante de estator bobinado. Quizás uno de los pocos inconvenientes que tenga este motor, es el uso de escobillas, con las correspondientes pérdidas y la necesidad de mantenimiento, pero que para la aplicación automovilística no tiene por qué suponer más revisiones que los actuales con motores de combustión interna.

En cuanto al comportamiento como generador, esta máquina también es muy robusta, respondiendo muy bien a cambios bruscos de carga, y para realizar el cambio de motor a generador solamente haría falta un conmutador que cambiara las fases, de tal manera que cuando el vehículo vaya a cierta velocidad y se disponga a frenar, se active la conmutación, pasando de modo motor a modo generador, consiguiendo generar una corriente continua a cambio de ir perdiendo velocidad de giro.

Por tanto, el motor de corriente continua se postula con muy buen patrón de comportamiento, especialmente en la variante de rotor bobinado y un control sencillo y directo, pero sus rendimientos son relativamente bajos comparados con otros tipos de motores, el cual se puede mejorar con la variante de imanes permanentes, pero perdemos la opción de regulación de par y el mapa de rendimientos ya se desvía del patrón establecido. Además se adapta muy bien a las condiciones del freno regenerativo, como único inconveniente tiene la necesidad de mantenimiento a largo plazo, cosa que en otros motores no ocurre. Con todo esto, el motor de corriente continua, especialmente su variante de estator bobinado, se consolida como uno de los candidatos a ser el encargado de propulsar el vehículo eléctrico.

A continuación pasaremos al motor síncrono, el cual presenta dos posibilidades constructivas, con rotor bobinado o con imanes permanentes, al igual que en el anterior caso y como es de esperar, la versión de imanes permanentes presenta mayor rendimiento y sus curvas de isorendimiento son totalmente planas, es decir, tiene un rendimiento independiente de la velocidad. En cambio el modelo con rotor bobinado presenta un mapa de rendimientos más

parecido al presentado como modelo, y a cambio la zona de rendimientos altos es más estrecha que el de imanes, también tiene la ventaja de poder regular la excitación para conseguir mejores rendimientos a bajos pares.

Con lo que respecta al control, con un simple variador de frecuencia se puede controlar directamente la velocidad de la máquina, pero este control no trabaja muy bien en regímenes transitorios, lo que no es captable para la aplicación vehicular, con lo que el control adecuado para este uso es un control más sofisticado como el control vectorial, que sí que consigue conseguir un control dinámico frente a cualquier cambio de condiciones de funcionamiento. Por otro lado, el gran inconveniente que tiene este motor es que cuando se pide más par del que puede dar, el motor se para, por eso el control para que no pase esto debe ser muy preciso, para ello es necesario controlar la diferencia de velocidades entre la resultante del campo magnético giratorio del estator y la del rotor, para regular la excitación del rotor y evitar la parada no intencionada. Este control tan sofisticado solo es válido para la opción de rotor bobinado, lo que hace que la variante de imanes permanentes, con más sencillez de control y mejores rendimientos sea más atractiva, eso sí, para esta opción deberá adoptarse una solución de compromiso entre el mínimo rendimiento que se quiere tener a pares bajos y el par máximo disponible, para seleccionar la intensidad de campo de los imanes permanentes, que se recomienda que esté un poco sobredimensionado para evitar la parada por exceso de par requerido.

En cuanto a la implementación del freno regenerativo, o lo que es lo mismo, el funcionamiento de esta máquina como generador, es una máquina que tiene muy buenas cualidades como generador, por eso es la más utilizada en labores de generación de gran potencia, ya que es capaz de comenzar a generar a cualquier velocidad simplemente controlando la excitación, con la única pega, que la frecuencia de salida depende de la velocidad del rotor, por tano para la aplicación del freno regenerativo, donde la velocidad va cayendo, la frecuencia de la corriente generada será cada vez menor, pero esto no significa un problema, ya que como para poder almacenar esta energía, tenemos que pasarla a corriente continua, y los rectificadores no tienen problema en trabajar con distintas frecuencias. Con respecto al cambio de modo motor a modo generador, este se hace retrasando la corriente que se suministra al estator, de modo que cuando se quiere activar la función de freno regenerativo, un sistema de conmutadores retrasa la corriente del estator, de tal manera que ahora el campo magnético del estator gira a la misma velocidad pero por detrás del campo creado por el rotor, lo que provoca que se frene a cambio de obtener un corriente variable en frecuencia, que transformaremos en continua para su almacenaje en las baterías. Este sistema de conmutadores se puede incorporar directamente en el variador de frecuencia y controlar así este modo a la vez que la alimentación de energía reactiva como la de la frecuencia.

Por tanto, el motor síncrono en su variante de imanes permanentes, con grandes rendimientos y una zona de funcionamiento con elevados rendimientos muy grande, se postula como favorito entre los grandes fabricantes automovilísticos para sus primeros modelos eléctricos, ya que la variante de rotor bobinado, aunque ofrece la posibilidad de la regulación de la excitación para obtener mayor eficiencia, necesita un control muy sofisticado, lo que hace que los fabricantes opten por la solución más sencilla. Incluso la implementación del freno regenerativo se puede integrar en el control del variador de frecuencia, lo que hace que este motor solo tenga el

inconveniente de la parada no deseada a pares requeridos grandes, donde sobredimensionando los componentes críticos, se puede evitar este problema. Con lo que la opción de imanes permanentes se perfila con muy pocas pega y muchas ventajas para la aplicación vehicular.

Y por último pasamos al motor de inducción o asíncrono, el cual solo tiene un modo de funcionamiento, a diferencia de los anteriores, donde trabajando como motor es muy estable con un control algo sofisticado, ya que al igual que en el caso de la máquina síncrona, un variador de frecuencia no es suficiente para los requisitos de la aplicación en estudio, por tanto, es necesario implementar un dispositivo de control vectorial para conseguir una respuesta dinámica ante cualquier cambio de condiciones de funcionamiento. Otra de las ventajas de dicha máquina es, que no requiere alimentación en el rotor, lo cual le confiere una alta robustez, y la capacidad de alcanzar velocidades mayores. Una de las características de los motores de inducción es que consumen una gran cantidad de energía reactiva, lo cual implica que el dispositivo electrónico de control, tiene que también inyectar la reactiva necesaria para magnetizar el hierro y así controlar el par entregado.

En cuanto a la forma de las líneas de isorendimiento, se adaptan bastante bien a los requisitos definidos anteriormente, siendo los valores ligeramente superiores a los de la máquina síncrona de rotor bobinado. Y respecto a la implementación del freno regenerativo, el dispositivo de control de la máquina tan solo tiene que cambiar el tiempo de conmutación para retrasar la posición del campo del estator manteniendo su velocidad de giro por debajo de la de giro del rotor, con lo que la máquina pasa a trabajar como generador, al mismo tiempo el mismo controlador tiene que estar suministrando la reactiva necesaria para excitar el rotor. Al igual que en el caso anterior, aquí también tendremos una corriente generada de frecuencia variable, que el convertidor la transformará en continua para su almacenaje en las baterías de alimentación.

Por tanto, tenemos un motor muy robusto y con buenas características para operar en condiciones adversas y cambios bruscos de carga, con un control algo sofisticado tanto para el funcionamiento como elemento motriz, como para la implementación del freno regenerativo, con lo que es también un buen candidato como elemento generador de tracción para el vehículo eléctrico.

Una vez resumidas las principales características de cada máquina analizada, cabe destacar que no se ha hecho mucho énfasis en los rendimientos, sino que se ha centrado más en el análisis de la forma de sus curvas, esto es debido a que los motores ensayados no están diseñados para la aplicación en estudio, y por tanto la capacidad de optimización puede ser diferente en cada uno de ellos, ya que cuando hablamos de rendimiento, y sobre todo de intentar mejorarlo, tenemos que hablar de las pérdidas, ya que se trata de ver que pérdidas se pueden minimizar en cada caso. En general, las dos únicas pérdidas que se pueden minimizar con aspectos estructurales en todos los motores son las pérdidas en el hierro y las pérdidas en el cobre por efecto Joule.

Las pérdidas en el hierro se pueden reducir aumentando la masa de hierro, de forma que se aumenta el rendimiento, pero a cambio, el peso también aumenta considerablemente y el coste proporcionalmente, con lo que, tratándose de una aplicación de transporte donde el peso juega un papel importante, y como no, el aspecto económico también, habrá que encontrar una solución de compromiso entre estos tres factores. En cuanto a las pérdidas en el cobre, que van relacionados con la corriente que circula por los cables al cuadrado, para intentar reducir las, lo

que se puede hacer es aumentar la sección de los conductores, lo que afecta al tamaño y peso de la máquina también, por tanto se trata de averiguar, según la intensidad más habitual que circula por ellos, la sección óptima de los cables en cuanto a rendimiento, peso y volumen.

Por tanto, teniendo en cuenta que las máquinas ensayadas no están optimizadas y puede ser que tengan bastante margen para ello, concluimos que los valores de rendimiento obtenidos no son especialmente representativos de las características de cada máquina para la aplicación del vehículo eléctrico, con lo que no podemos descartar ninguna máquina, ni llegar a muchas conclusiones por los valores de rendimientos. La única afirmación que podemos concluir es que, cuando en una máquina se puedan implementar las opciones de, un campo creado por imanes permanentes o por una bobina, la opción de imanes permanentes siempre será mucho más eficiente, ya que a diferencia de la bobina, un imán no necesita ser alimentado por corriente para crear el campo.

Con este último aspecto en cuenta, concluimos que actualmente no hay una tecnología que presente unas características especialmente idóneas para los requisitos que impone el vehículo eléctrico. Por lo que dentro de las tres tecnologías ensayadas, se puede ver que se tiene que elegir entre un control minucioso o un rendimiento alto, sobre todo en los que ofrecen dos opciones de construcción. Y viendo la situación actual, parece que los grandes fabricantes hayan optado por los altos rendimientos, debido a que la autonomía del vehículo sigue siendo uno de los problemas principales, y la densidad de potencia de las baterías aún es reducida. Por tanto, se observa que las opciones de las máquinas con imanes permanentes son las que más éxito están teniendo, especialmente el motor síncrono. Pero es posible que con el desarrollo de mejores controladores electrónicos y el aumento de la capacidad de las baterías, la tendencia cambie hacia la un control más sofisticado para buscar rendimientos máximos en todos los puntos de funcionamiento, donde podrían entrar muchos candidatos, que como hemos visto ofrecen unas cualidades muy similares, diferenciándose solo en pequeños detalles.

CONCLUSIONES

En este último capítulo se pretende remarcar los objetivos de este proyecto y sus resultados, y sobretodo resaltar las conclusiones más relevantes que se han hecho en el mismo, por tanto comenzamos recordando los principales objetivos de este trabajo fin de carrera

Como se presentó al principio, el objetivo principal de este proyecto era sobretodo intentar dar una solución a la discusión de qué tipo de motor es más adecuado para el vehículo eléctrico, pero resulta que para que un vehículo así tenga un buen rendimiento, necesita una serie de componentes exclusivos de la modalidad eléctrica. Por tanto, otro de los objetivos fundamentales, era informarse de todos estos elementos distintivos y al igual hacer un análisis de las opciones que hay y tratar de indicar la mejor para la aplicación seleccionada.

En consecuencia, este trabajo dispone de dos partes muy bien diferenciadas, la parte de búsqueda de información y análisis de alternativas, y por otra parte, la sección de ensayos y el análisis de datos obtenidos experimentalmente. Teniendo claro esta estructura, vamos a tratar de hacer una revisión de los puntos más notables de este documento.

Comenzando por el contexto, donde vimos en la parte económica, que el segmento de mercado que define los posibles compradores de vehículos eléctricos estaba restringido por la autonomía de los mismos y por el gran coste inicial, de tal forma que este segmento está formado por conductores con trayectos regulares con una distancia considerable y un recorrido previsible, con el fin de amortizar el gasto inicial. Este grupo de consumidores se puede ampliar gracias a la conciencia social por la reducción de los gases de efecto invernadero y de la convicción de una alternativa al transporte con vehículos que consumen combustibles fósiles.

Otra conclusión que deriva del coste energético de la recarga del vehículo, son los gastos fijos de contratación de un punto de suministro, es decir, no es lo mismo si puedes recargar el vehículo con la misma instalación de tu casa, que si tienes que hacer otra para poder recargarlo, o tener que hacerlo en los puntos de carga públicos, ya que sobre todo a la hora de la facturación, hay unos coste fijos, que si los compartes con la instalación de tu casa, no influye en el precio de la recarga, pero si no es la misma instalación, implica que los costes de recarga de tu vehículo son mayores. Por tanto se concluye que los conductores que dispongan de garaje privado, con posibilidad de instalar una toma de corriente acoplada a la misma instalación de su casa, podrán amortizar antes la inversión inicial realizada.

En cuanto al aspecto ambiental, se vio que la implantación de nuevos vehículos eléctricos tenía muchos beneficios medioambientales y a nivel de calidad de vida, sobretodo en ambientes urbanos, donde se produce una mejora de la calidad del aire y baja el nivel de contaminación acústica. Junto con el aspecto de la reducción considerable de emisiones de CO₂.

El aspecto gubernamental en este caso jugará un papel fundamental, ya que como económicamente, las opciones del vehículo convencional y el eléctrico están muy a la par, el gobierno tiene la opción de incentivar, con diversas medidas, la implantación de este novedoso vehículo. Para ello existen diversas líneas de acción, donde el gobierno de nuestro país ha optado mayoritariamente por implantar políticas de oferta, centradas en ofrecer ofertas económicas para el fomento del transporte con energías alternativas a los derivados del petróleo.

Pasamos ahora al estudio de los componentes diferenciadores del vehículo eléctrico, concretamente al apartado de las baterías, donde se explicaron los cuatro principales tipos de baterías de alta potencia que existen hoy en día en el mercado, remarcando sus principales ventajas y sus usos más comunes. Pero lo que sacamos de este apartado, fue que el vehículo eléctrico necesita dos tipos de baterías, una principal con un tamaño considerable de Ion-Litio, que suministre la alimentación a las grandes cargas, principalmente el motor, ya que este tipo de baterías ofrece una gran densidad de energía y una fantástica vida útil, aunque su mayor inconveniente es el precio, pero que poco a poco se prevé que vaya bajando.

Y por otro lado, tendríamos una batería de plomo-ácido, con un tamaño ya más reducido, para alimentar a todos los dispositivos electrónicos con un nivel de tensión de 12V, esto se debe a que este tipo de baterías son una tecnología muy madura y por tanto, con un precio muy bajo, pero su gran inconveniente es su densidad de energía, lo que significa que pesa mucho para que la batería principal utilice dicha tecnología.

Una vez clara el sistema de baterías a montar en el vehículo eléctrico, pasamos a otro componente fundamental, encargado del correcto funcionamiento, el sistema de control, es por ello que para poder conseguir un alto rendimiento global en un vehículo, es imprescindible tener un buen sistema de control, ya que es el sistema que pone todos los componentes a trabajar en conjunto. En este apartado vimos cómo se organizan todos los elementos principales de un vehículo eléctrico en un esquema de control típico. Lo que podemos sacar de este apartado es que, la electrónica cobra un gran papel en el correcto funcionamiento y coordinación de todos los elementos del vehículo, pero esto no supone ningún reto, ya que en los últimos años, la electrónica ha evolucionado a gran velocidad, y los requisitos que exige el control de este tipo de vehículo, no suponen un gran problema para su implementación.

Ahora nos saltamos la parte de motores, para poder analizar dichos componentes con más hincapié después, junto con los resultados de los ensayos, y pasamos a la parte del estudio del estado actual. Este estudio ha sido muy aclarador, sobre todo para escoger las líneas de ejecución de los ensayos, ya que el análisis de los 18 modelos de vehículos eléctricos que hay disponibles hoy en día en el mercado, ha revelado ciertas tendencias entre los principales fabricantes automovilísticos, en diferentes componentes. Por ejemplo, se confirma el dominio absoluto de las baterías de Ion-Litio, y se ve la progresión que experimentan con la capacidad de las mismas, llegando a valores de hasta 100 kWh.

Por otro lado, no se ve ningún patrón en cuanto a la relación entre la tecnología del motor escogida y el consumo de energía a los 100 Km, ya que todos los coches tienen consumos entre 12.5 y 17.5 kWh a los 100km, esto se puede deber a la influencia de diversos factores como la gestión electrónica, el tipo de neumáticos montados, su masa, la aerodinámica de cada uno de los modelos en los resultados de los ciclos de homologación. Sí que es interesante, remarcar que 10 de los 18 modelos analizados montan un motor síncrono de imanes permanentes, y que los dos modelos más potentes, son los únicos que montan un motor de inducción, con un consumo cercano al de la media.

Por tanto concluimos, que a priori no hay una tecnología motriz dominante, y que varias de ellas pueden optar a la propulsión del vehículo eléctrico con un buen rendimiento, y que no solo el rendimiento del motor es importante, sino que el resto de dispositivos auxiliares también influyen significativamente en el consumo de energía.

A continuación pasamos al análisis del coste medio y de la diferencia de emisiones entre un coche convencional con motor de combustión interna y un vehículo eléctrico. Donde partiendo de los diferentes consumos, y de los precios de la energía utilizada en cada caso, se calcula el coste medio de cada tipo de vehículo, y del mismo modo, con el dato de emisiones por cada unidad de consumo, se calculan las emisiones de CO₂ provocadas por cada tipo de vehículo.

Con los datos obtenidos, se concluye que el vehículo eléctrico es 10 veces más barato que los coches de gasolina y más de 6 veces que los de gasoil, recorriendo todos la misma distancia. Este dato ha sido calculado teniendo en cuenta tarifas eléctricas subvencionadas especialmente para el vehículo eléctrico, pero si consideramos los precios medios de la electricidad en España, que se prevé que será el precio al que tenderá el coste de la recarga del vehículo a largo plazo, el resultado es que, el vehículo eléctrico sigue siendo 2.5 veces más barato que el de gasolina y 1.7 que el de gasoil, y esto a lo largo de la vida útil es una diferencia bastante significativa.

Y respecto a las emisiones de CO₂ equivalentes de cada tipo de motor, vuelve a ganar el vehículo eléctrico con menos de la mitad de emisiones equivalentes que los motores diésel y gasolina, con la ventaja añadida que estas emisiones no se producen de forma local, como ocurre en los motores de combustión interna, lo que ayuda a que sobretodo en ambientes urbanos, la calidad del aire mejore y por tanto la calidad de vida en dicha zonas.

Y ahora ya entramos en el tema central de este proyecto, los motores eléctricos para la tracción de vehículos. Donde en una primera parte, se han descrito las principales ventajas e inconvenientes de todos los tipos de motores, que tienen opciones de ser candidatos a ser montados en un vehículo eléctrico. Y una segunda parte donde se han ensayado tres tipos de motores, con el mismo método de ensayo, y a partir de los resultados obtenidos y con la experiencia del control realizado, se ha llegado a diferentes conclusiones.

En primer lugar, los requisitos que exige un vehículo a un motor, es sobre todo un rango de velocidades y pares con grandes rendimientos muy amplio, ya que un vehículo dependiendo del entorno que esté tiene un patrón de comportamiento diferente, incluso dependiendo del estilo de conducción del conductor, los puntos de funcionamiento pueden abarcar rangos muy amplios, por esta razón, un motor tiene que tener una zona muy amplia de rendimientos altos, para poder llegar a todos los puntos con una eficiencia aceptable.

Otro requisito importante para un motor de un vehículo eléctrico, es la posibilidad de implementar el freno regenerativo, característica única de las máquinas eléctricas, esto no es más que la misma máquina funcionando en modo generador, con el objetivo de recuperar energía en las frenadas.

Por tanto, con estos requisitos claros, y con todas las características de cada tipología de motor ensayada, que se han descrito en anteriores capítulos, se concluye que no hay una tecnología dominadora que se adapte perfectamente a los requisitos anteriores, pero sí que se puede decir que hay una tecnología que se perfila como la favorita de los grandes fabricantes automovilísticos, esta es, la máquina síncrona con imanes permanentes, que dispone de la región más amplia a rendimientos elevados de todos los modelos en análisis, como hemos podido comprobar en los resultados de los ensayos, y junto con la utilización de imanes permanentes para crear el campo del rotor, hace que el rendimiento sea mucho más alto que con rotor bobinado, lo que implica que, solo tiene una variable de control, que es la frecuencia de alimentación del estator, lo que con un dispositivo de control vectorial, se controla la velocidad y el par generado, que es el mismo dispositivo que se encarga de cambiar de modo motor a modo generador, activando así el freno regenerativo, para el cual también tiene unas buenas características. El único inconveniente de esta máquina, sería la parada no deseada cuando el par demandado es mayor que el que puede suministrar, pero esto se solucionaría sobredimensionando ligeramente la intensidad del campo de los imanes permanentes, para que el par máximo sea bastante alto.

Por tanto, esta parece ser la mejor opción en este momento, pero puede ser que en un futuro cercano, esta tendencia puede que cambie, porque este motor sigue teniendo zonas débiles de funcionamiento, sobre todo a pares bajos, por tanto, puede que otra topología de motor con alguna mejoras, pueda sustituir a este, ya que hemos visto que todos los motores ensayados presentan una características de comportamiento muy similares, y lo único que los diferencia son pequeños detalles que afectan al control o fiabilidad de los mismos, con lo que es muy probable que la discusión de, qué motor es mejor para el vehículo eléctrico, siga en las cabezas de los fabricantes de vehículos eléctricos durante algunos años, pero como ya hemos dicho, el motor que se perfila como principal candidato a propulsar los próximos modelos de vehículos eléctricos, es el síncrono con imanes permanentes.

PRESUPUESTO

En este apartado se ha querido hacer un presupuesto ingenieril de la labor que se ha llevado a cabo con este trabajo. De tal forma que comenzaremos detallando todos los gastos relacionados con la amortización de los materiales utilizados durante los ensayos de los motores realizados, como se muestra en la siguiente tabla:

CONCEPTO	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Cable unipolar 2 mm ² de 1m de longitud	Unidades	62	0,80 €	49,60 €
Cable unipolar 2 mm ² de 0,3m de longitud	Unidades	43	0,50 €	21,50 €
Cable unipolar 2 mm ² de 2 m de longitud	Unidades	6	1,20 €	7,20 €
Cable unipolar de puesta tierra 2 mm ² de 1m de longitud	Unidades	8	1,20 €	9,60 €
Cable tripolar 3x2 mm ² de 1m de longitud	Unidades	14	2,30 €	32,20 €
Cable tripolar 3x2 mm ² de 0,3m de longitud	Unidades	5	1,80 €	9,00 €
Cable bipolar 2x2 mm ² de 1m de longitud	Unidades	10	1,70 €	17,00 €
Motor asíncrono de 2 pares de polos, rotor de jaula de ardilla (616W)	Unidades	2	1.890,00 €	3.780,00 €
Motor síncrono de 2 pares de polos, rotor bobinado (600W)	Unidades	3	2.420,00 €	7.260,00 €
Motor de corriente continua con escobillas rozantes (600 W)	Unidades	2	2.860,00 €	5.720,00 €
Rectificador de corriente alterna a continua	Unidades	2	40,00 €	80,00 €
Autotransformador regulable (400V, 10A)	Unidades	2	320,00 €	640,00 €
Osciloscopio de medida con tres entradas	Unidades	2	360,00 €	720,00 €
Variador de frecuencia (230V)	Unidades	1	185,00 €	185,00 €
Baterías de condensadores (10 µF, 400V)	Unidades	12	35,00 €	420,00 €
Multímetro trifásico avanzado (3*400V, 5A)	Unidades	3	250,00 €	750,00 €
Conmutador estrella triángulo	Unidades	14	42,00 €	588,00 €
Portalámparas E-27	Unidades	6	12,00 €	72,00 €
Bombillas de 40W para portalámparas E-27	Unidades	3	2,50 €	7,50 €
Bombillas de 100W para portalámparas E-27	Unidades	3	3,00 €	9,00 €
Resistencias de 450 W	Unidades	3	8,50 €	25,50 €
Estufas eléctricas 600W	Unidades	3	18,50 €	55,50 €
Multímetro monofásico digital	Unidades	6	33,00 €	198,00 €
Interruptor trifásico 25A	Unidades	1	21,00 €	21,00 €
Transformador trifásico 230V/380V	Unidades	1	58,00 €	58,00 €
TOTAL MATERIAL ENSAYO				20.735,60 €

Tabla 2: Presupuesto detallado de los gastos de amortización del material utilizado durante los ensayos de los motores

Una vez vistos los gastos de amortización del material utilizado en los ensayos, tenemos ya el resumen del presupuesto total, donde aparte de los gastos de amortización del material, como vemos se incluye el procesamiento informático de los datos de los ensayos, así como la horas de redacción de este mismo documento, al igual que las horas del ingeniero técnico que ha empleado en la recolección de datos en los ensayos, incluyéndose también la energía consumida en los mismos y los gastos generales de limpieza, seguridad y alquiler del laboratorio, y por último, se incluye el margen profesional, que es un 10 % del subtotal. Por tanto el coste completo del proyecto asciende a un total de 36.621,19 €, como se detalla en la siguiente tabla:

CONCEPTO	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Procesamiento informático	Horas	18	14,32 €	257,76 €
Energía consumida en ensayos	kWh	50,4	0,27 €	13,61 €
Ingeniero técnico	Horas	104	27,07 €	2.815,28 €
Redacción del documento	Horas	238	14,32 €	3.408,16 €
Amortización material de ensayos	Unidades	1	20.735,60 €	20.735,60 €
Gastos generales (Limpieza, seguridad, alquiler laboratorio, etc.)	Unidades	1	312,00 €	312,00 €
Margen profesional	Porcentaje	10	27.230,41 €	2.723,04 €
			SUBTOTAL	30.265,45 €
			IVA (21%)	6.355,74 €

TOTAL PRESUPUESTO 36.621,19 €

Tabla 3: Resumen del presupuesto completo del proyecto

ANEJOS

Anejo 1: Componentes básicos de los sistemas de control

En este anejo se pretende dar unas nociones básicas de la electrónica que se utiliza en los circuitos de control y ver las diferentes características de los principales elementos de control del vehículo eléctrico.

Como hemos avanzado, la mayoría de los equipos electrónicos y eléctricos requieren un voltaje bastante constante, pero muchas veces este no es el mismo que el que proporciona la batería. Para conseguir la correcta alimentación de los equipos de diferentes voltajes se puede lograr bajando la tensión por debajo de la de funcionamiento de la batería, o aumentándola hasta otro valor mayor constante, y en otros casos, queremos producir un voltaje variable (por ejemplo, para el motor) a partir del voltaje más o menos fijo de una batería. Para cualquiera de estos cambios de voltaje que se requieren, se realizan mediante el uso de circuitos de "conmutación" o "corte". A continuación vamos a presentar algunos de estos circuitos de conmutación más comunes: [14]

Transistores

Para comprender como funciona el sistema de control, primero tenemos que empezar con los elementos más sencillos de los circuitos de conmutación o corte, y uno de los elementos esenciales en dichos circuitos es el transistor, un dispositivo electrónico semiconductor que entrega una señal de salida en respuesta a una señal de entrada. Un transistor está compuesto normalmente por tres partes, una que emite electrones (emisor), otra que los recibe o recolecta (colector) y otra con la que se regula el paso de dichos electrones (base). Una pequeña señal eléctrica aplicada entre la base y el emisor modula la corriente que circula entre el emisor y el receptor.

A continuación se explicarán los diferentes tipos de interruptores electrónicos más utilizados actualmente remarcando las principales diferencias y usos que tienen cada uno de ellos.


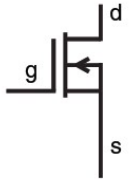
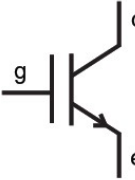
Type	Thyristor	MOSFET	IGBT
Symbol			
Maximum voltage (V)	4500	1000	1700
Maximum current (A)	4000	50	600
Switching time (μs)	10–25	0.3–0.5	1–4

Imagen 57: Datos clave para los principales tipos de interruptores electrónicos utilizados en equipos modernos de electrónica de potencia [48]

MOSFET

El transistor de efecto de campo semiconductor de óxido de metal (MOSFET) se enciende aplicando un voltaje, generalmente entre 5 y 10 V, a la compuerta. Cuando está en posición 'on' al aplicar una tensión en la puerta (g), la resistencia entre el drenaje (d) y la fuente (s) es muy baja y circula la corriente. La potencia requerida en la puerta para garantizar una resistencia muy baja entre el drenaje y la fuente, es muy pequeña, ya que la corriente en la puerta es baja. Sin embargo, la puerta tiene una capacitancia considerable, por lo que normalmente se usan circuitos de accionamiento especiales que consumen un poco más. Los MOSFET son ampliamente utilizados en sistemas de baja tensión de potencia inferior a aproximadamente 1 kW para amplificar o conmutar señales electrónicas, con tiempos de conmutación entre los 0.3 y 0.5 microsegundos.

IGBT

El transistor bipolar de puerta aislada (IGBT) es esencialmente un circuito integrado que combina un transistor bipolar convencional y un MOSFET, y tiene las ventajas de ambos. El IGBT requiere un voltaje bastante bajo, con una corriente insignificante en la puerta para encenderse. El flujo de corriente principal es desde el colector hasta el emisor, y este camino tiene las características de una unión p-n. Esto significa que la tensión no sube mucho por encima de 0,6 V para todas las corrientes. Esto lo convierte en la opción preferida para los sistemas en los que la corriente es mayor que aproximadamente 50 A. Los tiempos de conmutación son más largos en comparación con el MOSFET, como se muestra en la Imagen 57, y esto es una desventaja en los sistemas de menor potencia. Sin embargo, el IGBT es ahora casi universalmente el interruptor electrónico de elección en sistemas desde 1 kW hasta varios cientos de kilovatios, con el límite "superior" aumentando cada año.

Tiristores

El tiristor ha sido el interruptor electrónico más comúnmente utilizado en la electrónica de potencia. A diferencia del MOSFET y el IGBT, el tiristor solo puede usarse como un interruptor electrónico, no tiene otras aplicaciones. La transición del estado de bloqueo al de conducción se desencadena por un pulso de corriente en la puerta. El dispositivo entonces permanece en el estado de conducción hasta que la corriente que circula a través de él cae a cero. Esta característica lo hace particularmente útil en circuitos para rectificar corriente alterna, donde todavía se usa ampliamente. A pesar de que la conmutación se logra con solo un pulso de corriente, la energía necesaria para efectuar la conmutación es mucho mayor que para el MOSFET o el IGBT. Además, los tiempos de conmutación son marcadamente más largos. La única ventaja del tiristor para la conmutación de corriente continua, es que se pueden conmutar corrientes y voltajes más altos. [49]

Reguladores reductores de tensión

Una vez vistos los principales componentes de los circuitos electrónicos de control y sus diferentes ventajas, pasamos a cómo pueden usarse para diferentes propósitos y comenzamos por los más simples, con los reguladores reductores de tensión.

El esquema de un regulador reductor de tensión más simple se muestra en la imagen 3. Los componentes esenciales son un interruptor electrónico (transistor) con su circuito de accionamiento asociado, un diodo y una bobina. En la Imagen 58a, el interruptor está encendido y la corriente fluye a través de la bobina y la carga. La bobina produce una fuerza electromotriz, haciendo que la corriente aumente gradualmente. El interruptor se apaga. La energía almacenada en la bobina mantiene la corriente circulando a través de la carga, usando el diodo, como se muestra en la Imagen 58b. Como resultado de la conmutación del transistor que aplica y retira la tensión de la fuente, se produce una variación de la tensión de la carga que se mantiene bastante constante pero presenta un ligero rizado ya que depende de en qué estado se encuentre el transistor y del tiempo que está activado cada estado.

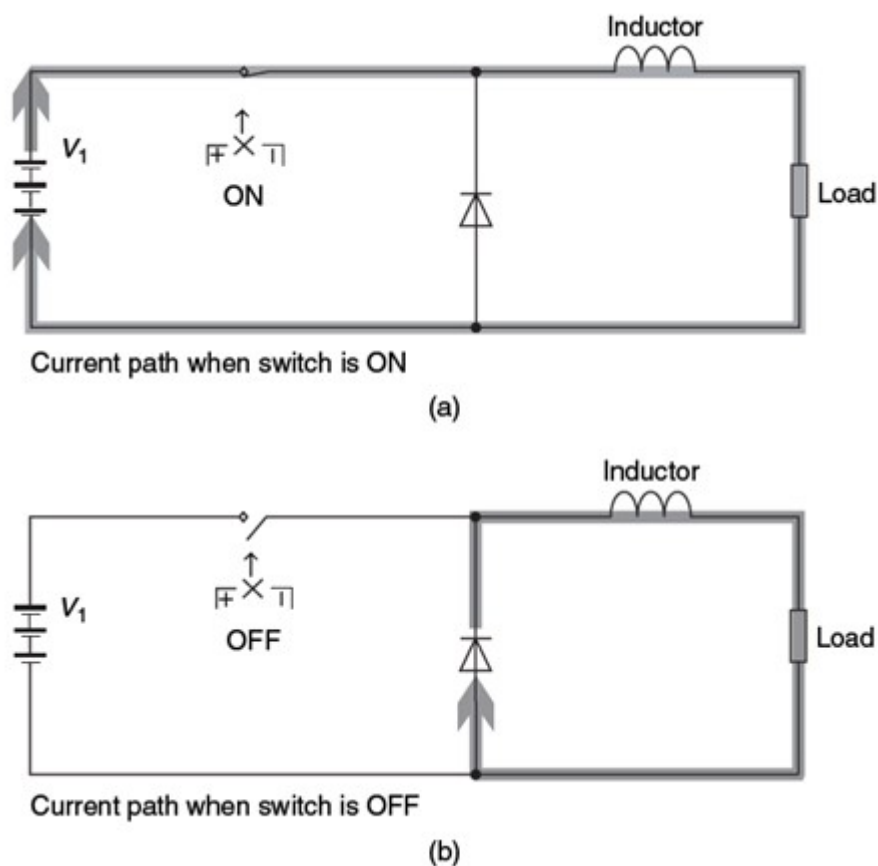


Imagen 58: Diagrama de circuito que muestra el funcionamiento de un regulador reductor de tensión [50]

Por tanto, si V_1 es la tensión de alimentación, y los tiempos de "encendido" y "apagado" para el interruptor electrónico son t_{ON} y t_{OFF} , entonces se puede demostrar que la tensión de salida V_2 viene dada por:

$$V_2 = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} V_1$$

Con lo que podemos ver que la tensión de salida siempre será menor que la de alimentación, esto significa que con este simple circuito y ajustando correctamente los tiempos de conmutación del transistor podemos conseguir la tensión que queramos, siempre que sea inferior a la de alimentación.

Como hemos dicho, el rizado de la tensión depende del tiempo que está activado cada estado del transistor, es decir de la frecuencia de conmutación del mismo: a mayor frecuencia, menor rizado. Sin embargo, cada encendido y apagado implica la pérdida de una cantidad pequeña de energía, por lo que la frecuencia no debería de ser demasiado alta, para no tener grandes pérdidas. Por tanto se necesita un circuito de control para ajustar t_{ON} para alcanzar el voltaje de salida deseado con la calidad suficiente y con un rendimiento elevado. En la actualidad, la eficiencia de dichos reguladores reductores supera el 90%. En sistemas de alto voltaje, alrededor de 100 V o más, es posible lograr eficiencias de hasta el 98%.

Otro ejemplo de regulador reductor de tensión es el circuito regulador "lineal", que también usa un transistor, pero esta vez no se enciende o apaga completamente. Al contrario, la tensión de la compuerta se ajusta de modo que su resistencia esté en el valor correcto para reducir la tensión al valor deseado. Esta resistencia variará continuamente, dependiendo de la corriente de carga y la tensión de alimentación. Este tipo de circuito se usa ampliamente en sistemas electrónicos pequeños, pero nunca se debe usar con motores de tracción. El voltaje se elimina simplemente convirtiendo la tensión sobrante en calor, por eso los reguladores lineales no tienen cabida en sistemas donde la eficiencia es primordial, como un vehículo eléctrico. [51]

Reguladores elevadores de tensión

Otro sistema a menudo necesario, es el regulador elevador de tensión, que como indica su nombre se utiliza para elevar la tensión a partir de una de alimentación, este sistema es muy útil para alimentar a muchos componentes electrónicos del coche eléctrico que necesitan una tensión diferente a la que suministran las baterías, siendo el frenado regenerativo solo un ejemplo. Esto también se puede hacer de manera simple y eficiente usando circuitos de conmutación como vemos en la Imagen 59.

En la Imagen 59a, el interruptor está encendido y se está acumulando una corriente eléctrica en la bobina. La carga es suministrada por la descarga del condensador. El diodo evita que la corriente del condensador circule hacia atrás, a través del interruptor. En la Imagen 59b, el interruptor está apagado. El voltaje de la bobina aumenta bruscamente, porque la corriente está cayendo. Tan pronto como la tensión se eleve por encima de la del condensador (alrededor de 0,6 V para el diodo), la corriente circulará a través del diodo y cargará el condensador y circulará a través de la carga. Esto continuará mientras haya energía en la bobina. El interruptor se cierra nuevamente, como en la Imagen 59a, y la bobina se reactiva mientras el condensador suministra la carga.

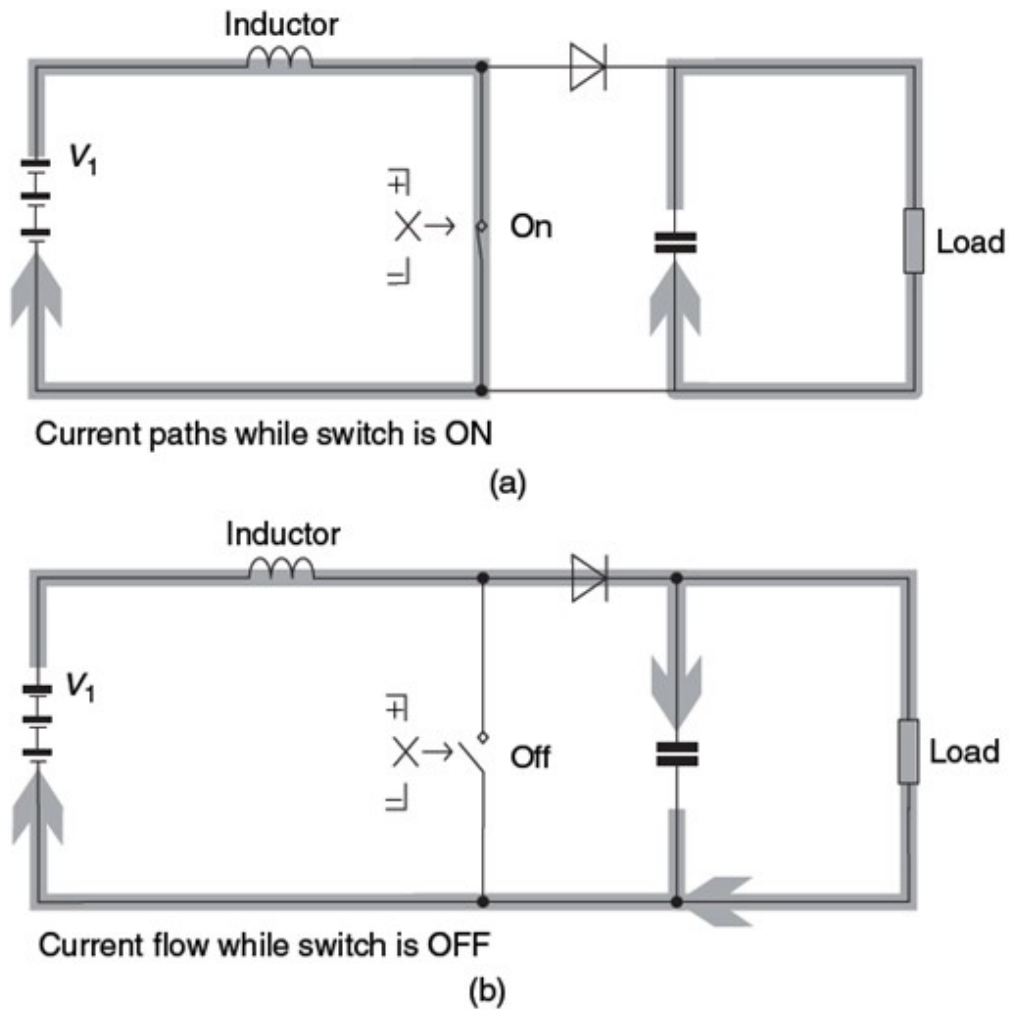


Imagen 59: Diagrama de circuito para mostrar el funcionamiento de un regulador elevador de tensión [52]

Se puede demostrar que para un convertidor ideal sin pérdidas, la tensión de salida se puede expresar en función de la tensión de alimentación y del tiempo de conmutación de cada uno de los estados del transistor, de la siguiente manera:

$$V_2 = \frac{t_{ON} + t_{OFF}}{t_{OFF}} V_1$$

Se puede observar que cuanto mayor sea el tiempo que el transistor está en el modo de conducción, mayores serán las tensiones de salida, con lo que, al igual que en el regulador reductor, con este simple circuito y ajustando correctamente los tiempos de conmutación del transistor podemos conseguir la tensión que queramos, siempre que sea superior a la de alimentación.

En la práctica, el voltaje de salida es algo menor que esto, debido a las pérdidas. Las pérdidas en este circuito provienen de las mismas fuentes que para el regulador reductor. Sin embargo, debido a que las corrientes a través de la bobina y el interruptor son más altas que la corriente de salida, las pérdidas son mayores. Además, toda la carga pasa a través del diodo esta vez, por lo que está sujeta a la caída de 0.6V y por lo tanto a la pérdida de energía. El resultado es que la eficiencia de estos reguladores de impulso es algo menor que la del regulador reductor. Sin embargo, normalmente debería obtenerse más del 80%, y en los sistemas donde la tensión inicial es más alta (más de 100 V), es posible lograr eficiencias del 95% o más.

Estos circuitos de transistores o reguladores elevadores y reductores se denominan convertidores CC / CC. Las unidades completas, listas y empaquetadas de forma resistente, están disponibles como unidades "listas para usar" en una amplia gama de potencias y voltajes de entrada y salida. Sin embargo, cuando se usan como circuitos de controlador de motor, como en el caso de los vehículos eléctricos, los requisitos de tener que producir una tensión variable o una tensión de salida fija para una tensión de entrada variable (como en el caso de frenado de un motor con regeneración), entonces tales unidades estandarizadas a menudo no serán adecuadas. En tales casos, se deben diseñar circuitos especiales, y la mayoría de los motores se pueden suministrar con controladores adecuados. Como hemos visto, los circuitos requeridos son, en principio, bastante simples. La clave es controlar adecuadamente la conmutación de los interruptores electrónicos, lo cual, generalmente es proporcionado por un microprocesador. [53]

Inversores

Otro componente electrónico fundamental en cualquier sistema de control, es el inversor, es el circuito que produce corriente alterna (CA) a partir de fuentes de corriente continua (CC), como baterías y pilas de combustible, su función es transformar una tensión constante en una tensión oscilante con una forma de onda sinusoidal periódica. Este elemento se usará en el caso de montar motores que no sean de alimentación por corriente continua, lo que implica la utilización del inversor para transformar la corriente continua que proporcionan las baterías, en corriente alterna que consume el motor de tracción.

La disposición de los componentes clave de un inversor monofásico se muestra en la Imagen 60. Hay cuatro interruptores electrónicos, etiquetados A, B, C y D, conectados en lo que se llama un 'puente-H'. A través de cada interruptor hay un diodo, cuyo propósito se aclarará más tarde. La carga a través de la cual se debe conducir la corriente alterna está representada por una resistencia y un inductor.

La operación básica del inversor es bastante simple. Los primeros interruptores A y D están encendidos, y una corriente fluye hacia la derecha a través de la carga. Estos dos interruptores se desactivan, en este punto vemos la necesidad de los diodos. La carga probablemente tendrá algo de inductancia, por lo que la corriente no podrá detenerse inmediatamente, sino que continuará fluyendo en la misma dirección, a través de los diodos y a través de los interruptores B y C, de regreso al suministro. Los interruptores B y C se encienden y una corriente fluye en la dirección opuesta, hacia la izquierda. Cuando estos interruptores se apagan, la corriente remanente pasa a través de los diodos en paralelo con los interruptores A y D.

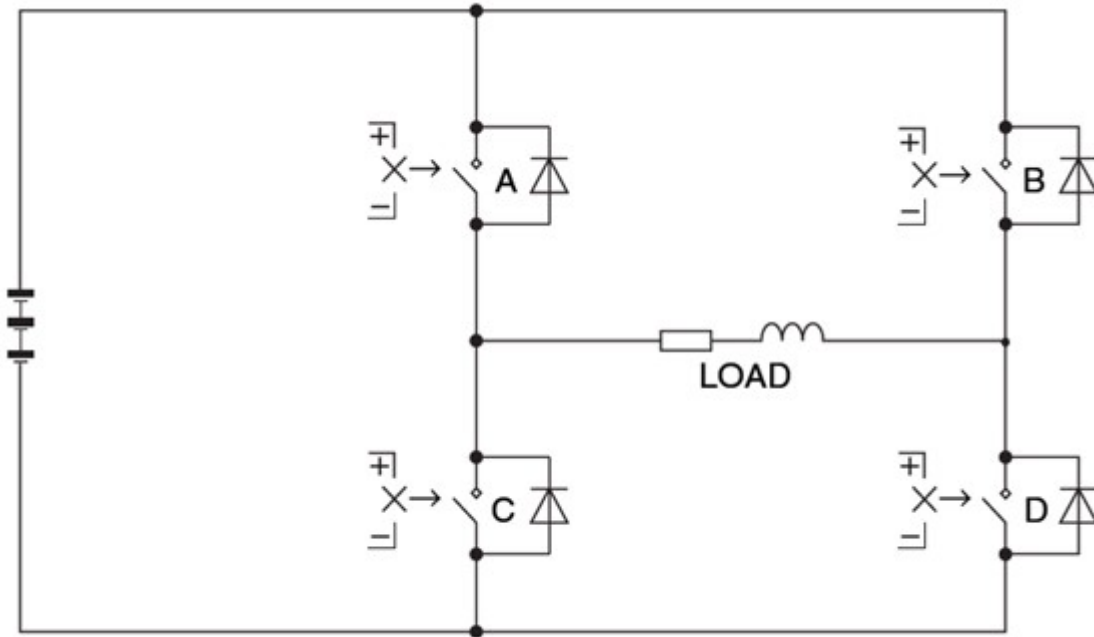


Imagen 60: Circuito inversor puente-H para producir corriente alterna monofásica [54]

La tensión resultante en la carga es alterna, pero no sinusoidal. La diferencia entre una onda sinusoidal pura y cualquier otra forma de onda se expresa con la idea de "armónicos". Estas son oscilaciones sinusoidales de voltaje o corriente cuya frecuencia, f_v , es un múltiplo entero de la frecuencia de oscilación fundamental. Se puede demostrar que cualquier forma de onda periódica de cualquier forma puede representarse mediante la adición de armónicos a una onda sinusoidal fundamental. El proceso de encontrar estos armónicos se conoce como análisis de Fourier. Entonces, la diferencia entre una forma de onda de voltaje o corriente y una onda sinusoidal pura puede expresarse en términos de armónicos de frecuencia más altos impuestos a la frecuencia fundamental.

En equipos conectados a la red, estos armónicos pueden causar una amplia gama de problemas, pero esa no es nuestra preocupación aquí. Con los motores, el principal problema es que los armónicos pueden aumentar las pérdidas en el hierro, estas pérdidas en el hierro son proporcionales a la frecuencia del cambio del campo magnético. Si nuestra corriente alterna se usa para producir un campo magnético cambiante (que casi siempre será así), entonces la velocidad real de cambio, y por lo tanto las pérdidas, se incrementará notablemente por estas frecuencias armónicas más altas. Por eso queremos una onda lo más semejante posible a una sinusoidal pura. La forma precisa de la forma de onda también dependerá de la naturaleza (resistencia, inductancia, capacitancia) de la carga.

La mayoría de los motores grandes, del tipo utilizado en vehículos eléctricos, tienen tres juegos de bobinas, con lo que para estos sistemas, al igual que para los sistemas de alimentación normales, se necesita un suministro de corriente alterna trifásica (inversor trifásico). [55]

Convertidores de frecuencia

Los convertidores o variadores de frecuencia es un dispositivo que tiene como misión cambiar la frecuencia de una corriente alterna, esto se consigue transformando la corriente alterna de entrada en continua, y a continuación pasándola a alterna otra vez con la frecuencia deseada, este dispositivo integra un rectificador y un inversores, que hacen funciones opuestas. Pero el principal problema de estos dispositivos, se encuentra en controlar la tensión de salida. Para ello se pueden usar principalmente dos procesos diferentes, que a continuación explicaremos detalladamente:

Proceso PAM

Este primer proceso se denomina PAM (Modulación por Amplitud de Pulsos), y consta de una primera parte de entrada con un puente de diodos rectificador controlado por tiristores, para pasar de corriente alterna a continua, que hace que en el circuito intermedio, de corriente continua, la variación del voltaje de esta corriente se pueda ajustar en función del tiempo de disparo de los tiristores, lo que se traduce un poder controlar la tensión en valor eficaz en la salida del inversor, que está formado por transistores de salida, y esta ya es la última etapa, donde se convierte la corriente continua en alterna, donde mediante estos transistores y dando a cada uno el tiempo de duración apropiado, generamos la frecuencia de salida deseada.

Pero la principal desventaja de este método, es la cantidad de potencia reactiva que genera, debido a que se varía el factor de potencia en la entrada del puente rectificador. [56]

Proceso PWM

Este segundo método se le conoce como PWM (Modulación por Anchura de Pulsos), donde la etapa de entrada de la red se basa en un rectificador no controlado, con lo consiguiente mejora del factor de potencia. El circuito de la etapa de continua, opera siempre a tensión constante, y donde se produce el control, es a la salida del inversor, de forma que, la tensión y la frecuencia varían proporcionalmente y a la vez, en los transistores de salida de este inversor (normalmente del tipo IGBT). Esto se consigue usando impulsos y efectuando una modulación entre una señal sinusoidal y otra triangular. La amplitud de la señal sinusoidal nos determina el valor eficaz del voltaje y la frecuencia de salida. La frecuencia de la señal triangular es variable, puede tener desde unos pocos kHz hasta 15 kHz, y es la encargada de determinar el número de conmutaciones por segundo de los transistores de salida.

Este sistema tiene una respuesta dinámica bastante buena, ya que el proceso de control de frecuencia y voltaje es realizado por el mismo elemento, y suele ser el sistema más habitual para un control de motores de corriente alterna sencillo. [56]

Anejo 2: Principios de funcionamiento de las principales máquinas eléctricas

En este anejo se pretende explicar los principios de funcionamiento de cada máquina comentada en este documento, de forma que sirva de base para las conclusiones que se llegan en el mismo.

Motor de corriente continua con escobillas

Los motores de corriente continua con escobillas es una tecnología muy madura y se conocen bien todas sus características de operación, su principio de funcionamiento es bastante simple, se trata de un campo magnético fijo en el estator, que puede ser creado por imanes permanentes o por bobinas arrolladas sobre un circuito magnético, pero lo más utilizado son las bobinas, ya que con este sistema se puede controlar la intensidad del campo producido y con ello tener un mejor control del motor. Interactuando con este campo fijo producido por el estator, hay una serie de bobinas arrolladas sobre rotor, independientes entre sí (normalmente suelen tener 1, 2 o 3 pares de polos) i conectadas todas ellas al llamado colector de delgas, donde mediante unas escobillas hechas de grafito, alimentan las bobinas de tal forma que mientras el rotor gira, esta serie de espiras crea un campo magnético fijo y perpendicular al campo del estator para aprovechar la máxima fuerza electromotriz, por tanto este tipo de motor tiene dos circuitos que alimentar, el del campo que crea el estator (inductor), y el de las espiras del rotor o también llamado inducido, que se alimenta a través de las escobillas que rozan con el colector de delgas. [57]

Motor de corriente continua sin escobillas

Los motores de corriente continua sin escobillas son máquinas, que utilizan un principio de funcionamiento bastante parecido al anterior, pero están diseñados de diferente forma. Ahora, en vez de tener el campo magnético fijo en el estator, lo tenemos en el rotor, y lo creamos con un imán permanente y luego en el estator tenemos un conjunto de bobinas donde se realiza la conmutación de forma electrónica, de hecho este motor se considera muchas veces como una máquina síncrona alimentada mediante convertidor, ya que como explicaremos más adelante, sigue el mismo principio de funcionamiento. Por tanto, alimentando secuencialmente una de las fases del estator de forma sincronizada con el movimiento del rotor, se consigue un par, con la posibilidad de controlar la velocidad del rotor tan solo con el dispositivo electrónico, cambiando el tiempo de conmutación.

Motor de inducción

Los motores de inducción o asíncronos, son motores alimentados por corriente alterna trifásica, lo que ya indica que para la aplicación del vehículo eléctrico, hará falta un inversor para transformar la corriente continua que suministran las baterías en corriente alterna. Con dicha corriente alterna se alimenta las bobinas que están arrolladas en el estator, de tal manera que la corriente alterna trifásica consigue generar un campo magnético giratorio, que dependerá de la frecuencia a la que sea alimentado y del tipo de arrollamiento, es decir del número de pares de polos. En cuanto al rotor, puede ser de dos tipos principalmente, de jaula de ardilla o bobinado. El de jaula de ardilla es el más usado, ya que le confiere esa robustez y bajo coste característico, debido a que está formado por unas barras conductoras paralelas, cortocircuitadas mediante coronas circulares, también conductoras, con este tipo de rotor no se puede controlar ningún parámetro eléctrico de él. En cuanto al rotor bobinado, suele tener un devanado trifásico cuyas

fases se conectan al exterior mediante un colector de tres anillos, sobre los que rozan sus correspondientes escobillas, este sistema necesita un mantenimiento mayor y tiene un menor fiabilidad debido a las partes mecánicas de rozamiento y su coste es bastante más elevado que el de jaula de ardilla, todo esto a cambio de tener accesible el devanado del rotor. [58]

El principio de funcionamiento se explicará detalladamente para la opción con rotor de jaula de ardilla, ya que es el más típico. Como hemos comentado ya, el estator produce un campo magnético giratorio con la corriente trifásica alterna, al mismo tiempo, el rotor con la estructura de barras cortocircuitadas, como efecto del movimiento del campo, aparecerá una tensión inducida sobre cada barra del rotor, lo que producirá una corriente sobre cada barra. Estas corrientes dependerán de su posición respecto a la resultante del campo giratorio, variando su intensidad y sentido, de forma que se cierran por las coronas anterior y posterior de los extremos del rotor. Como consecuencia del paso de corriente por las barras y por encontrarse las mismas en un campo magnético, aparecerá una fuerza sobre cada una de las barras, esta fuerza es la que da lugar al par que hace girar al rotor en la misma dirección de giro que el campo del estator.

Las corrientes inducidas en las barras del rotor, producen también un campo magnético, que se distribuye de la misma forma que el campo del estator, pero ambos campos están desfasados 90° eléctricos, siendo el del rotor el retrasado, pero tanto el campo magnético del rotor como el del estator se mueven a la misma velocidad, la de sincronismo. En otras palabras, el campo creado por el rotor, “persigue” al campo magnético del estator, siempre a la misma velocidad, manteniendo el desfase. En cuanto al efecto de inducción del estator al rotor, el rotor no puede girar, por la acción del estator, a la velocidad de sincronismo, porque eso significaría que, sobre las barras que constituyen el rotor no habría variación de flujo magnético y, en consecuencia, tampoco habría corrientes inducidas ni campo magnético en el rotor, y por tanto no aparecería par electromagnético que mantuviese el rotor a esa velocidad. Por consiguiente, el rotor girará siempre a una velocidad inferior a la de sincronismo. [59]

Lo que ocurre es que el rotor queda “deslizado” respecto del campo del estator, y esta diferencia de velocidades se caracteriza con un parámetro llamado deslizamiento, que se define como la variación relativa de la velocidad del motor respecto de la de sincronismo, no tiene unidades y se suele expresar en porcentaje. Cuando el motor funciona en vacío, el valor del deslizamiento es aproximadamente cero, es decir, la velocidad es muy próxima a la de sincronismo. A medida que se carga el motor, la velocidad disminuye y, por tanto, el deslizamiento aumenta, tomando valores que normalmente se encuentran entre 0.02 y 0.06.

Motor síncrono

Los motores síncronos tienen principalmente dos variantes constructivas, ambas necesitan ser alimentados por corriente alterna y su principio de funcionamiento es muy parecido al de los motores asíncronos, donde dicha corriente alterna trifásica se utiliza para alimentar las bobinas del estator que crea un campo magnético giratorio, que interacciona con el campo creado por el rotor, que es el elemento diferenciador de las dos variantes, una está creado por bobinas arrolladas en el rotor que se alimentan de corriente continua mediante escobillas, y en la otra versión, el campo del rotor está creado por imanes permanentes que están colocados en el

rotor de forma que dichos imanes se ven arrastrados por el campo giratorio, generando un par mecánico como resultado de la interacción de los dos campos.

La principal característica de este motor es la de que el rotor siempre gira a la misma velocidad, la de sincronismo, independientemente del par requerido. Lo que lo hace ideal para aplicaciones donde se requiera una velocidad de giro constante con variación de carga.

Motor de reluctancia variable

Los motores de reluctancia variable son motores de corriente continua y aunque la idea original data de 1814, se consideran motores que aún están en su fase de desarrollo, ya que durante estos últimos años, con el avance de la electrónica de potencia, ha despertado el interés de muchos sectores utilizándose cada vez en más aplicaciones. Su principio de funcionamiento es bastante simple, como su nombre indica es de reluctancia variable, y la reluctancia de un material se puede definir como la resistencia que tiene el material al paso de un flujo magnético cuando es influenciado por un campo magnético, es decir, cuanto mayor sea la reluctancia de un material, mayor tendrá que ser el campo magnético para establecer un flujo a través de él.

Por tanto se construye el rotor con polos salientes de un material de baja reluctancia, como el hierro dulce con bajo contenido en carbono, y un estator también de polos salientes en los cuales van arrolladas las diferentes espiras de diferentes fases, de tal manera que los dientes opuestos son siempre la misma fase, para que cuando se alimente dicha fase con corriente continua, produzca un campo, y debido a que el rotor tiene menor reluctancia que el aire se moverá de tal forma que sus extremos queden lo más cerca posible de los polos del estator alimentados. Para conseguir un movimiento continuo, las bobinas del estator se alimentan regular y secuencialmente, y para suavizar el movimiento el rotor siempre tiene menos polos que el estator, las distintas combinaciones de la relación entre los polos del estator y los del rotor, son bastante limitadas, las más comunes son 4:6 y 6:8 donde el estator tendrá tres fases y cuatro, respectivamente. En la Imagen 61 se muestra la estructura de que tendría dicho motor con la configuración de polos 6:8 con cuatro fases. También comentar que cuantos más polos, más suave será el movimiento del rotor y mayor eficiencia se podrá conseguir.

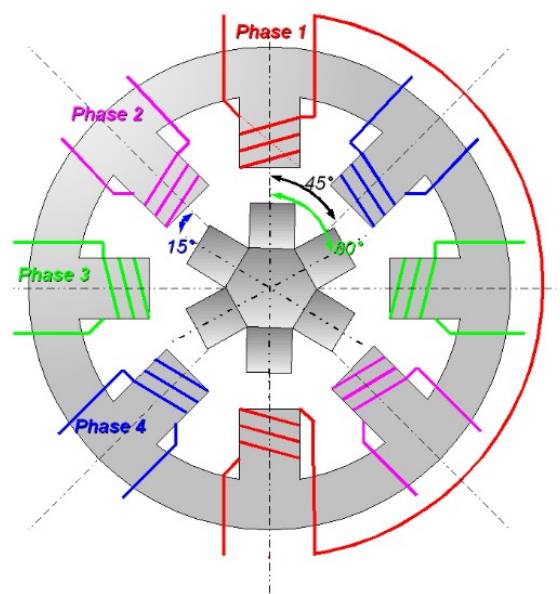


Imagen 61: Esquema de un motor de reluctancia variable [60]

BIBLIOGRAFÍA

- [1] EUROBAT, ACEA, JAMA, KAMA, ILA, «A review of battery technologies for automotive applications,» 2014, p. 7.
- [2] P. Ibañez, «Motorpasion,» 15 Agosto 2012. [En línea]. Available: <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/tipos-de-conectores-tipos-de-recarga-y-modos-de-carga>. [Último acceso: 26 Abril 2018].
- [3] P. P. A. K. A. T. G. MARTIN WIETSCHER, «MARKET EVOLUTION SCENARIOS FOR ELECTRIC VEHICLES,» 2013, pp. 4-27.
- [4] K. T. Chau, «Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application,» 2015, pp. 2-5.
- [5] reve, «Revista eólica y del vehículo eléctrico,» 15 Marzo 2010. [En línea]. Available: <https://www.evwind.com/2010/03/15/analisis-energetico-y-economico-del-vehiculo-electrico/>. [Último acceso: 27 Abril 2018].
- [6] IDAE, «IDAE,» 16 Diciembre 2017. [En línea]. Available: <http://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-movilidad-y-vehiculos/plan-moavlt-vehiculos>. [Último acceso: 2018 Abril 2018].
- [7] REE, «Red Eléctrica de España,» 1 Abril 2014. [En línea]. Available: <http://www.ree.es/es/actividades/operacion-del-sistema-electrico/precio-voluntario-pequeno-consumidor-pvpc>. [Último acceso: 27 Abril 2018].
- [8] M. d. e. t. y. a. digital, «Ministerio de energía turismo y agenda digital,» 15 Diciembre 2017. [En línea]. Available: <http://www.minetad.gob.es/es-ES/GabinetePrensa/NotasPrensa/2017/Paginas/gestor-carga-20171115.aspx>. [Último acceso: 27 Abril 2017].
- [9] EUROBAT, ACEA, JAMA, KAMA, ILA, «A review of battery technologies for automotive applications,» 2014, pp. 12-16.
- [10] EUROBAT, ACEA, JAMA, KAMA, ILA, «A review of battery technologies for automotive applications,» 2014, pp. 16-19.
- [11] EUROBAT, ACEA, JAMA, KAMA, ILA, «A review of battery technologies for automotive applications,» 2014, pp. 19-22.
- [12] EUROBAT, ACEA, JAMA, KAMA, ILA, «A review of battery technologies for automotive applications,» 2014, p. 23.
- [13] EUROBAT, ACEA, JAMA, KAMA, ILA, «A review of battery technologies for automotive

- applications,» 2014, pp. 42-50.
- [14] J. L. a. J. Lowry, «Electric Vehicle Technology Explained,» 2012, p. 159.
- [15] K. W. E. C. a. N. C. C. X. D. Xue, «Selection of Electric Motor Drives,» 2009, p. 1.
- [16] K. W. E. C. a. N. C. C. X. D. Xue, «Selection of Electric Motor Drives,» 2009, pp. 1-2.
- [17] K. W. E. C. a. N. C. C. X. D. Xue, «Selection of Electric Motor Drives,» 2009, p. 3.
- [18] H. Laitinen, «Improving electric vehicle energy efficiency with two-speed gearbox,» pp. 11-16, 2017.
- [19] K. W. E. C. a. N. C. C. X. D. Xue, «Selection of Electric Motor Drives,» 2009, p. 4.
- [20] R. S. Navarro, «Máquinas eléctricas,» de *Máquinas eléctricas*, McGRAW-HILL, 1993, pp. 187-222.
- [21] S. Keeping, «Digikey,» 27 Marzo 2013. [En línea]. Available: <https://www.digikey.es/es/articles/techzone/2013/mar/an-introduction-to-brushless-dc-motor-control>. [Último acceso: 17 05 2018].
- [22] J. R. A. y. M. L. Pastor, «La tecnología de los motores eléctricos en vehículos,» p. 18, 2010.
- [23] K. W. E. C. a. N. C. C. X. D. Xue, «Selection of Electric Motors Drives for Electric Vehicles,» 2009, pp. 4 -5.
- [24] M. B. D. D. Mounir Zeraoulia, «Electric motor drive selection issues for HEV propulsion,» p. 4, 2010.
- [25] M. B. D. D. Mounir Zeraoulia, «Electric motor drive selection issues for HEV propulsion,» p. 6, 2010.
- [26] K. W. E. C. a. N. C. C. X. D. Xue, «Selection of Electric Motor Drives,» 2009, p. 5.
- [27] A. H. a. W. Drury, «Electric Motors and Drives,» 2013, pp. 281-293.
- [28] J. R. A. y. M. L. Pastor, «La tecnología de los motores,» p. 16, 2010.
- [29] M. B. D. D. Mounir Zeraoulia, «Electric motor drive selection issues for HEV propulsion,» p. 7, 2010.
- [30] A. D. A. a. E. A. Mohammad Mahdi Bouiabady, «Switched Reluctance Motor Topologies: A Comprehensive Review,» pp. 1-22, 2017.
- [31] P. Ibañez, «Xataka,» 16 Diciembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/automovil/guia-de-compras-de-coches-electricos-2017-43->

- modelos-que-estan-o-estaran-en-el-mercado. [Último acceso: 17 Mayo 2018].
- [32] P. Ibañez, «Xataka,» 23 Abril 2018. [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/automovil/los-13-coches-electricos-con-mas-autonomia-del-mercado-en-2018>. [Último acceso: 17 Mayo 2018].
- [33] Electrocoches, 2 Febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.electrocoches.eu/>. [Último acceso: 19 Mayo 2018].
- [34] k. 77, 12 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://www.km77.com/>. [Último acceso: 19 Mayo 2018].
- [35] Wikipedia, «Wikipedia,» 18 Enero 2018. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_X. [Último acceso: 19 Mayo 2018].
- [36] BMW, «BMW,» 13 Marzo 2018. [En línea]. Available: <https://www.bmw.es/es/coches-bmw/bmw-i/i3/2017/presentacion.html>. [Último acceso: 19 Mayo 2018].
- [37] Tesla, «Tesla,» 22 Febrero 2018. [En línea]. Available: https://www.tesla.com/es_ES/model3. [Último acceso: 19 Mayo 2018].
- [38] Renault, «Renault,» 13 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://www.renault.es/gama-renault/gama-vehiculos-electricos/zoe/renault-zoe/>. [Último acceso: 19 Mayo 2018].
- [39] Nissan, «Nissan,» 19 Diciembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.nissan.es/vehiculos/nuevos-vehiculos/leaf.html>. [Último acceso: 19 Mayo 2018].
- [40] Hyundai, «Hyundai,» 2 Marzo 2018. [En línea]. Available: <http://www.hyundai.com/es/es/Showroom/Cars/ioniqelectrico/PIP/index.html>. [Último acceso: 19 Mayo 2018].
- [41] Citroen, «Citroen,» 3 Abril 2018. [En línea]. Available: <http://www.citroen.es/vehiculos/vehiculos-electricos/c-zero.html>. [Último acceso: 19 Mayo 2018].
- [42] e. c. c. A. y. A. IDAE, «Guía de Vehículos Turismo de venta en España, con indicación de consumos y emisiones de CO2,» 2017.
- [43] R. E. d. España, «ESIOS,» 19 Mayo 2018. [En línea]. Available: https://www.esios.ree.es/es/analisis/10256?vis=2&start_date=04-04-2018T00%3A00&end_date=13-05-2018T23%3A00&compare_start_date=03-04-2018T00%3A00&groupby=hour. [Último acceso: 19 Mayo 2018].
- [44] International Energy Agency, «Electricity information,» 2017.

- [45] M. d. E. T. y. a. digital, «Geoportal,» 13 Mayo 2018. [En línea]. Available: <http://geoportalgasolineras.es/#/Inicio>. [Último acceso: 13 Mayo 2018].
- [46] M. d. E. T. y. a. digital, «Ministerio de Energía Turismo y agenda digital,» 14 Enero 2016. [En línea]. Available: http://www.minetad.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros%20documentos/Factores_emision_CO2.pdf. [Último acceso: 19 Mayo 2018].
- [47] H. Laitinen, «Improving electric vehicle energy efficiency with two-speed gearbox,» p. 16, 2017.
- [48] J. L. a. J. Lowry, «Electric Vehicle Technology Explained,» 2012, p. 160.
- [49] J. L. a. J. Lowry, «Electric Vehicle Technology Explained,» 2012, pp. 160-161.
- [50] J. L. a. J. Lowry, «Electric Vehicle Technology Explained,» 2012, p. 162.
- [51] J. L. a. J. Lowry, «Electric Vehicle Technology Explained,» 2012, pp. 161-162.
- [52] J. L. a. J. Lowry, «Electric Vehicle Technology Explained,» 2012, p. 164.
- [53] J. L. a. J. Lowry, «Electric Vehicle Technology Explained,» 2012, pp. 162-165.
- [54] J. L. a. J. Lowry, «Electric Vehicle Technology Explained,» 2012, p. 166.
- [55] J. L. a. J. Lowry, «Electric Vehicle Technology Explained,» 2012, pp. 165-168.
- [56] M. moderna, «Mecánica moderna,» 23 Mayo 2017. [En línea]. Available: https://mecmod.com/es/blog/30_principales-tipos-convertidores-frecuencia.html. [Último acceso: 21 Junio 2018].
- [57] A. H. a. W. Drury, «Electric Motors and Drives,» 2013, pp. 73-99.
- [58] Wikipedia, «Wikipedia,» 4 Abril 2018. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_as%C3%ADncrono. [Último acceso: 17 Mayo 2018].
- [59] R. S. Navarro, «Máquinas eléctricas,» de *Máquinas eléctricas*, 1993, pp. 243-270.
- [60] Wikipedia, «Wikipedia,» 29 Marzo 2018. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_reluctancia_variable#/media/File:Moteur_pas_%C3%A0_pas_MRV.png. [Último acceso: 15 Abril 2018].
- [61] K. W. E. C. a. N. C. C. X. D. Xue, «Selection of Electric Motor Drives,» 2009, pp. 3-4.
- [62] K. W. E. C. a. N. C. C. X. D. Xue, «Selection of Electric Motor Drives,» 2009, p. 4.

- [63] K. W. E. C. a. N. C. C. X. D. Xue, «Selection of Electric Motor Drives,» 2009, pp. 4-5.
- [64] S. Erazo, «Youtube,» 21 Marzo 2013. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=zY8QnLOzqW0&t=900s>. [Último acceso: 15 Mayo 2018].
- [65] R. E. d. España, «Esios,» Red Eléctrica de España, 12 Febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.esios.ree.es/es/generacion-y-consumo?date=12-02-2018>. [Último acceso: 26 Junio 2018].
- [66] ACEA, «WLTP facts,» ACEA, 8 Enero 2018. [En línea]. Available: <http://wltpfacts.eu/from-nedc-to-wltp-change/>. [Último acceso: 22 Junio 2018].

