



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Eléctrica

Los Motores de la Movilidad Eléctrica

Autor:

Borrego Feo, David

Tutor:

Alonso Ripoll, Francisco Javier

Departamento:

Ingeniería Eléctrica

Valladolid, Junio 2021.



Agradecimientos

A mis padres por apoyarme durante los años de la universidad, ayudándome a conseguir mis objetivos de futuro.

A mis compañeros de clase Javier y Andrea los cuales intentan ayudar a resolver siempre cualquier duda, problema o preocupación que me pueda surgir.

A todos los profesores que en estos años me han enseñado todo lo que debo saber para poder llegar a ser un buen ingeniero, en especial a mi tutor Francisco Javier Alonso Ripoll, el cual siempre está dispuesto a enseñar a sus alumnos con una buena actitud y una gran dedicación.



Resumen

Realizaremos una recopilación de los distintos tipos de motores dando características, clasificándolos en sus diferentes tipos y explicando sus diferentes métodos de control.

Daremos ejemplos de su uso a día de hoy en vehículos o soluciones a la movilidad, incluyendo desde tipos de motores clásicos que se han ido mejorando, como motores y diseños en desarrollo que se usaran en muchos vehículos en un futuro no muy lejano.

Palabras clave: Flujo magnético, Imanes permanentes, Bobinados, Estator, Rotor.



Índice

1. Introducción	11
1.1 Objetivos	11
2. Historia de los motores eléctricos en la automoción	12
3. Motores Asíncronos (inducción)	18
3.1 Funcionamiento	18
3.2 Componentes	21
3.2.1 El Estator	21
3.2.2 Rotor de jaula de ardilla	22
3.2.3 Rotor bobinado	24
3.3 Métodos de Control	25
3.3.1 Control Escalar	25
3.3.2 Control Vectorial	27
3.4 Ejemplos de uso del Motor de Inducción en Vehículos Eléctricos	29
3.4.1 Audi e-Tron	29
3.4.2 Tesla Model S	33
4. Motores Síncronos	38
4.1 Funcionamiento	38
4.2 Maquina síncrona de rotor de polos salientes	38
4.3 Maquina síncrona de rotor cilíndrico	39
4.4 Maquina síncrona de rotor con imanes permanentes	40
4.4.1 Métodos de arranque y Control	42
4.4.2 Control Vectorial	44
4.5 Ejemplos de uso del Motor Síncrono en Vehículos Eléctricos	45
4.5.1 Porsche Taycan	45
5. Motores de flujo axial	49
5.1 Características y Funcionamiento	49
5.2 Ejemplo de uso de los motores de flujo axial	52
5.2.1 Ferrari sf90	52
5.2.2 Fabricante Magnax	53



6. Motores de flujo transversal	56
6.1 Funcionamiento	57
6.2 Diseños	57
6.3 Ejemplo de desarrollo del motor de flujo transversal	59
7. Motores de reluctancia variable	63
7.1 Como funcionan	63
7.2 Reluctancia síncrona	64
7.2.1 Diferencias entre el síncrono y el conmutado	65
7.3 Reluctancia conmutada	66
7.4 Reluctancia con imanes permanentes en el rotor	68
7.5 Ejemplos de Reluctancia con Imanes Permanentes	70
7.5.1 Motor para Camiones de Borwarner	70
7.5.2 Bmw i3	72
7.5.3 Tesla Model 3	74
8. Motores lineales	76
8.1 Funcionamiento	76
8.2 Tipos	77
8.3 Ejemplo de uso del Motor Lineal	79
8.3.1 Tren de levitación magnética japonés (Shinkansen)	79
9. Motores de corriente continua	82
9.1 Funcionamiento	82
9.2 Tipos	83
9.2.1. Con arrollamientos	83
9.2.2. Con imanes permanentes	84
9.3 Ejemplo de uso, los patinetes eléctricos	86
10. Comparación de los distintos motores	90
10.1 Rendimiento	90
10.2 Densidad de potencia	92
10.3 Costes	93
11. Conclusiones	95
12. Bibliografía	97
13. Webgrafía	99





Índice de figuras

Figura 1- Electrobat primer vehículo eléctrico	13
Figura 2- Rober Lunar	14
Figura 3- Tesla Roadster	15
Figura 4- Curva característica par-deslizamiento	20
Figura 5- Esquema de Bobinado monofásico concéntrico por polos, de 2 polos con $K = 24$ ranuras.	21
Figura 6- Bobinado en tres dimensiones	22
Figura 7-Motor con rotor de Jaula de Ardilla	23
Figura 8-Rotor Bobinado	24
Figura 9- Escobillas de motor de rotor bobinado	24
Figura 10- Curva Par Velocidad Control Escalar en Motores Asíncronos-----	26
Figura 11- Esquema del Control Escalar	26
Figura 12- Vectores espaciales de corriente en los ejes D y Q de un motor asíncrono	27
Figura 13- Esquema control vectorial de un motor de inducción.-----	28
Figura 14- Vehículo eléctrico del Fabricante Audi	29
Figura 15- Motor del Audi e-tron	30
Figura 16- Corte de un Motor del Audi e-tron	31
Figura 17-Acople de dos Motores del Audi e-tron	31
Figura 18- Plataforma del Audi e-tron	32
Figura 19- Tesla Model S	33
Figura 20- Unidad de propulsión del Tesla Model S	33
Figura 21- Partes del Inversor	34
Figura 22- Inversor listo para ser acoplado	35
Figura 23- Paquete de batería de tesla Model S	35
Figura 24-Celdas de la Batería	35
Figura 25-Sistema de refrigeración de las celdas	36
Figura 26-Generador de Polos salientes	39
Figura 27- Generador de rotor cilíndrico	39



Figura 28-Rotor con imanes Permanentes	40
Figura 29- Imanes Permanentes de Neodimio	41
Figura 30- Esquema control lazo abierto	43
Figura 31- Esquema control lazo cerrado	44
Figura 32- Porsche Taycan	45
Figura 33-Motor del Porsche Taycan	46
Figura 34-Estator del Motor	47
Figura 35-Motores eléctricos de flujo axial	50
Figura 36-Motor de flujo axial fabricado por Yasa	52
Figura 37-Ubicación del motor de flujo axial	53
Figura 38-Motor de flujo axial fabricado por Magnax	53
Figura 39-Motor de flujo axial ubicado en las ruedas de un vehículo	54
Figura 40-Motor de flujo transversal	56
Figura 41-Motor de flujo transversal con tres bobinas	58
Figura 42-Motor de flujo transversal con una y con dos bobinas	58
Figura 43-Motor de flujo transversal con dos estatores	59
Figura 44-Esquema del Motor de flujo transversal trifásico	60
Figura 45-Motor de flujo transversal trifásico	61
Figura 46-Motor reluctancia conmutada	64
Figura 47-Motor reluctancia síncrona	65
Figura 48-Motores reluctancia conmutada	66
Figura 49-Graficas a) corriente y b) par de un motor trifásico 12/8, Graficas c) corriente y d) par de un motor trifásico 12/16	67
Figura 50-Motor de reluctancia síncrona con imanes permanentes	68
Figura 51-Tabla con configuraciones de los imanes de cuatro modelos de motores	69
Figura 52-Tabla con los resultados de los cuatro modelos de motores	69
Figura 53-Motor de Borgwarner	70
Figura 54-Motor de Borgwarner cortado a la mitad	71
Figura 55-Motor de BMW con una porción cortada	72



Figura 56-Eschema de la patente del Motor de BMW	73
Figura 57-Estator del motor de reluctancia con imanes permanentes	74
Figura 58-Motores Lineales Cilíndricos	77
Figura 59-Motores lineales con estator en U	78
Figura 60-Motores Lineales con estator plano	78
Figura 61-Tren Shinkansen	79
Figura 62- Esquema de fuerzas sobre un conductor electrificado	83
Figura 63- Rotor del motor de corriente continua	84
Figura 64- Esquema de transistores para control	85
Figura 65- Patinete de Xiaomi	86
Figura 66- Estator y Rotor situados en el interior de la rueda	87
Figura 67- Sensores Hall en el estator del motor	88
Figura 68- rendimiento de motores de reluctancia síncrona a 1500 rpm en función de su potencia	90
Figura 69- rendimiento de los motores	91
Figura 70- rendimiento de los motores de inducción	92
Figura 71- mapa de potencias específicas	93





1. Introducción

El vehículo de tracción eléctrica es una realidad más que nunca. Todos los países se están comprometiendo a reducir sus emisiones de efecto invernadero de manera drástica en un periodo corto de tiempo.

En la Unión Europea las nuevas normativas adoptadas sancionan desde el año 2020, a los fabricantes de vehículos, cuya media de emisiones de los vehículos vendidos a lo largo del año supere los 95 gramos de CO₂ por kilómetro recorrido.

La única alternativa factible a día de hoy en el ámbito del transporte por carretera son los vehículos de tracción eléctrica. Todos los fabricantes han apostado por ellos.

Sin embargo, existen diferentes alternativas dentro de los motores eléctricos, algunos son motores ampliamente conocidos por su uso en industrias, a la vez que surgen nuevos tipos y evoluciones. Gracias a los avances en electrónica y en computación se podrán incorporar a la movilidad eléctrica en un futuro próximo.

Al contrario de lo que muchos piensan, los vehículos de tracción eléctrica llevan con nosotros mucho más tiempo, este tema lo abordaremos en el apartado 2.

1.1 Objetivos

El objetivo es analizar y comparar las prestaciones de los motores eléctricos que se utilizan actualmente en automoción, incluyendo también los nuevos desarrollos y diseños que ofrecen posibilidades en un futuro cercano, creando así una guía actual de los distintos tipos de motores.

Introducir sus métodos de control y arranque, divulgar la historia de los vehículos de tracción eléctrica y exponer las características de modelos concretos de algunos fabricantes.



2. Historia de los motores eléctricos en la automoción

La historia comienza en el año 1841 el escocés Robert Davidson construyó el que se considera el primer prototipo de locomotora eléctrica, recorrió 2,4 kilómetros a una velocidad de 6,4 Km/h arrastrando 6 toneladas.

Este prototipo no estaba conectado a ninguna red eléctrica contaba solo con la energía de las baterías, que eran galvánicas no recargables.

Las baterías recargables no aparecieron hasta el 1859 haciendo la idea del vehículo eléctrico más viable.

El primer vehículo eléctrico viable y funcional fue el Electrobat, desarrollado en 1894 en Philadelphia por un ingeniero mecánico Henry G. Morris y un químico Pedro G. Salom, era un lento y pesado artilugio, con ruedas de acero para poder soportar el peso de su chasis además de la gran batería de plomo.



Figura 1- Electrobat primer vehículo eléctrico

Este vehículo primitivo más parecido a un carruaje, llegó a recorrer 160 kilómetros con una carga de batería.

El periodo de finales del siglo 19 y principios del 20 está lleno de inventos y avances en los vehículos eléctricos alrededor del mundo, el limitado mercado para coches, todavía demasiado caros, eran adquiridos por gente rica.

El mercado de aquella época estaba dominado por motores a vapor, seguidos por los coches eléctricos y por último los coches a gasolina.

Sin embargo, la electricidad que no era accesible para todo el mundo fuera del centro de las ciudades, unido al gran peso por unidad de energía de las baterías, hizo que inventores como Edison o Henry Ford apostaran por el motor de gasolina, que tenía un futuro mucho más prometedor.

El final de esta época dorada de los coches eléctricos llegó con la aparición del Ford modelo T, era más asequible que sus competidores eléctricos y continuó haciéndose cada vez más barato. El primer modelo costaba 850\$ en 1908 y para el año 1923 su precio había bajado de los 300\$.

Los coches eléctricos eran 10 veces más caros, lo que provocó que toda la industria que fabricaba coches eléctricos desapareciera casi por completo para el año 1935.

Durante los siguientes 30 años no se avanzó casi nada en su investigación, debido a la abundancia de la gasolina y el continuo avance del motor de combustión interna.

Cuando la NASA contrató a Boeing para crear un vehículo que usar en la luna, la opción obvia fue el vehículo eléctrico para un lugar sin atmósfera.

El **LRV** contaba con cuatro motores de corriente continua, uno en cada rueda, con una potencia de 0,18kw cada uno, capaces de llegar a las 10.000 rpm.

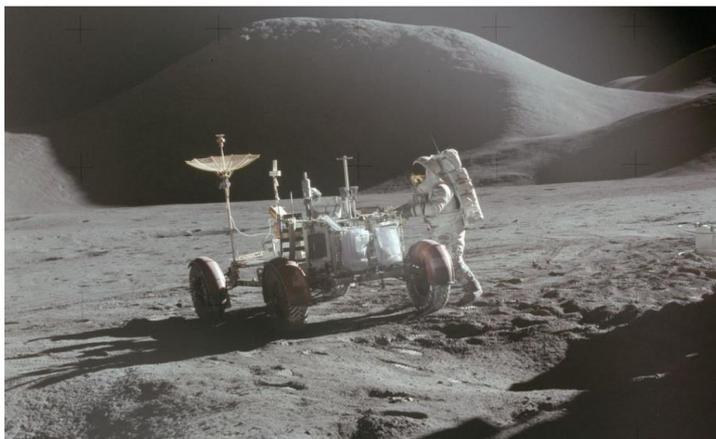


Figura 2- Rober Lunar

Desplegado por primera vez en la misión Apolo 15 en 1971, el **LRV** contaba con baterías no recargables de hidróxido potásico de zinc y plata, con una capacidad de 121 Amperios/hora.



Contaba con dirección a las cuatro ruedas, un chasis tubular de aluminio retráctil para poder ser transportado en la capsula de aterrizaje y pesaba unos 208 kilos en la gravedad de la tierra.

En el año 1973 la crisis del petróleo, derivada del cese de la producción y exportación por parte de los países miembros de la OPEP, creó un interés creciente en los países occidentales por reducir la dependencia del petróleo extranjero, se invirtieron por parte de los estados grandes cantidades en desarrollar vehículos híbridos y eléctricos, pero no se llegaron a fabricar en masa.

El verdadero resurgir de los vehículos eléctricos no ocurrió hasta el inicio del siglo 21, el primer punto de inflexión fue la introducción al mercado del primer vehículo híbrido producido en masa, el Toyota Prius, introducido al mercado japonés en 1997 y en el 2000 al mercado mundial, convirtiéndose en un éxito a nivel mundial. Este coche utilizaba baterías de hidruro de metal y níquel.

El aumento continuo de los precios de los combustibles fósiles llevó al Prius a ser el coche híbrido más vendido de la primera década del siglo 21.

El otro punto de inflexión, fue la aparición de una pequeña Start Up llamada Tesla Motors, en el 2006 realizó el anuncio que comenzaría a fabricar coches eléctricos de lujo, capaces de recorrer más de 320 kilómetros con una sola recarga de la batería.

La fabricación de su primer modelo comenzó en 2008 con el modelo Roadster.



Figura 3- Tesla Roadster

Este coche de propulsión solo eléctrica, fue el primero en usar baterías de ion litio y superar los 320 Km de autonomía real, este modelo usaba motores de inducción trifásicos con cuatro polos, en cuatro años se vendieron más de



2400 unidades, lo que les convirtió en el fabricante de coches eléctricos de referencia.

En la actualidad las políticas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación en las grandes ciudades y la previsión de un agotamiento de las reservas petrolíferas, han provocado un resurgimiento más acelerado de la investigación y el desarrollo de vehículos eléctricos.

Todos los fabricantes de coches están invirtiendo en el desarrollo de vehículos híbridos y eléctricos, cada vez con baterías de mayor capacidad de almacenamiento, motores más eficientes y tiempos de recarga más cortos.

Sin embargo, todavía quedan retos como, reducir los costes para hacerlos accesibles para la gran mayoría, aumentar su autonomía y el reciclaje de las baterías al final de su vida útil entre otros.





3. Motores Asíncronos (inducción)

Son motores que se caracterizan por que son mecánicamente sencillos de construir, lo cual los hace muy robustos y sencillos, apenas requieren mantenimiento. En la actualidad representa el 80% de los motores usados en la industria, principalmente su versión trifásica.

No necesitan arrancadores, arrancan por si solos al conectarles a la red trifásica de alimentación.

No se ven sometidos a vibraciones por el efecto de la transformación de la energía eléctrica en mecánica, ya que la potencia instantánea absorbida por una carga trifásica es constante e igual a la potencia activa.

Sin embargo, históricamente su inconveniente más grave ha sido la limitación para regular su velocidad, de ahí que cuando esto era necesario, en diversas aplicaciones como la tracción eléctrica, trenes de laminación, etc..., eran sustituidos por motores de corriente continua, más idóneos para este servicio.

El desarrollo de la electrónica de potencia a finales del siglo 20 permitió que poco a poco se fuesen imponiendo en los accionamientos eléctricos de velocidad variable.

Comenzamos analizando su funcionamiento y los aspectos constructivos de los motores asíncronos. Observando la forma del estator y los tipos de rotor existentes.

3.1 Funcionamiento

El motor de inducción está compuesto por un rotor de jaula de ardilla o bobinado y un estator con electroimanes, estos electroimanes del estator crean un campo magnético giratorio, en el interior del campo se coloca el rotor compuesto por un eje metálico con una bobina o una jaula de ardilla hecha con barras de metal, de acuerdo con las leyes de Faraday el campo magnético induce una corriente eléctrica en el rotor, esta corriente inducida crea su propio



campo magnético, que de acuerdo con la ley de Lenz intentara oponerse a su origen, el campo magnético giratorio del estator, girando en sentido contrario. La velocidad a la que gira el campo magnético del estator se denomina velocidad de sincronismo y bien expresada por la siguiente relación:

$$n_1 = \frac{60f_1}{P}$$

donde:

n_1 = velocidad angular de sincronismo

f_1 = frecuencia de la red trifásica

P = número de pares de polos del motor

El motor asíncrono trifásico no puede alcanzar por sí mismo la velocidad de sincronismo por lo tanto sufre un deslizamiento de la velocidad de giro del campo magnético del estator, con respecto a la velocidad del rotor.

Este deslizamiento se calcula mediante la siguiente expresión:

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} * 100$$

donde:

s = velocidad de deslizamiento en %

n_s = velocidad angular de sincronismo en revoluciones por minuto

n_m = velocidad angular del rotor en revoluciones por minuto

El deslizamiento para el motor toma valores entre 0 y 1. Cuando el motor está parado, justo en el momento de arranque, el deslizamiento vale 1. Una vez arrancada la máquina, el valor del se acercará a valores cercanos a 0. Los valores normales del deslizamiento, dependerán de la potencia del motor y de sus características constructivas, pero puede oscilar entre 0,02 para motores de gran potencia y cercanos a 0,06 e incluso 0,08 para motores de menor potencia.

La característica de estos motores que destaca sobre el resto, es su gran par de arranque, por eso siguen siendo la mejor opción en trabajos pesados como cintas transportadoras y grúas.

En la figura 4 podemos observar el gran par de arranque, como aumenta con la velocidad hasta llegar al punto estacionario, punto a partir del cual desciende cuanto más nos acerquemos al sincronismo.

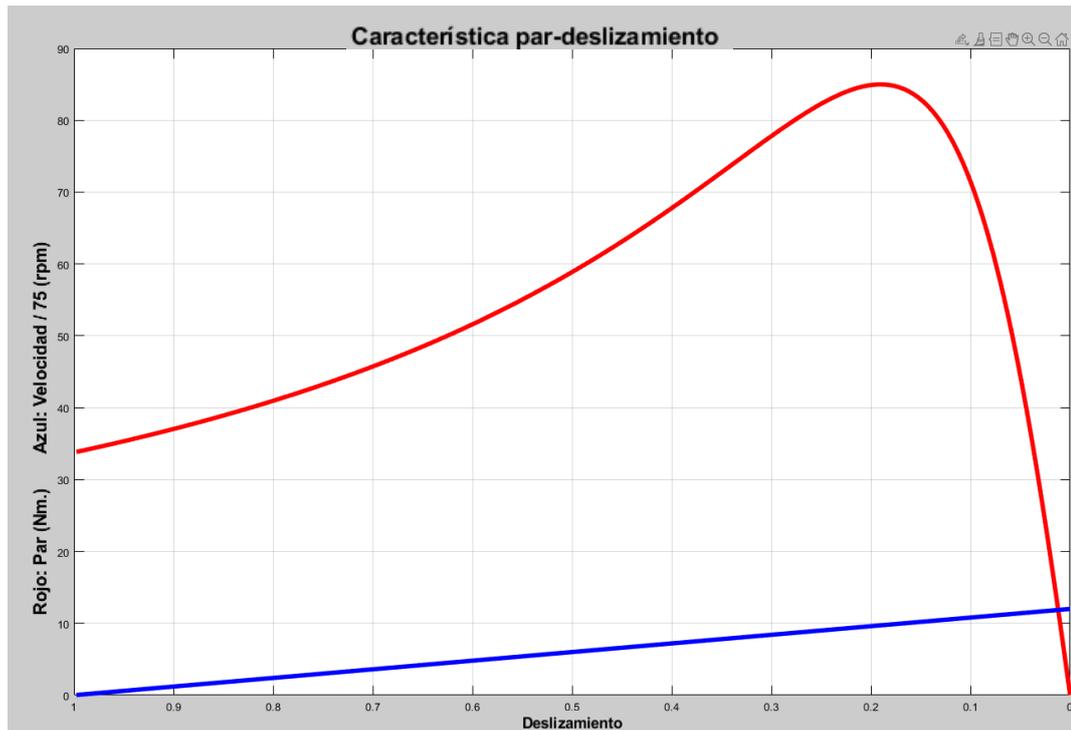


Figura 4- Curva característica par deslizamiento

El motor, para ponerse en marcha, debe desarrollar un par electromagnético que supere todos los pares resistentes en el arranque. Durante un transitorio se produce una aceleración hasta que se alcanza un punto de equilibrio en el que el par motor y el resistente son iguales, el motor alcanza un estado de funcionamiento estacionario, a una velocidad constante.

La máquina asíncrona, además de disponer de un estator y un rotor, está dotada de otros elementos mecánicos necesarios para su funcionamiento: tapas o cubos, rodamientos, carcasa, etc. En los motores de mediana y gran potencia existe un ventilador en el eje, cuya misión es producir una refrigeración forzada de la máquina. A veces la carcasa tiene forma ondulada

para mejorar la evacuación del calor que se produce como consecuencia de las pérdidas que aparecen en el motor.

A continuación, describiremos las dos partes principales de estos motores y sus distintos tipos.

3.2 Componentes

3.2.1 El Estator

El estator está compuesto por electroimanes, denominados polos, normalmente un par por cada fase de la corriente alterna que suministramos al motor, las bobinas de cada par están unidas en serie y corresponden al polo magnético opuesto de un imán, esta polaridad se mantiene hasta que la corriente cambia de polaridad. El conjunto de conductores de la maquina se denomina devanados o bobinados.

Se pueden distinguir tres tipos en función del número de devanados del estator:

Monofásicos: poseen un solo devanado en el estator usados en pequeñas maquinas herramienta

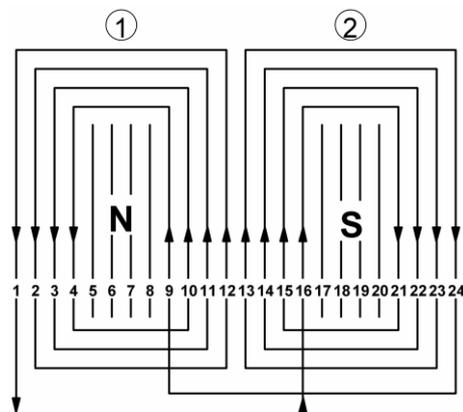
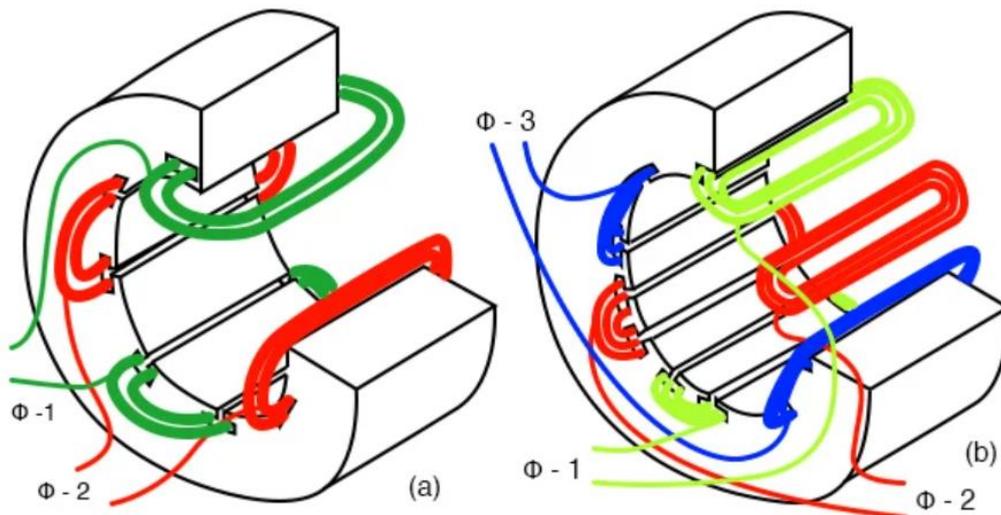


Figura 5- Esquema de Bobinado monofásico concéntrico por polos, de 2 polos con $K = 24$ ranuras.

Bifásicos: Tienen dos devanados en el estator desfasados entre si $\pi/2P$ siendo P el número de pares de polos de la máquina, en la imagen de abajo se puede ver en el caso a), como una máquina de 1 par de polos están desfasados entre si 90°

Trifásicos: Tienen tres devanados en el estator desfasados entre si $2\pi/3P$

En la imagen inferior se puede ver cómo están desfasados entre si 60° , este tipo de motores son los utilizados para tracción en algunos automóviles eléctricos.



Estator con: a) 1 par de polos y 4 bobinas, b) 3 polos y 6 bobinas

Figura 6- Bobinado en tres dimensiones

Como se ve en la figura las bobinas están embebidas en el estator, para conseguir una mayor eficiencia. El estator está formado a su vez por anillos de acero delgados aislados con ranuras perforadas, apilados y asegurados mediante tornillos a la carcasa del motor.

En la actualidad el bobinado del estator es una tarea compleja que se debe realizar con precisión para asegurar el buen funcionamiento del motor, se utilizan en muchas ocasiones cables en forma de pletina para minimizar el espacio entre ellos y poder colocar más cobre en menos espacio.

El rotor por su lado puede ser de dos tipos:

3.2.2 Rotor de jaula de ardilla

El rotor del motor consta de un cilindro hueco hecho con barras de cobre o aluminio en cortocircuito, junto con un núcleo laminado para prevenir la

histéresis, las barras horizontales que forman la jaula de ardilla tiene cierto ángulo respecto a la horizontal del eje del rotor, como se puede ver en la figura.

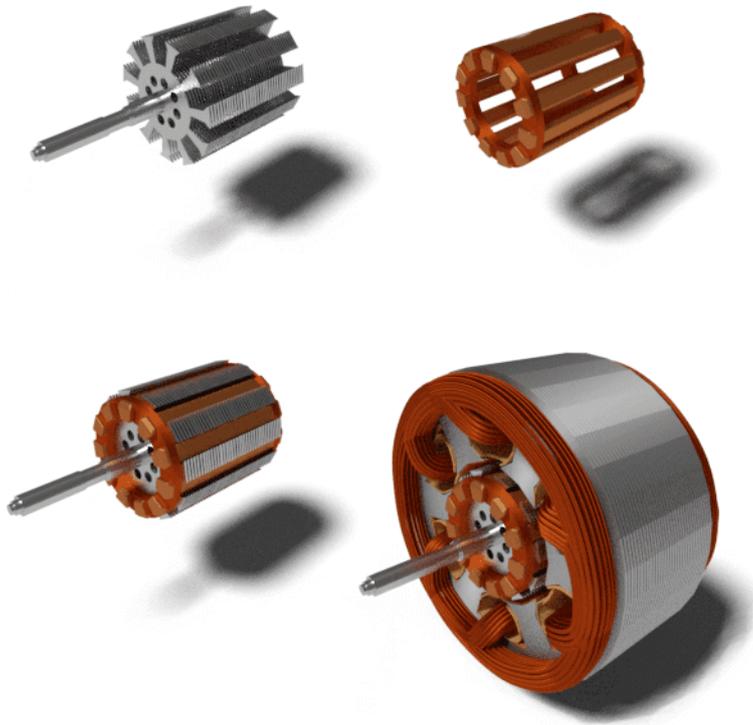


Figura 7-Motor con rotor de Jaula de Ardilla

El arranque de los motores de jaula de ardilla puede ser directo, por autotransformador o en estrella triángulo.

Existe una variante de este motor que es el:

Rotor en doble jaula de ardilla: El motor de doble jaula de ardilla fue inventado por Dolivo Dobrowolsky el año 1893, siendo desarrollado más tarde por Boucherot.

El rotor de estos motores está constituido por dos jaulas, una externa de menor sección y material de alta resistividad y otra interna de sección mayor y material de baja resistividad. Ambas jaulas están separadas entre sí en cada ranura por medio de una delgada rendija que aumenta el flujo de dispersión en la jaula inferior. De este modo se consigue una jaula exterior con alta resistencia y baja reactancia y una jaula interior con baja resistencia y baja reactancia.

3.2.3 Rotor bobinado

El rotor de este tipo de motores tiene un núcleo cilíndrico con ranuras paralelas donde se colocan las bobinas, esto hace que su construcción sea más compleja que el tipo jaula de ardilla. Además, tienen menor rendimiento y par.

Necesitan escobillas para alimentar el rotor por lo que su mantenimiento es mayor, sin embargo, tienen ventajas como:

- Mayor par de arranque.
- El control de su velocidad es más sencillo.
- La capacidad de sobrecarga del motor es alta.
- Funciona sin problemas bajo cargas pesadas.
- Tiene una corriente de arranque inferior.

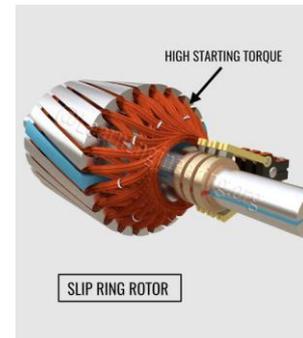


Figura 8-Rotor Bobinado

Por estas características son utilizados sobretodo en la minería, para mover bombas de agua, cintas transportadoras, rodillos y grúas.

Se pueden diferenciar dos tipos, en función del tipo de escobillas, de contacto permanente o que se desconectan cuando el motor a alcanzado máxima velocidad.

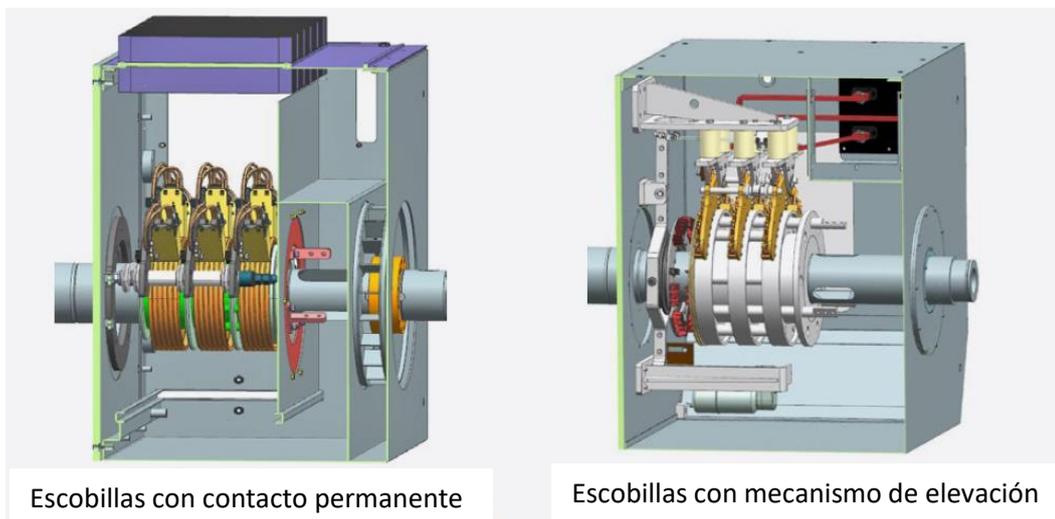


Figura 9- Escobillas de motor de rotor bobinado



3.3 Métodos de Control

3.3.1 Control Escalar

El desarrollo de los inversores basados en tiristores, que proporcionan corriente alterna con frecuencia variable, tuvo lugar durante los años sesenta, gracias a este avance surgieron las técnicas de control escalar donde la frecuencia y el voltaje son controlados por el inversor.

De esta manera una máquina de inducción puede operar a velocidad variable controlada, estos motores con control escalar sustituyeron a motores de corriente continua en aplicaciones donde la precisión y la respuesta transitoria no son cruciales, por ejemplo, en bombas, ventiladores o compresores.

El control escalar se basa en variar la frecuencia de alimentación que llega al estator, pues esta modifica la velocidad de sincronismo del campo magnético giratorio y por ende la velocidad mecánica de giro, sin embargo se ha de mantener el cociente E/f constante para que el aumento del flujo magnético sea proporcional y no sature el núcleo magnético.

Para entenderlo un poco mejor hay que recordar que el flujo en el núcleo de un motor de inducción se puede encontrar aplicando la ley de Faraday.

$v(t) = -N \frac{d\phi}{dt}$ si se aplica el voltaje $v(t) = V_m \sin \omega t$ al núcleo, el flujo resultante es:

$$\phi(t) = -\frac{V_m}{\omega N_p} \cos \omega t$$

Como bien podemos ver, la frecuencia eléctrica aparece en el denominador de esta expresión, entonces, si la frecuencia eléctrica aplicada al estator disminuye en un 10%, mientras que el voltaje aplicado al estator permanece constante, el flujo en el núcleo del motor se incrementará cerca del 10%, al igual que la corriente de magnetización.

Se pueden diferenciar dos situaciones en las que trabaja este control,

Cuando trabaja por debajo de la frecuencia nominal, situación en la que el flujo se mantiene constante y el par máximo es el mismo para todas las curvas par-velocidad.

Cuando trabaja por encima de la frecuencia nominal, situación en la cual no se puede mantener constante la relación E/f la tensión se mantiene fija en el valor nominal, al aumentar paulatinamente la frecuencia se produce una disminución del flujo.

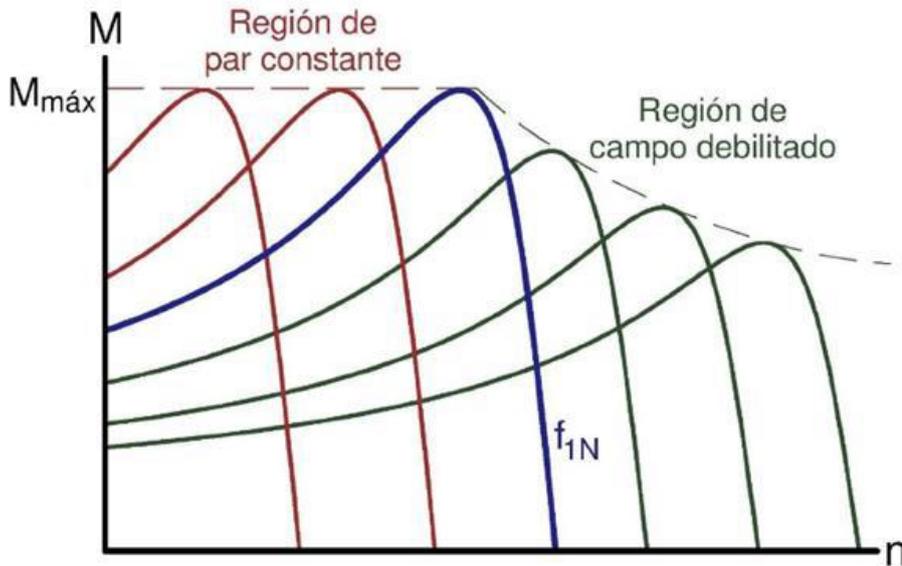


Figura 10- Curva par Velocidad Control Escalar en Motores Asíncronos

Variador de velocidad por control de tensión/frecuencia (control escalar) constante. El control escalar se puede implementar en lazo abierto y en lazo cerrado. En la figura tenemos un control escalar de lazo cerrado.

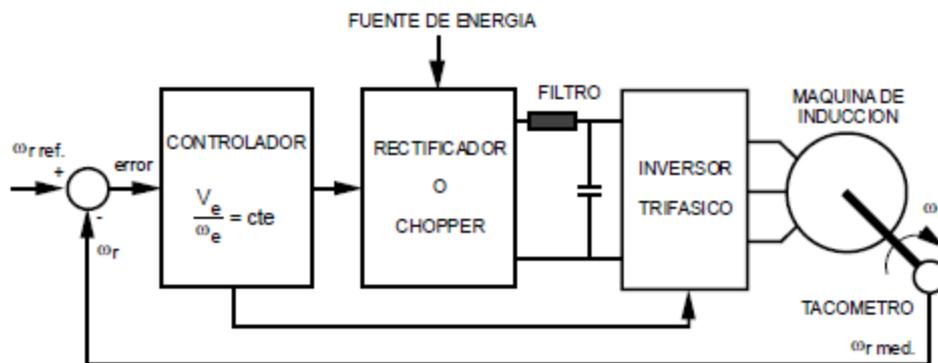


Figura 11- Esquema del Control Escalar

La estructura más simple, hace que el control orientado al flujo del rotor sea el más utilizado. Todos los controladores vectoriales independientemente del sistema de orientación requieren información precisa sobre la amplitud y la posición del vector de flujo seleccionado como referencia, esta información se puede obtener mediante dispositivos de retroalimentación o mediante estimación.

Gracias a los avances en procesadores de señales digitales, la simulación se convirtió en una alternativa muy importante frente a la medición ya que esta es compleja, sensible y cara, se generalizó el uso de modelos matemáticos en tiempo real, también hay que mencionar que la simulación siempre introduce algunos errores y que existen diferencias entre el comportamiento dinámico real y el modelado.

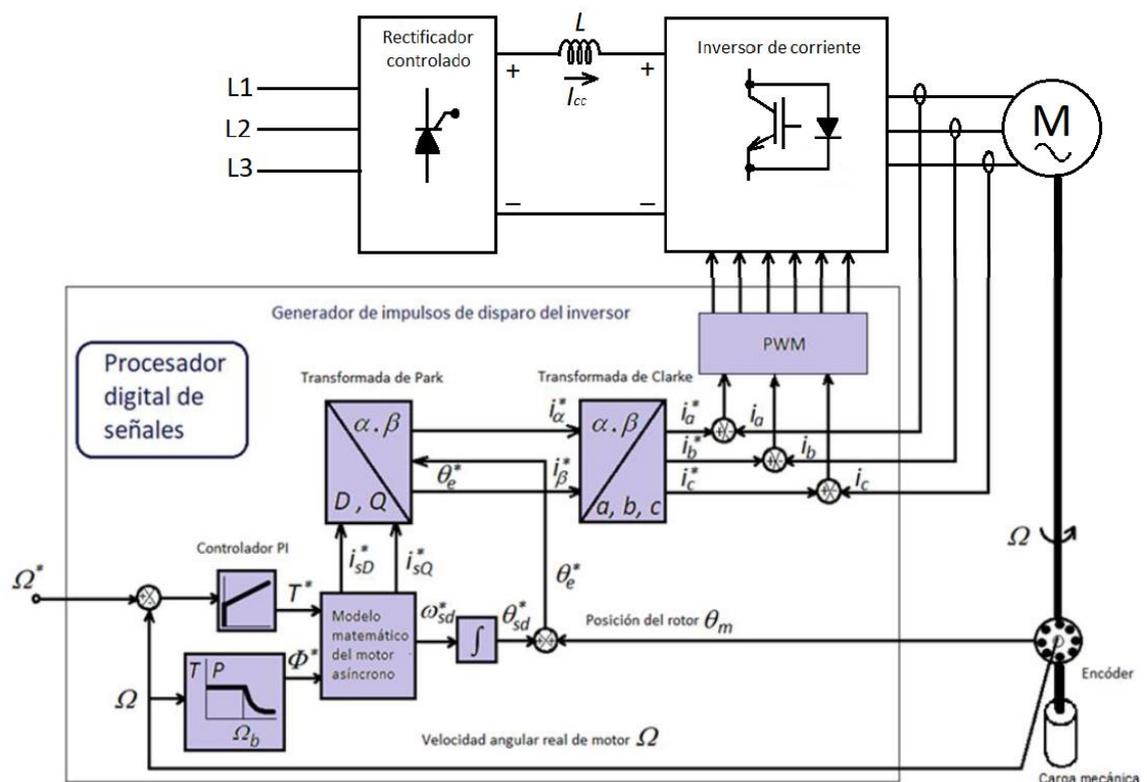


Figura 13- Esquema control vectorial de un motor de inducción.



En la industria de la automoción eléctrica se utiliza la variante de jaula de ardilla de los motores asíncronos de inducción.

Los fabricantes eligieron este tipo de rotor por su robustez, la ausencia de escobillas, un diseño del rotor más sencillo y con menos cantidad de cobre respecto al motor de rotor bobinado.

La ausencia de imanes permanentes en el rotor al contrario que los síncronos también es una de sus características diferenciadoras, es cierto que no es el tipo de motor más usado en vehículos eléctricos pero algunos fabricantes de coches los usan con veremos a continuación.

3.4 Ejemplos de uso del Motor de Inducción en Vehículos

Eléctricos

3.4.1 Audi e-Tron



Figura 14- Vehículo eléctrico del Fabricante Audi

La marca alemana lanzo al mercado en 2019 la versión eléctrica de algunos de sus modelos, ofreciendo la novedad al incluir tres motores, dos en el eje trasero y uno en el delantero, los dos motores traseros están acoplados directamente al eje de las ruedas, permitiendo así reducir el volumen que ocupan, aumentando el espacio útil del vehículo.

El coche de manera autónoma cambia la forma de propulsión usando solo dos o los tres motores en función de la demanda de tracción, la potencia estimada es de 355 caballos con un par de 973Nm y una autonomía estimada de 400Km.



Figura 15- Motor del Audi e-tron

Audi opto por motores asíncronos de jaula de ardilla, frente a la tendencia mayoritaria de usar motores síncronos de imanes permanentes, por varios motivos, el primero es la ausencia de pérdidas cuando el motor está apagado causadas por los imanes, el segundo motivo es la ausencia de imanes permanentes hechos de tierras raras, cuyo precio ha aumentado junto con su demanda.

El rotor del motor está fabricado a partir de un tipo especial de aluminio, puro al 99,7% que es comparable al cobre, pero mucho más ligero, por lo que tiene otra ventaja.

Estos vehículos también cuentan con **vectorización de par eléctrico**, cada uno de los motores traseros envía directamente la potencia a cada rueda a través de una transmisión por lo que no es necesario un diferencial mecánico, se puede controlar la velocidad de las ruedas traseras cuando el vehículo gira, permitiendo una mayor agilidad en el paso por curva.

También cuenta con avances en la tracción, si durante un trayecto una de las ruedas traseras entra en contacto con una superficie deslizante, se puede redistribuir gradualmente la potencia a la rueda que tiene más agarre.

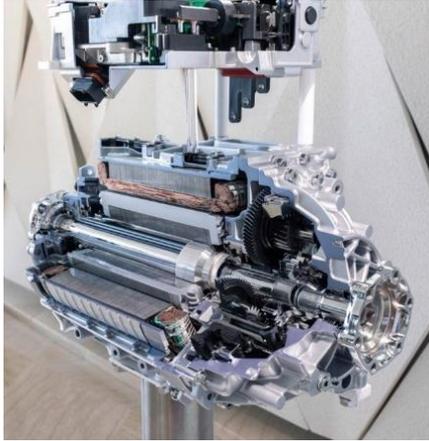


Figura 16- Corte de un Motor del Audi e-tron

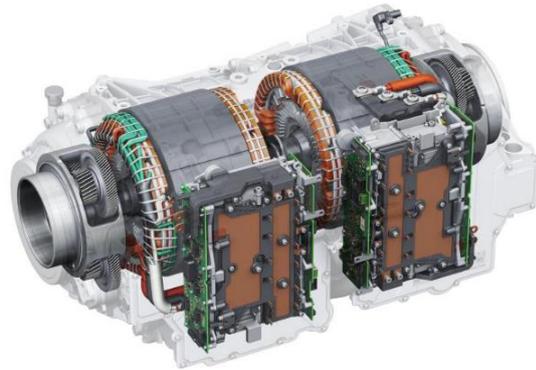


Figura 17-Acople de dos Motores del Audi e-tron

La batería del e tron tiene capacidad de almacenar hasta 95kwh de los cuales se pueden llegar a usar 83.6 kwh, formada por 36 módulos cada uno de ellos formados por 12 celdas de tipo ion litio del fabricante LG, el conjunto trabaja a 396 voltios.

Audi opto por usar baterías planas, con celdas de gran formato planas, según el fabricante estas celdas son más fáciles de refrigerar cuando se encuentran ensambladas en la batería. Cada módulo esta encajado en aluminio y particiones gruesas que aíslan los distintos módulos, minimizando la propagación descontrolada del calor y añadiendo rigidez al conjunto de la batería.

Con un ojo puesto en el futuro, la batería está diseñada para poder ser reparada y usar módulos con diferentes tipos de celdas.

Audi e-tron S Sportback

Elektrischer Antriebsstrang
Electric drivetrain
02/20

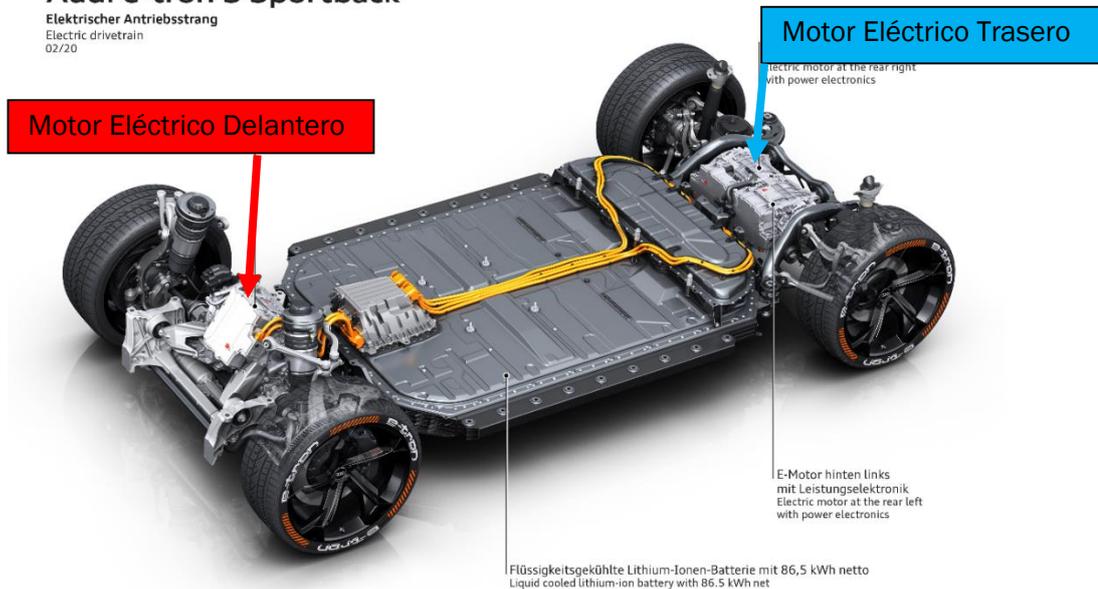
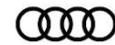


Figura 18- Plataforma del Audi e-tron

La recarga de las baterías se puede realizar con una potencia máxima que llega hasta los 150kw en corriente continua o 11Kw en corriente alterna, este es el primer vehículo eléctrico en incluir esta característica. Esta mayor potencia de recarga se traduce en que el tiempo de recarga del 5 al 80% se ha reducido hasta los 30 minutos, sin embargo, en la actualidad la mayoría de los puntos de recarga rápida tienen una potencia que llega solo a los 50Kw.

Un factor importante para lograr estas recargas es el sistema de gestión térmica, formado por cuatro circuitos, que se encargan de enfriar o calentar la batería, el habitáculo y los motores.

3.4.2 Tesla model S



Figura 19- Tesla Model S

En el año 2012 el fabricante Tesla lanzo al mercado el Model S, un sedán de lujo con tracción trasera con una autonomía de 426km con una batería de 85Kwh, tras su éxito, en el año 2014 anunciaron una versión con tracción a las cuatro ruedas que cuenta con un motor eléctrico en cada eje.

Este sistema de dos motores fue una mejora categórica de los sistemas de tracción a las cuatro ruedas, el sistema que controla electrónicamente el par en los dos ejes por separado ofrece un control independiente, de esta manera no se necesitan las complejas uniones mecánicas, para distribuir la potencia de un solo motor a las cuatro ruedas, sin embargo, al tener dos motores se sacrifica algo de eficiencia en favor del plus de tracción.

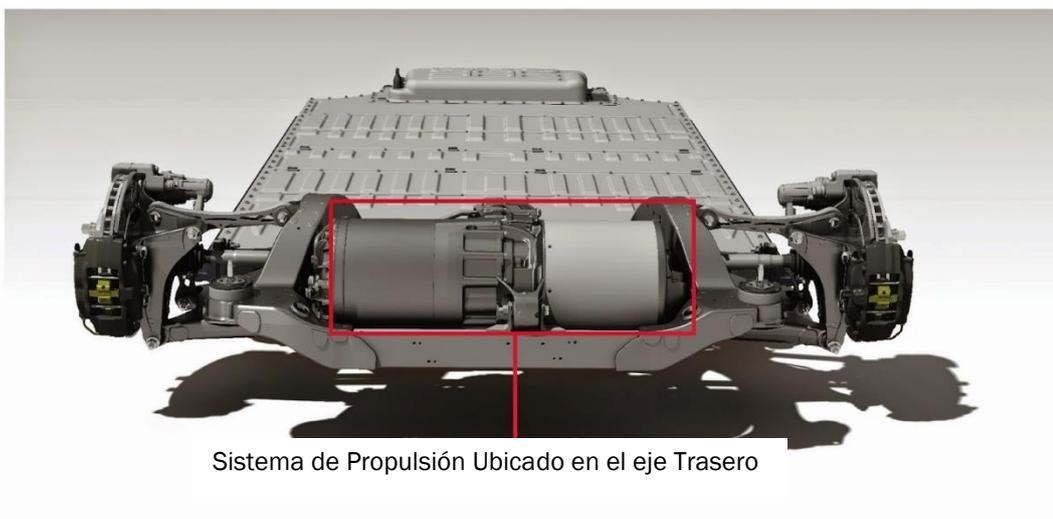
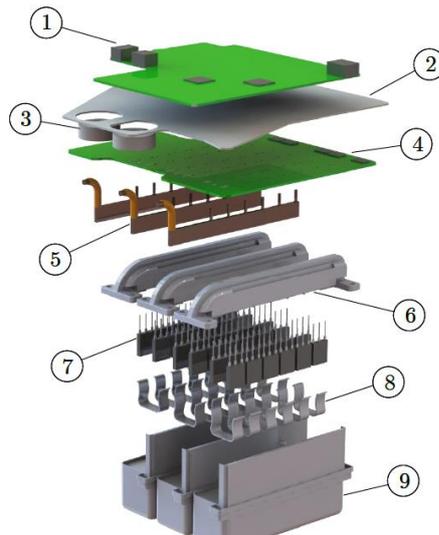


Figura 20- Unidad de propulsión del Tesla Model S

El inversor que transforma la corriente continua de la batería en la alterna que alimenta el motor, esta formado por una placa de control, que como hemos descrito antes sera un procesador de señales digitales, este esta aislado de la electronica de potencia por una placa de metal, para evitar que el calor desprendido afecte a los circuitos.



- 1)Circuito de control 2) Placa protectora de aluminio 3) Sensor de fase de la corriente 4)Circuito de Accionamiento 5) Barras Colectoras 6) Disipadores de calor 7) IGBTs 8)Sujeción IGBTs 9) Condensadores

Figura 21- Partes del Inversor

Como podemos observar en la imagen de abajo el inversor se diseña para ocupar el menor espacio posible.

Con la intención de ahorrar cable este inversor está situado al lado del motor, más concretamente este fabricante atornilla el inversor a la carcasa de la transmisión.



Figura 22- Inversor listo para ser acoplado

Las baterías utilizadas por el fabricante Tesla Motors utilizan celdas cilíndricas, a pesar de la dificultad de desarrollar este tipo de baterías, se logra un uso más eficiente del espacio y reducir los costes.

En este modelo cuentan con 85Kwh y 400v, utilizando la tecnología de ion litio. La batería está compuesta por 16 módulos conectados en serie, formados por 96 celdas en serie y 74 en paralelo haciendo un total de 7.104 celdas, de un tamaño similar al de una pila AA.



Figura 23- Paquete de batería de tesla Model S



Figura 24-Celdas de la Batería



La refrigeración de las células de la batería se consigue gracias a un conducto flexible situado entre las células, a través del cual circula el refrigerante. Mantener control sobre la temperatura de la batería es muy importante para alargar su vida útil, además, mantener una temperatura estable en los periodos de recarga ayuda a reducir el tiempo que tarda en recargarse la batería.



Figura 25-Sistema de refrigeración de las celdas





4. Motores Síncronos

El motor síncrono trifásico es un motor utilizado en el ámbito industrial para aplicaciones que requieran de una velocidad constante de funcionamiento.

En la actualidad se utiliza mayoritariamente como generador eléctrico, al igual que con cualquier otro convertidor electromecánico de la energía.

Las máquinas síncronas están sometidas al principio de reciprocidad electromagnética el cual nos indica que pueden funcionar tanto en régimen generador como en régimen motor, característica que es aprovechada en las centrales hidroeléctricas de bombeo y también en vehículos de tracción eléctrica donde además de propulsarlos, genera energía durante las deceleraciones.

Este tipo de motores se adaptan bien a los vehículos, gracias a su mayor eficiencia y mayor densidad de potencia, respecto a otro tipo de motores como los de inducción.

4.1 Funcionamiento

El motor síncrono trifásico, es un motor de corriente alterna en el cual la velocidad de rotación del eje es proporcional a la frecuencia de la corriente en su estator y el número de polos de los que disponga el motor.

$$n = \frac{60 * f}{p}$$

donde:

n = velocidad angular de sincronismo

f = frecuencia de la red trifásica

p = número de pares de polos del motor

En función de la configuración del rotor se pueden distinguir tres tipos:

4.2 Maquina síncrona de rotor de polos salientes

Cuentan con un gran número de polos, alrededor de 20, debido a que su velocidad de giro suele ser baja, son de grandes dimensiones para poder alojar tantos polos.

Se usan en centrales hidroeléctricas como generadores movidos por las turbinas, recientemente se están usando también en parques eólicos, este tipo

de generador evita el uso de caja multiplicadora al disponer de tantos polos, su velocidad de sincronismo es baja y perfectamente compatible con la velocidad del rotor del aerogenerador.

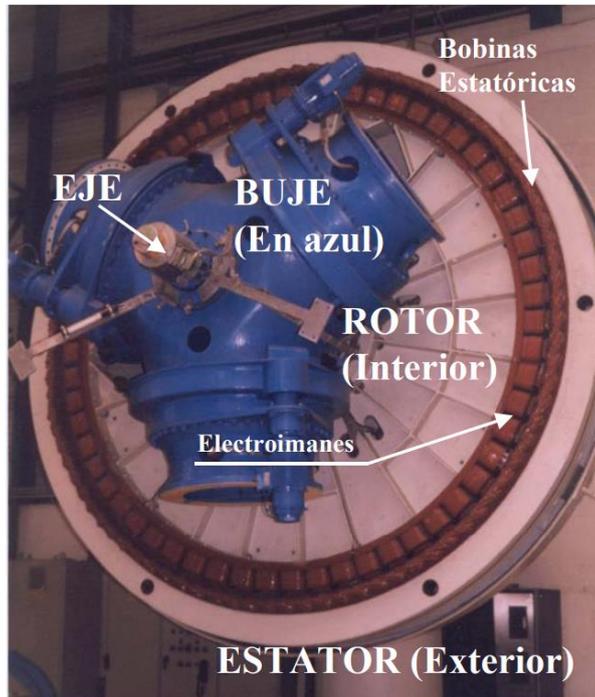


Figura 26-Generador de Polos salientes

4.3 Maquina síncrona de rotor cilíndrico

Empleada en las turbinas de vapor de las centrales térmicas, trabajan a altas velocidades por lo que necesitan tan solo 2 o 4 polos, para estar en sincronismo con la tensión de la red



Figura 27- Generador de rotor cilíndrico

4.4 Maquina síncrona de rotor con imanes permanentes

Este tipo de motores sustituyen el circuito de excitación por imanes permanentes alojados en el rotor, son una combinación entre los motores brushless (sin escobillas) de corriente continua y los motores de inducción.

Son aproximadamente un 30% más pequeños y un 10% más eficientes, comparando con otros motores de la misma potencia, están siendo utilizados en aerogeneradores de pequeña potencia, pero sobretodo en los sistemas de propulsión de los vehículos híbridos y eléctricos.

Alrededor del 90% de vehículos de tracción eléctrica usan este tipo de motores en sus sistemas de propulsión, permitiendo a los fabricantes incrementar la eficiencia y la autonomía de sus vehículos especialmente a bajas velocidades. La diferencia en el rendimiento a altas velocidades no es grande respecto a otros tipos de motores.

Esta eficiencia superior también influye en el peso, un factor importante en estos vehículos que pueden llegar a las 2 toneladas, si se pueden ahorrar espacio y 20 kilos en el sistema de propulsión, se podrán usar para colocar baterías más grandes o restar menos espacio al habitáculo del vehículo.



Figura 28-Rotor con imanes Permanentes



El estator de estos motores es similar al de los motores de inducción que hemos visto en el apartado anterior, sin embargo, el rotor como se ve en la imagen tiene adheridos a su superficie pequeñas placas rectangulares que son imanes permanentes, existe otro tipo de rotores que introducen los imanes dentro del rotor.

Este tipo de motores son más caros comparados con los motores de inducción, debido en gran parte a los imanes permanentes que están hechos de tierras raras como el neodimio.

Los imanes de neodimio tienen algunas limitaciones debido a su facilidad para corroerse en ambientes húmedos, para evitarlo se les suele recubrir con resina epoxi, níquel o combinaciones de ambos.

Estos imanes se fabrican a partir del material en forma de polvo, con granos de entre 3 y 7 micrómetros de diámetro, este polvo puede incendiarse espontáneamente en contacto con el oxígeno, antes de ser compactado en un ambiente adecuado a este polvo se le aplica un campo magnético para alinear las partículas, la capacidad de compactación de la prensa hidráulica limitara la sección transversal de la pieza.

Las piezas prensadas son introducidas en horno a una temperatura específica y con un gas inerte o al vacío en función de la categoría del imán que se está fabricando, tras este tratamiento se deja enfriar las piezas y se procede a su temple, tras este proceso los imanes no presentan ningún campo magnético.



Figura 29- Imanes Permanentes de Neodimio

Una vez completada la fabricación, el imán requiere “cargarse” para producir un campo magnético, esto se logra en un solenoide donde se pueden introducir



patrones magnéticos únicos, se suelen magnetizar en conjuntos para evitar manipular estos potentes imanes una vez magnetizados.

Una de las principales desventajas de estos imanes es que va poco a poco perdiendo magnetismo y pueden llegar a sufrir desmagnetización completa, si son expuestos a temperaturas de trabajo muy altas, campos magnéticos opuestos o cortocircuitos. El estar expuestos a estas situaciones provoca poco a poco pérdidas de par y finalmente un fallo prematuro del motor.

Otra de las características de estos motores, es su dificultad para ponerse en marcha.

4.4.1 Métodos de Arranque y Control

Antes de la aparición de la electrónica de potencia el principal método utilizado, era el de la maquina lanzadera, esta máquina es un motor exterior que realiza el giro inicial del rotor del motor síncrono, el cual llevará el motor a una velocidad próxima a la de sincronismo. Momento en el cual se podrá enganchar el motor síncrono trifásico a la red, despojándolo de la maquina lanzadera y quedando el motor síncrono en funcionamiento por sí solo.

Otro de los métodos de arranque empleados antes de la aparición de la electrónica de potencia era el denominado como arranque con devanados de amortiguamiento.

Este arranque, en que el rotor del motor síncrono tenía una modificación que se produce en el momento de su fabricación y tan solo consta de incrustar unas barras en el rotor cortocircuitando los bobinados del mismo, haciendo que el rotor ahora adopte una configuración de jaula de ardilla, asemejándose así al rotor de un motor asíncrono.

Hasta ahora los métodos de arranque vistos solo nos permiten la maniobra de arranque del motor, pero la velocidad a la que girará el mismo será la velocidad marcada por la formula vista al inicio de este apartado que dependerá de la frecuencia de la red y del número de polos que tenga la máquina.

Con la aparición en escena de la electrónica de potencia, se permite realizar un cambio que hasta ese momento nos era desconocido, para la obtención de la velocidad de sincronismo solo podemos actuar en 2 parámetros, uno de ellos es el número de polos de los que dispusiese la máquina, sobre el cual siempre

se actuaba para hallar la velocidad de sincronismo, algo que no nos permitía maniobra una vez construido el motor. El otro parámetro sobre el que podemos actuar es sobre la frecuencia de la red, lo cual hasta ese momento era imposible.

Pero a partir de ahora se nos permitía la modificación de esa frecuencia con la que alimentábamos el estator del motor, haciendo que se pudiese variar la velocidad del motor en pleno funcionamiento.

La modificación de la frecuencia aparte de para la regulación también nos permite el arranque del motor por lo tanto este es otro tipo de arranque que puede tener un motor síncrono trifásico.

Tenemos dos tipos de regulación de velocidad por variación de la frecuencia, la primera de ellas de la cual podemos ver el esquema a continuación es la denominada en lazo abierto.

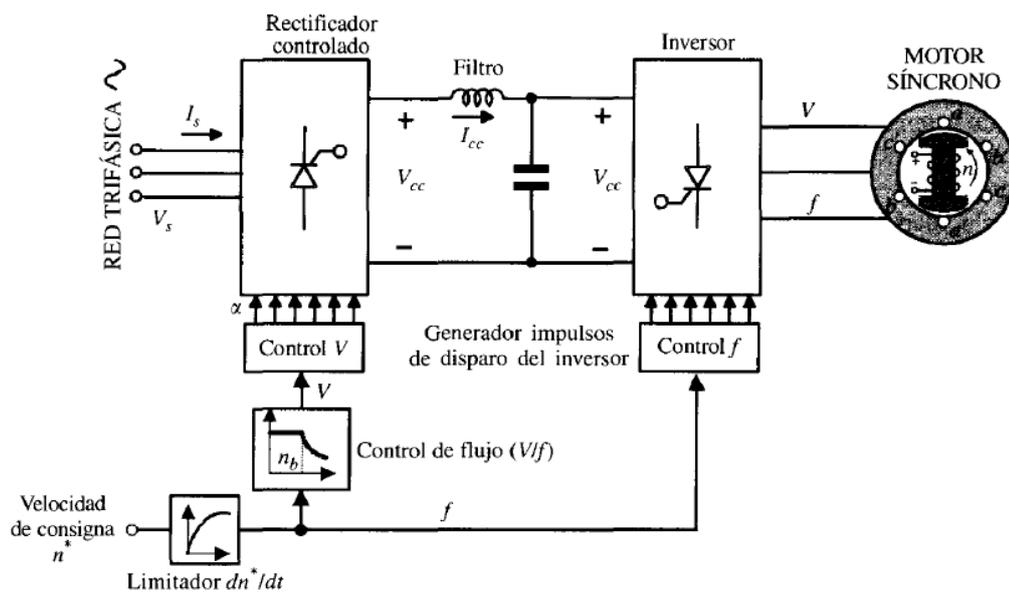


Figura 30- Esquema control lazo abierto

Este es un esquema sencillo de aplicar, siendo el esquema de control similar al de los motores asíncronos. El control se realiza mediante un rectificador controlado, filtros, un inversor y un generador de pulsos de disparos de un inversor, el cual realiza la tarea de la regulación en si misma gestionando el tiempo entre los pulsos, haciendo que se modifique la frecuencia que le llega al motor.

Otro de los tipos de regulación de velocidad por variación de frecuencia es el realizado en lazo cerrado o autopilotado.

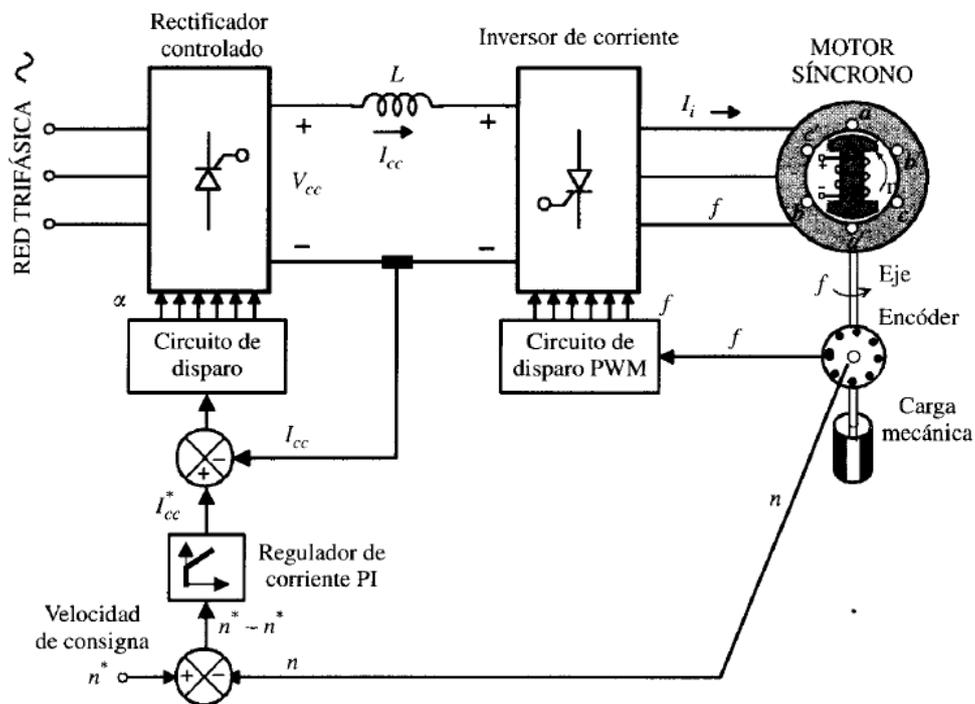


Figura 31- Esquema control lazo cerrado

Para evitar la pérdida de sincronismo cuando el par resistivo es muy alto o hay variaciones muy bruscas se necesita un lazo cerrado para que el propio motor adapte la frecuencia a sus necesidades, puesto que la propia velocidad del rotor es la que regula la frecuencia del estator.

Para ello debemos tener un sensor que nos permita medir el movimiento del rotor, se utiliza un sensor llamado Encóder, cuya información se utilizará para la corrección de frecuencia.

4.4.2 Control Vectorial

Al igual que en los motores de inducción se utiliza el control vectorial o de campo orientado, con la finalidad de asemejar el comportamiento de los motores síncronos a el de los motores de corriente continua.

El primer modelo matemático para el análisis dinámico de motores síncronos fue desarrollado inicialmente por Park en 1929

El control vectorial consigue obtener una mayor eficiencia del motor, gracias a el modelo matemático y al microcontrolador que realiza los cálculos.



4.5 Ejemplos de uso del Motor Síncrono en Vehículos Eléctricos

4.5.1 Porsche Taycan



Figura 32- Porsche Taycan

Los modelos Taycan del fabricante Porsche poseen dos motores eléctricos, uno en el eje delantero y otro en el trasero.

Los dos potentes motores eléctricos de los ejes delantero y trasero son síncronos de imanes permanentes (Permanent Magnet Synchronous, PSM). Disponen de un rotor con imanes permanentes de alta calidad que generan un campo magnético natural. Como resultado, el rotor se mueve en sincronía con el campo magnético giratorio del estator.

Un inversor con modulación del pulso determina la frecuencia del campo giratorio en el estator, estableciendo así la velocidad del rotor.

El diseño, la función y el excelente comportamiento térmico de los motores síncronos de imanes permanentes permiten alcanzar el alto rendimiento.

Una característica especial de los motores eléctricos de Taycan es el llamado bobinado de horquilla, en el que las bobinas en el solenoide del estator están formadas por cables rectangulares en lugar de redondos. Antes de ser insertados en el núcleo laminado del estator, los cables se doblan y adquieren forma de horquilla, de ahí su nombre. Los extremos se sueldan entre sí mediante láser.

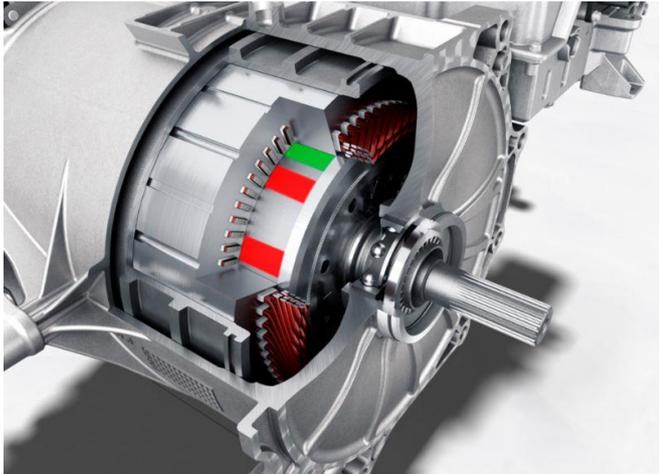


Figura 33-Motor del Porsche Taycan

La tecnología de horquilla permite bobinar los cables de una manera más compacta y, por tanto, integrar más cobre en el estator. Mientras que los procedimientos de bobinado convencionales logran un factor de llenado de cobre de entre el 45% y el 50 %, aquí es casi del 70 %. Esto aumenta la potencia y el par sin incrementar el volumen. Otra ventaja importante para un deportivo de altas prestaciones como el Taycan es que un estator de horquilla se puede refrigerar de forma considerablemente más eficiente.

El inversor con modulación de pulso es el componente fundamental para el arranque de los motores eléctricos. Hay uno para cada motor y su función es transformar la corriente continua suministrada por la batería en la corriente alterna necesaria para accionar los motores. Al frenar, la situación se invierte: en este caso, los inversores transforman la corriente alterna que se obtiene de la recuperación en corriente continua para cargar la batería. En el Taycan Turbo S se utiliza en el eje delantero un inversor con una intensidad de corriente máxima de 600 amperios, que puede lograr aún más potencia y par que los inversores delanteros de 300 amperios de los otros modelos.



Figura 34-Estator del Motor





5. Motores de flujo axial

5.1 Características y Funcionamiento

Las máquinas de flujo axial (AFPM) Son aquellas en las que el flujo magnético es producido por los imanes permanentes en la dirección del eje de rotación, su funcionamiento es similar al de los motores síncronos de imanes permanentes.

Tradicionalmente, esta topología no ha sido muy común, pero su uso es necesario en aplicaciones donde las dimensiones son más limitadas y no se puede usar un motor de flujo radial. Las principales ventajas que presentan son:

- Si se emplean dos rotores, las fuerzas de atracción entre el rotor y el estator se equilibran, eliminando la carga axial sobre los rodamientos.
- El calor producido por el bobinado del estator aparece en el exterior del motor, siendo relativamente fácil de eliminar.
- El entrehierro es ajustable durante el ensamblaje.
- El estator es relativamente fácil de bobinar puesto que está abierto.

Sus desventajas son las siguientes:

- El espacio en el que se alojan las cabezas de bobinas de los conductores en el radio interior tiene un volumen limitado
- La laminación del estator debe de apilarse en dirección circunferencial en forma de espiral, lo cual hace que el estator sea muy caro de fabricar.

Los distintos tipos se pueden clasificar según la posición del estator y del rotor como se muestra en la figura 35.

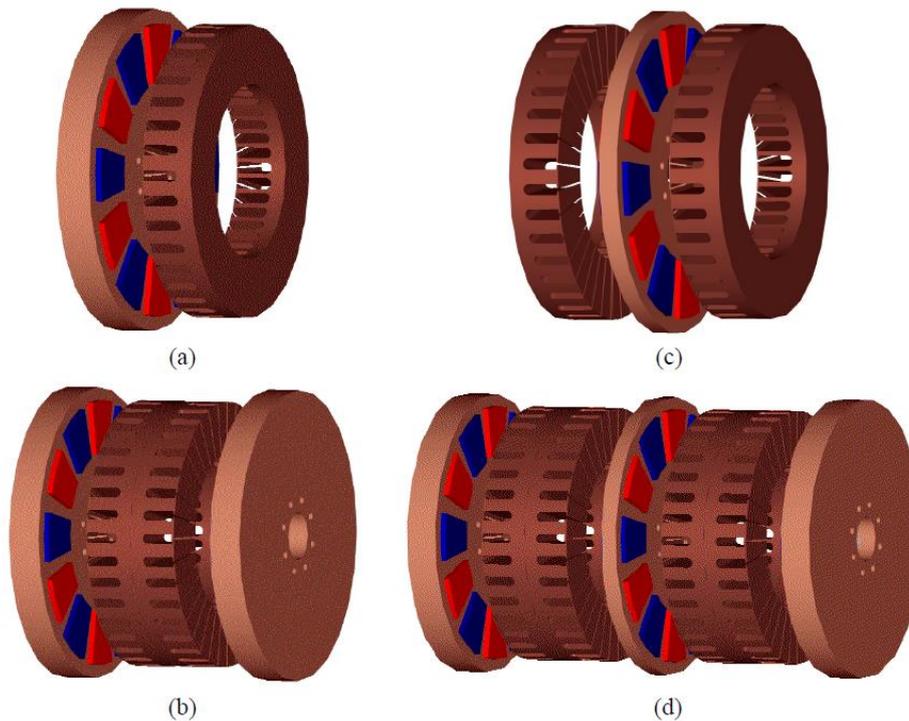


Figura 35-Motores eléctricos de flujo axial. (a) De un rotor y un estator, (b) De dos rotores y un estator (c) De un rotor y dos estatores y (d) Estructura multietapa incluyendo dos bloques de estator y tres bloques de rotor.

El par puede expresarse como el cociente entre la potencia mecánica y la velocidad angular.

Entonces, el par en un motor de flujo axial puede ser expresado como:

$$T_{em} = \frac{P_m}{\omega}$$

La selección del número de ranuras y de imanes es uno de los aspectos principales del diseño. Los factores de los que depende son múltiples:

-Frecuencia eléctrica, a mayor número de polos, la frecuencia es mayor, lo que produce mayores pérdidas en el hierro, en este sentido, la velocidad nominal a la que va a trabajar el motor influye decisivamente.



-Dimensiones de las ranuras y de los dientes, las dimensiones de los dientes deben cumplir ciertos requisitos mecánicos de rigidez, que limitan el número máximo de dientes para un diámetro dado de motor.

-Dimensiones de los imanes, la forma final de los imanes debe ser de fácil fabricación, debiendo evitarse curvaturas pronunciadas.

La elección del tipo de imanes permanentes se hará en base a las siguientes consideraciones: elevada energía magnética, resistencia a las altas temperaturas, resistencia a la desmagnetización y a la oxidación.

Como vimos en apartado anterior los imanes permanentes más usados son los de neodimio, recubiertos de resina epoxi para evitar su corrosión.

5.2 Ejemplo de uso de los motores de flujo axial

5.2.1 Ferrari sf90

El fabricante coches italiano, Ferrari incluyó tres motores eléctricos, en su nuevo modelo híbrido enchufable sf90, uno de ellos de flujo axial, los motores están situados dos en el eje delantero y el de flujo axial colocado entre el motor de combustión y la caja de cambios.



Figura 36-Motor de flujo axial fabricado por Yasa

El motor eléctrico del fabricante inglés YASA, produce 14kw/kg y tiene una longitud axial de tan solo 60mm, puede llegar a generar 150Kw y 266Nm.

Su función principal es cubrir los huecos de potencia del motor de combustión, un v8 biturbo, además de recargar las baterías con la energía que es recuperada de las frenadas.

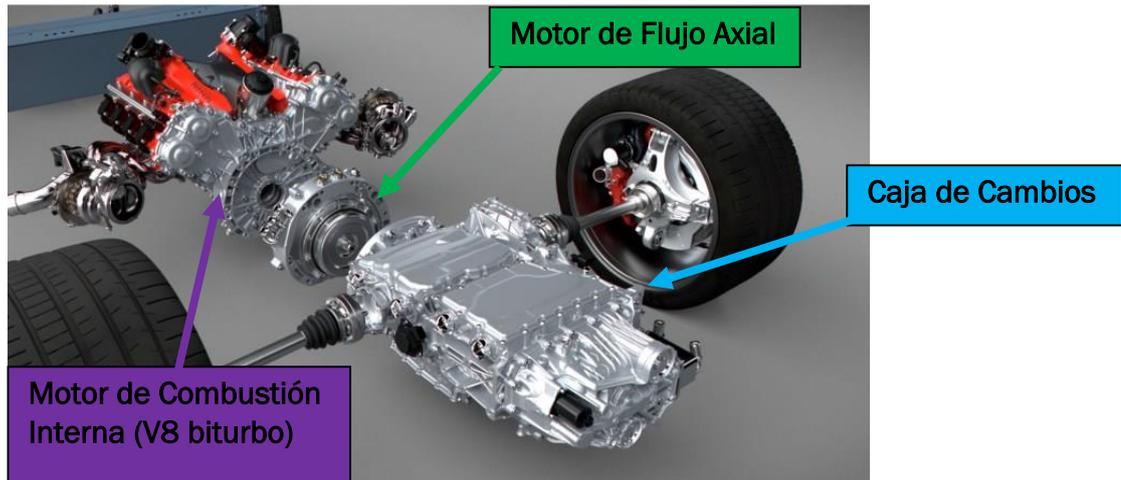


Figura 37-Ubicación del motor de flujo axial

5.2.2 Fabricante Magnax



Figura 38-Motor de flujo axial fabricado por Magnax

Magnax startup belga pretende incorporar sus motores a los mercados del vehículo eléctrico, las motocicletas y la aviación, gracias a la corta longitud de sus motores de flujo axial de nuevo diseño, se podría incorporar un motor dentro de cada rueda, como se ve en la imagen inferior.

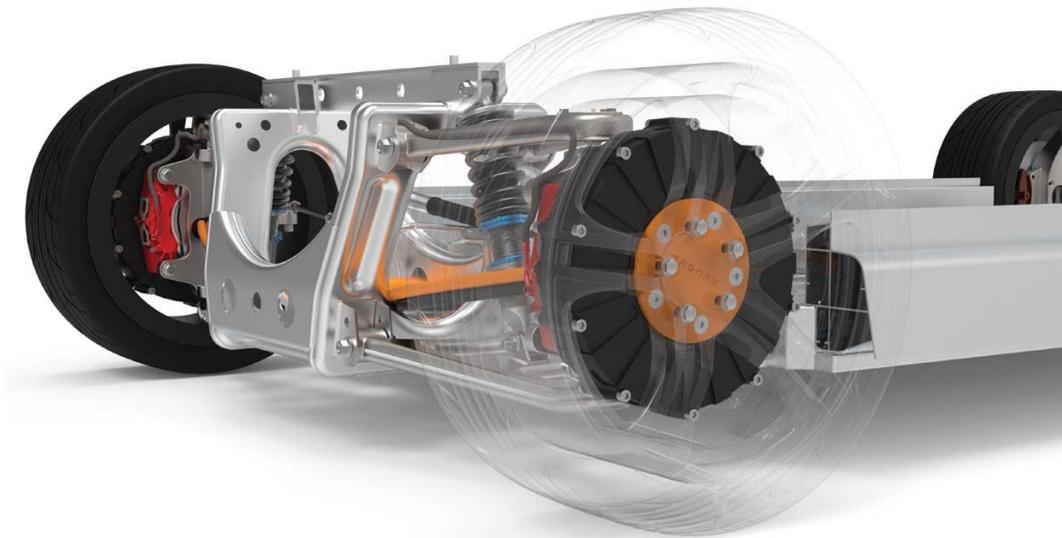


Figura 39-Motor de flujo axial ubicado en las ruedas de un vehículo

Los motores de esta marca incorporan otras novedades tecnológicas, como la utilización un alambre de cobre de sección rectangular en lugar de circular, de esta forma en un mismo espacio es capaz de agrupar una mayor cantidad de cobre al no haber apenas huecos entre los hilos.

Además, al contar con rotor dual, los cuales están hecho de acero con grano orientado, las pérdidas en el núcleo se han reducido en un 85%, permitiendo un aumento de la eficiencia hasta llegar al 96%.

Todas estas mejoras se traducen en una mayor ligereza del motor y en una mayor potencia. Según Magnax sus motores pueden alcanzar una densidad de potencia pico de hasta 15 kW/kg y una nominal de 7,5 kW/kg. Unido a su mayor capacidad de enfriamiento los nuevos motores de Magnax pueden proporcionar mayor potencia durante más tiempo.

La compañía prevé que estos motores podrán ser utilizados en gran cantidad de aplicaciones entre ellas los vehículos eléctricos, desde motocicletas, pasando por coches, aviones y hasta aerogeneradores.



6. Motores de flujo transversal

Los motores de flujo transversal, empezaron a ser investigados alrededor del año 1986, se caracterizan por un par muy alto y una gran eficiencia, operando a bajas velocidades en comparación a los motores de inducción y los de corriente continua.

Otra de sus grandes ventajas es la gran cantidad de polos que puede tener el estator, teniendo una velocidad de sincronismo baja y manteniendo unas dimensiones compactas, que le otorgan una mayor densidad de potencia que cualquier otro tipo de motor

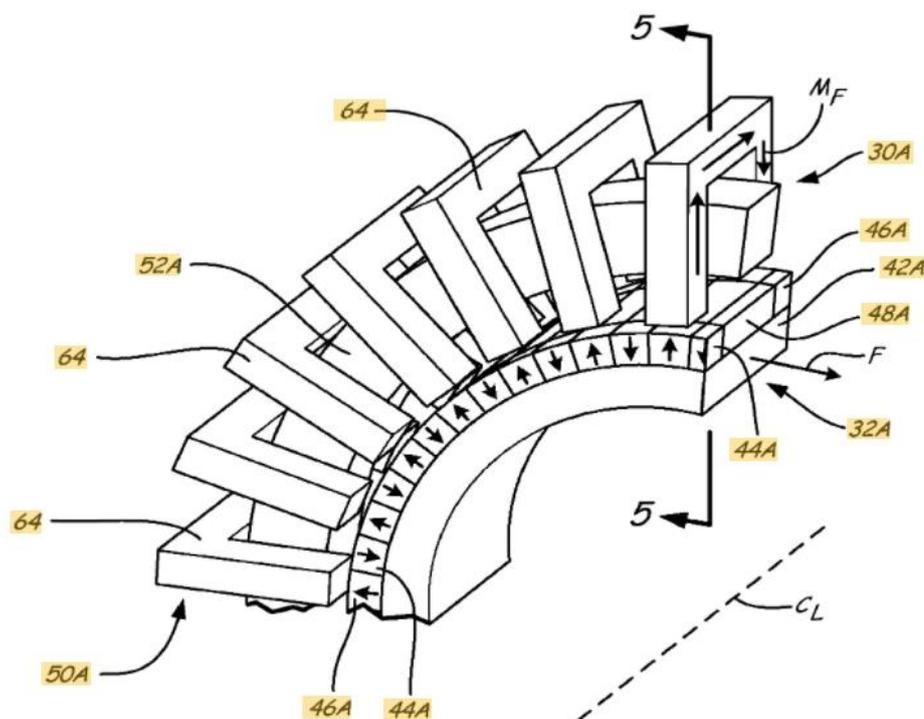


Figura 40-Motor de flujo transversal

La imagen superior se puede ver un corte parcial de uno de estos motores, el estator 30A está compuesto por núcleos con forma de U 64 y la bobina circular 52A, el rotor cuenta con un núcleo 42A, imanes permanentes 46A- 44A, dispuestos alternando sus polaridades y con un separador 48A

6.1 Funcionamiento

Los MFT tienen un flujo tridimensional, el flujo cruza el estator axialmente, circunferencialmente al rotor y radialmente al entrehierro.

El rotor está formado por imanes permanentes que crean el flujo radial y circunferencial,

En el entrehierro el campo magnético está modulado por un patrón específico de polos del estator, para que interactúe con el patrón heteropolar del rotor.

El estator está hecho con composites magnéticas en forma de U, fabricadas a partir de partículas de hierro puro de 0.2mm, compactadas y recubiertas de aislante, usadas para canalizar el flujo magnético, a cada una de estas piezas se le considera como un polo, por cuyo interior se encuentra la bobina en forma de anillo, que genera el flujo axial.

6.2 Diseños

Para su diseño es necesaria utilización de avanzados sistemas de simulación de flujos magnéticos tridimensionales.

En la figura inferior podemos ver un diseño de este tipo de motores en el que podemos ver tres bobinas con forma de anillo una por cada fase, en el interior de tres estatores y en este caso el rotor va por fuera de los estatores, este diseño se está utilizando para motorizar bicicletas eléctricas

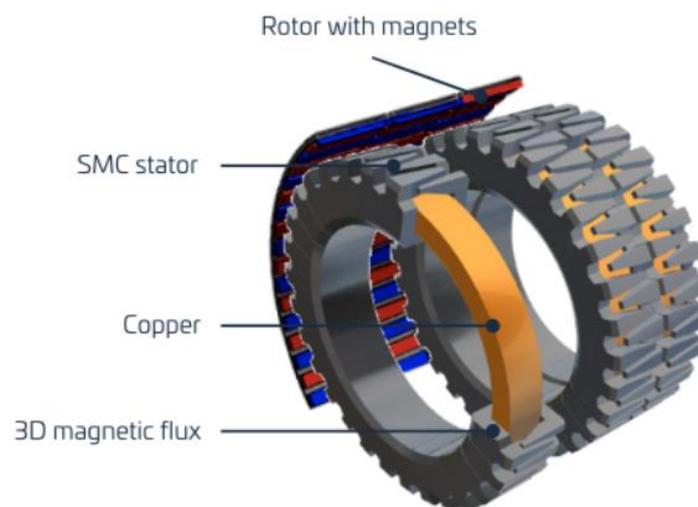


Figura 41-Motor de flujo transversal con tres bobinas

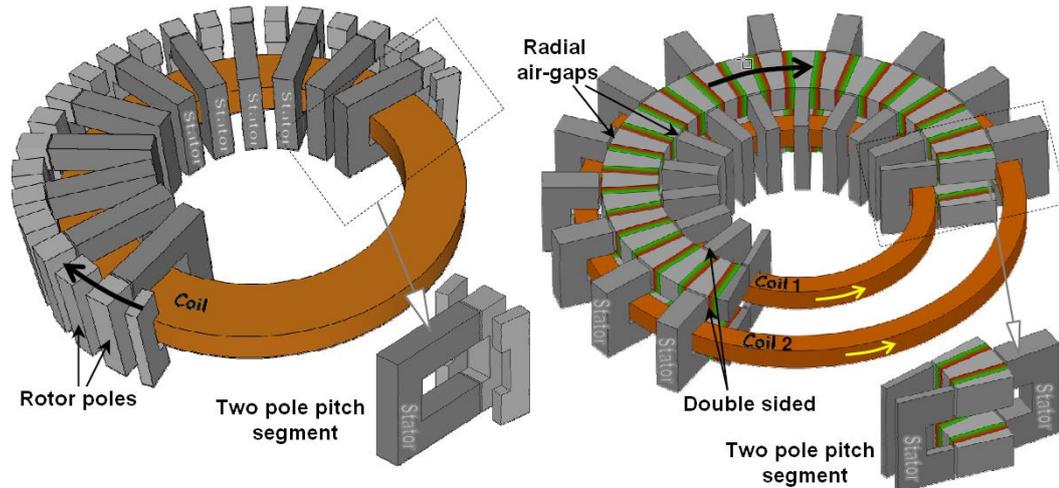


Figura 42-Motor de flujo transversal con una y con dos bobinas

En la imagen superior podemos observar a la izquierda un diseño básico y a la derecha un diseño más avanzado de este tipo de motores, que cuenta con dos bobinas en forma de anillo una por cada fase, conectadas en serie para que el flujo magnético que generan se sume, una en el interior y otra en el exterior encontrándose el rotor en el medio de las dos.

Este tipo de motores tienen un gran inconveniente ya que sufren un mal uso del flujo magnético del rotor, esto se debe a la colocación de imanes de polaridad opuesta muy cerca unos de otros por lo que restan parte de sus fuerzas, algunos diseños solucionan este problema separando más los imanes del rotor aumentando así reluctancia magnética, pero perderíamos superficie efectiva del polo o colocando dos estatores por cada rotor, como en la imagen inferior.

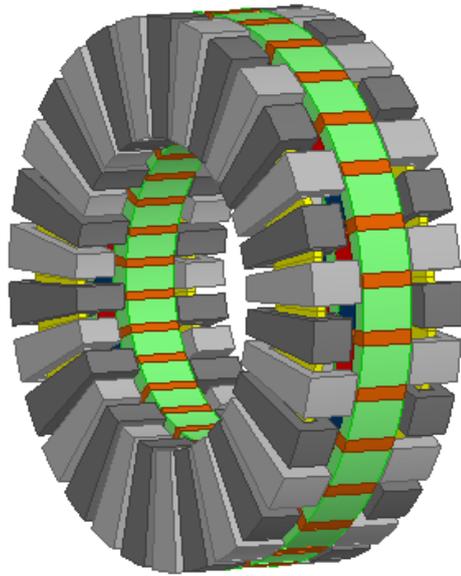


Figura 43-Motor de flujo transversal con dos estatores

6.3 Ejemplo de desarrollo del motor de flujo transversal

Honda fabricante de vehículos híbridos lleva desarrollando desde el año 2011 motores de flujo transversal, este fabricante suele colocar los motores eléctricos entre el motor de combustión interna y la caja de cambios, debido a esto, este tipo de motores que cuentan con una corta longitud axial son perfectos para los modelos más pequeños de vehículos, que disponen de menos espacio.

El TFM (transversal flux motor) desarrollado por honda en 2011 contaba con bobinas con forma de anillo y una nueva orientación del flujo, usaba un rotor de imanes permanentes

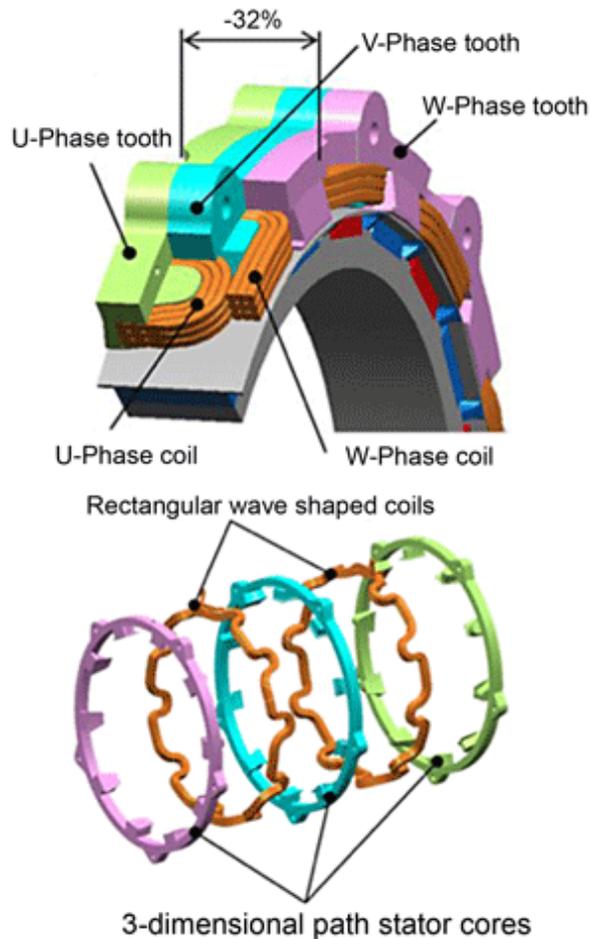


Figura 44-Esquema del Motor de flujo transversal trifásico

Sin embargo, la eficiencia de este diseño era del 79.1% debido a pérdidas en el hierro características de los SMC (soft magnetic composites) composites magnéticas del estator, además de la complejidad de fabricar bobinas rectangulares a partir de bobinas cilíndricas, para aumentar la eficiencia los ingenieros buscaron la forma de reducir las pérdidas por histéresis y corrientes parasitarias, para reducir las pérdidas en el hierro hasta su objetivo.

Los ingenieros de honda estudiaron los componentes del polvo de hierro usado en los composites magnéticos y sus métodos de fabricación, desarrollando nuevos métodos que reducían las pérdidas.

Para reducir las pérdidas por histéresis, necesitaban reducir la coercitividad (la intensidad del campo magnético que se debe aplicar a un material para reducir su imanación a cero después de que la muestra haya sido magnetizada hasta la saturación) del polvo de hierro, los principales factores eran el tamaño de los granos del polvo y las tensiones aplicadas en su proceso de compactación,

incrementando el tamaño de grano, la prevención de tensiones durante la compactación y el aumento de la temperatura del tratamiento térmico.

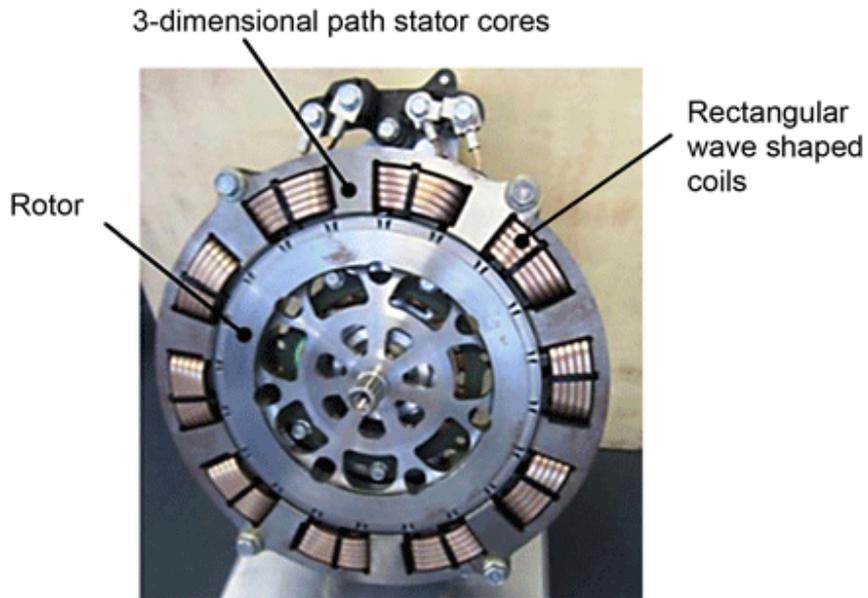


Figura 45-Motor de flujo transversal trifásico

Los ingenieros de honda desarrollaron una bobina que cumple los requisitos para poderse colocar formando una onda rectangular, además desarrollaron el nuevo proceso de bobinado del estator. Con estas bobinas, el resultado fue el prototipo que se ve en la imagen superior utilizando todos los avances en bobinas e imanes, este prototipo desarrollo una eficiencia del 83.7% un 4.6% superior a los prototipos anteriores, gracias a la reducción de las perdidas en el hierro.

Este rendimiento es bastante inferior al de otros tipos de motores que hemos visto.





7. Motores de reluctancia variable

Fue uno de los primeros motores eléctricos, los principios de su funcionamiento se descubrieron alrededor del año 1870, pero su desarrollo práctico se vio paralizado debido a sus complicados circuitos de control.

Regreso en los años sesenta del siglo pasado junto con la aparición de la electrónica de potencia.

El motor de reluctancia variable está formado por un estator y un rotor de polos salientes, solo el estator tiene bobinas en sus polos, el rotor está libre de bobinas y escobillas, sus ventajas son:

- Construcción sencilla
- El motor se puede operar a alta velocidad y temperatura debido a que el rotor puede actuar como sistema de refrigeración del estator
- Una baja inercia debido a que no tenemos imanes o bobinas en rotor permitiendo trabajar al motor a bajas velocidades y responder rápidamente a variaciones de carga

El aumento de la demanda de motores de alta eficiencia y el aumento de los costes de los imanes permanentes, hechos con tierras raras, ha propiciado que los motores de reluctancia y de reluctancia con imanes permanentes de ferrita empiecen a ser un claro competidor de los motores de inducción y los motores síncronos de imanes permanentes.

7.1 Como funcionan

Estos motores generan par debido a la tendencia del rotor de material ferromagnético a moverse a una posición donde la inductancia sea máxima y la reluctancia mínima, respecto al campo magnético producido por el estator

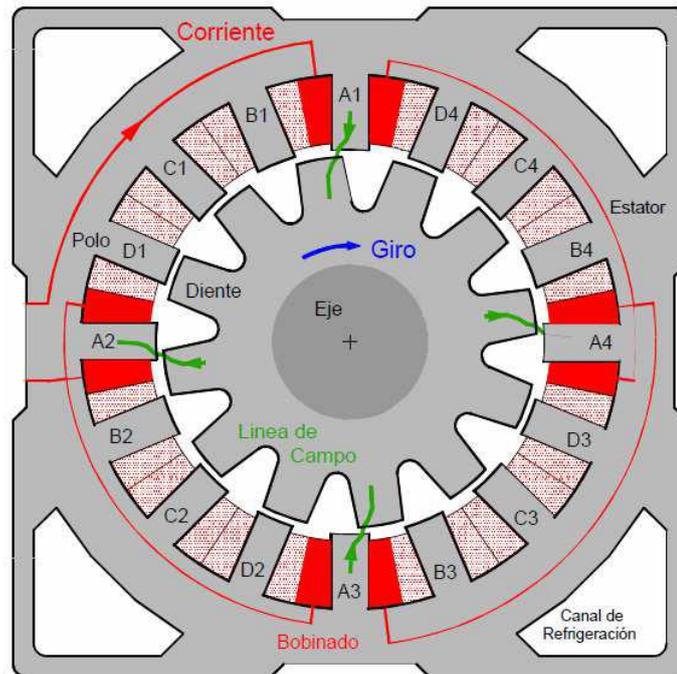


Figura 45-Motor reluctancia conmutada

Se pueden diferenciar tres tipos:

7.2 Reluctancia síncrona

En los años 60 del siglo 20 estos tipos de motores de velocidad de aplicación variable, ganaron gran protagonismo gracias a rápido desarrollo de la electrónica de potencia y la disponibilidad de computadoras con lenguajes de programación complejos con cierta velocidad de procesamiento.

Este tipo de motores que trabajan en sincronismo con la frecuencia de su estator, eran un gran sustituto de los motores con velocidad controlada de corriente continua y de inducción en la industria de las fibras.

Eran controlados en un bucle abierto.

El bucle abierto establecía el voltaje y frecuencia del inversor independientemente de la velocidad y posición del rotor, los motores operaban con una velocidad de respuesta muy pobre además de una eficiencia y un factor de potencia bajos.

Los continuos avances en los controladores de velocidad de los motores de inducción, hicieron perder mercado a los motores de reluctancia, sin embargo, las mejoras en la estructura del rotor y en los bobinados del estator auguran futuro a este tipo de motores.



Las ventajas de los rotores formados por laminas, con ranuras magnéticas curvas, para crear la máxima reluctancia en la dirección normal y la mínima reluctancia en la dirección de las ranuras, se están conociendo en la actualidad, este tipo de construcción de rotores presentan un factor más alto de eficiencia y densidad de potencia.



Figura 46-Motor reluctancia síncrona

- La eficiencia de los motores síncronos se puede aumentar sin cambios en el rotor añadiendo la cantidad justa de imanes al núcleo del rotor.
- El incremento de la resiliencia los hace competitivos con motores de inducción en términos de factor de potencia y potencia demandada.
- Los motores de reluctancia síncrona se pueden controlar de manera más sencilla que los motores de inducción de campo orientable, en pequeños y medianos tamaños.
- Trabajando a plena carga, el motor de reluctancia síncrono se le puede frenar hasta pararlo sin tener problemas de sobrecalentamiento como los motores de inducción.
- El motor de reluctancia síncrono cumple con los estándares de eficiencia como el IE4, lo que le da un gran potencial.

7.2.1 Diferencias entre el síncrono y el conmutado

La gran diferencia entre los motores de reluctancia síncrona y conmutada es que en el caso de los síncronos existe un campo rotatorio que en los conmutados no, lo que permite a los motores síncronos ser alimentados por inversores similares a los usados para motores de inducción, en cambio los motores conmutados necesitan de un controlador electrónico, además de los problemas de rizado en el par y ruido que pueden ser eliminados en los síncronos, junto con un mayor par a bajas velocidades en los motores síncronos.

7.3 Reluctancia conmutada

Los motores de reluctancia conmutada, se diferencian de los otros tipos debido a que tienen un rotor de polos salientes.

En la actualidad este tipo de motores se usan como generadores en pequeñas plantas de producción eólica, gracias a su pequeño tamaño son fáciles de transportar e instalar, además de ser fáciles de manejar con vientos de gran velocidad, debido a que es una máquina que trabaja a distintas velocidades le permite extraer un extra de energía.

Su estructura es robusta, sencilla y sin imanes permanentes o bobinados en el rotor, lo que les permite ser capaces de trabajar a altas velocidades, con un par de arranque casi nulo.

Dentro de las limitaciones de estos motores destaca, la presencia de un alto rizado (componentes de alta frecuencia) del par y el empleo obligatoriamente de un controlador electrónico.

Su funcionamiento se basa en la colocación de bobinas en el estator, conectadas a pares opuestos formando las fases del motor. La excitación de una de las fases genera un campo magnético que se cierra a través del rotor, el cual para alcanzar la posición en la que la reluctancia es mínima, se alinea con los polos del estator por lo que genera un par.

En la siguiente figura se puede observar las dos configuraciones más comunes un motor de 4 fases con 6 polos en el rotor y 8 en el estator, junto con otro de 3 fases 8 polos en el rotor y 12 en el estator.

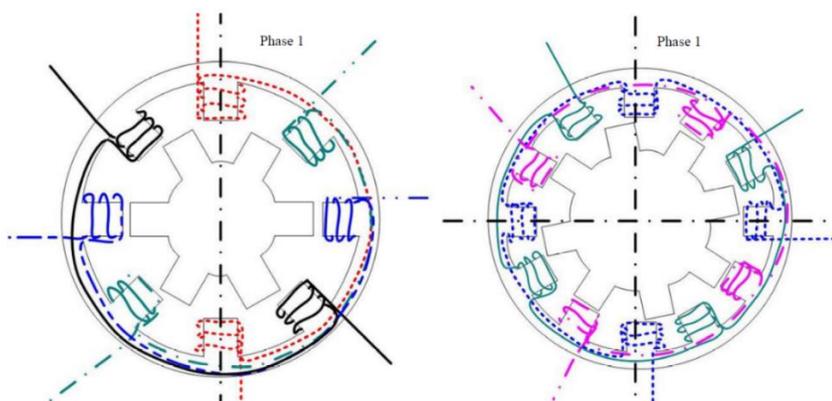


Figure 1. Configuration of a switched reluctance machine: (a) 4 phase 8/6 and (b) 3 phase 12/8.

Figura 48-Motores reluctancia conmutada

El número de rotores del estator y del rotor están diseñados para evitar las zonas de par cero, esto nos lleva a un diseño simétrico y equiespaciado de los polos del estator y rotor.

El tiempo del ciclo completo del rotor descenderá cuantos más polos tengamos en el rotor, un mayor número de polos en el rotor requerirá una mayor excitación como se ve en la figura 4a y 4c, sin embargo, nos proporcionará un mejor par como se ve en la gráfica 4(d), donde trabaja como motor.

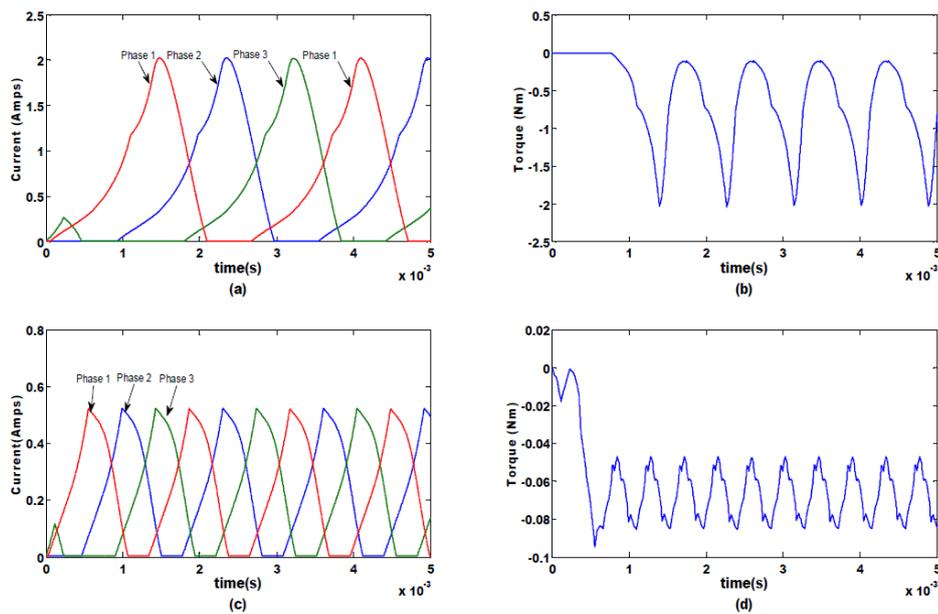


Figura 49-Graficas a) corriente y b) par de un motor trifásico 12/8, Graficas c) corriente y d) par de un motor trifásico 12/16

Para su control se debe incluir retroalimentación de la posición del rotor y sincronizar la conmutación de las corrientes de fase con la posición del rotor de forma adecuada.

7.4 Reluctancia con imanes permanentes en el rotor

El incremento de la demanda de vehículos híbridos y eléctricos ha acelerado el desarrollo de motores de alta densidad de potencia, junto con un gran rango de velocidades necesarios en estas aplicaciones.

Los motores de reluctancia variable son una gran alternativa, unido a los beneficios de los imanes permanentes de ferrita, han provocado un aumento en el interés por este tipo de motores.

Los motores de reluctancia con imanes permanentes, se construyen insertando imanes permanentes en las ranuras del rotor, creando una barrera para el flujo magnético, en un diseño convencional se suelen colocar varias barreras por polo.

Se suelen producir fluctuaciones del par debidas a la interacción de los armónicos con la geometría del rotor.

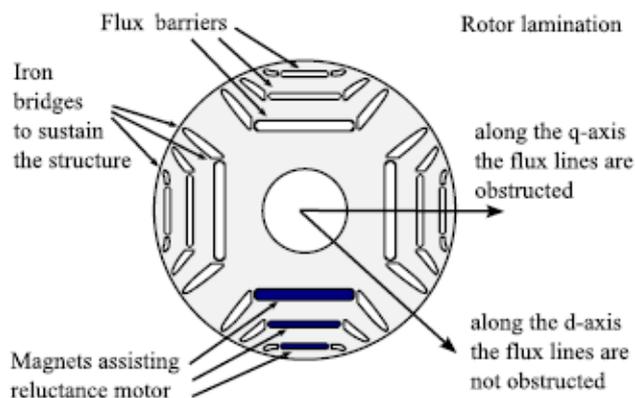


Figura 50-Motor de reluctancia síncrona con imanes permanentes

Este tipo de motores con rotores tan anisótropos proporciona la oportunidad de diseñar motores sin control de la posición del rotor.

Normalmente el factor de potencia es bajo en los motores de reluctancia, pero se mejoró con la introducción de los imanes permanentes creando las barreras del flujo, esta mejora también reduce la corriente necesaria en el estator, que a su vez reduce las pérdidas y aumento la eficiencia.

El laminado del rotor reduce el par, pero también reduce en un tercio las fluctuaciones del mismo.

A continuación, vemos la propuesta de diseño de la IEEE, de un motor de reluctancia con imanes permanentes, para maximizar el campo electromagnético y reducir las variaciones del par.

SPECIFICATION OF THE BASIC MODEL AND MODELS 1–3

Item	Unit	Basic Model	Model 1	Model 2	Model 3
Output power	kW	1.8			
Rated speed	r/min	1500			
Poles/PM number		4/32			
Stator slots	-	36			
Rotor inner/outer diameter	mm	32/100			
Stator outer diameter	mm	175			
Stack length	mm	110			
Air-gap length	mm	1			
Grade, remanence of PM	T	FB12H/ 0.46			
PM thickness	mm	3			
PM length	mm	5,7, 11,13	5,7, 11,13	9,9, 9,9	9,9, 9,9

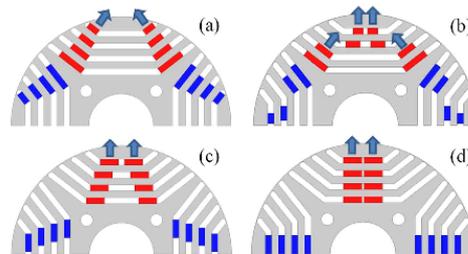


Fig. 2. Configuration of magnets. (a) Basic model. (b) Model 1. (c) Model 2. (d) Model 3.

Figura 51-Tabla con configuraciones de los imanes de cuatro modelos de motores

En este experimento se puede observar que las únicas diferencias entre los distintos diseños son: las distintas longitudes de los imanes y su disposición dentro del núcleo del rotor.

En los resultados que se obtuvieron se puede ver como el diseño 3 desarrolla algo más de par y también es el que menos rizado del par produce.

TABLE II
2-D FEM ANALYSIS RESULTS

Item	Unit	Basic Model	Model 1	Model 2	Model 3
No Load B-EMF	Vrms	28.57	28.27	29.28	29.30
THD of B-EMF	%	14.58	11.40	29.33	29.28
Cogging Torque	mN·m	98.36	65.45	175.25	153.52
Load B-EMF	Vrms	154.88	151.23	155.24	156.25
Torque	N·m	11.77	11.35	11.73	11.83
Torque ripple	%	21.8	30.8	19.3	17.6

Figura 52-Tabla con los resultados de los cuatro modelos de motores



7.5 Ejemplos de Reluctancia con Imanes Permanentes

7.5.1 Motor para Camiones de Borwarner

El fabricante de componentes para automóviles BorgWarner presento en febrero de 2021 un nuevo motor eléctrico destinado a propulsar vehículos comerciales pesados.

Su arquitectura se basará en unos devanados en los que los cables cilíndricos de los devanados se sustituyen por varillas. En un sistema eléctrico que funciona a 800 voltios, para lograr mayor densidad energética y tiempos de carga reducidos. Se ofrecerá en cuatro versiones que alcanzan una eficiencia máxima cercana al 97%. La entrada en producción está prevista para el año 2024. Los motores tienen lo que se denomina devanados en horquilla en los que las varillas de cobre sólido reemplazan a los devanados de cable de cobre clásicos. Esto significa que no hay cavidades entre los cables, lo que aumenta la densidad de potencia. Esta configuración permite alcanzar una eficiencia máxima del 97% y ofrecer más de 400 kW de potencia (536 CV).

Estos motores pueden llegar a alcanzar hasta 1.270 Nm de par, que facilita el arranque desde parado ofreciendo también una gran capacidad de recuperación de velocidad cuando el vehículo ya está lanzado, la electrónica de potencia permitirá cambiar su fase de funcionamiento para convertirlo en un generador capaz de recuperar la energía de las desaceleraciones y las frenadas introduciéndola en la batería, son precisamente los vehículos eléctricos pesados los que requieren mayores capacidades de batería para lograr autonomías que les permitan ser competitivos con otras tecnologías de propulsión.



Figura 53-Motor de Borgwarner

En este caso, utilizando un voltaje de 800 voltios se cubre la necesidad de reducir el tiempo de recarga, en el que el vehículo no es productivo.

Por lo tanto, en estos casos deben ser capaces de admitir potencias de recarga muy grandes, la potencia de salida de una estación de carga puede aumentarse incrementando el voltaje o la intensidad de salida. Si se mantiene el voltaje en 400 V, la habitual en la mayoría de los coches eléctricos, es necesario aumentar la intensidad. Sin embargo, la capacidad para soportar el aumento de esta en los pines situados en el conector que restringirían la potencia de salida a aproximadamente 100 kW. Por ello la solución técnica más apropiada es aumentar el voltaje de salida, manteniendo la intensidad. Si se dobla el voltaje hasta los 800 voltios, el tiempo de recarga para lograr 400 kilómetros de autonomía puede reducirse a entre 15 y 20 minutos sin variar los pines del conector.



Figura 54-Motor de Borgwarner cortado a la mitad



7.5.2 BMW i3



Figura 55-Motor de BMW con una porción cortada

BMW está avanzando en lo que parece la respuesta a alcanzar la mayor densidad de potencia y eficiencia unido al mínimo uso de imanes permanentes hechos de tierras raras.

El motor de 50 Kg que propulsa el BMW i3, genera 125 kW de potencia específica 2.5kW/Kg, esta potencia ofrecida de forma lineal, llegando hasta las 11.400 rpm.

En una patente registrada por BMW en 2012, los ingenieros describían como los motores síncronos de imanes permanentes generaban inductancia en dirección a los polos produciendo par de reluctancia cuando el motor se encontraba en movimiento, este par se sumaba al campo magnético de los imanes permanentes.

El motor de BMW es en un principio un motor síncrono con imanes permanentes, pero con características y dimensiones de los componentes, que están diseñados para producir auto imantación como en los motores de

reluctancia, esta excitación adicional provoca que el campo electromagnético de los polos se mantenga estable incluso a altas velocidades.

Este tipo de motores se puede construir con diferentes diseños, lo que los hace muy flexibles y abarata su coste, además se obtiene una mejor eficiencia a altas velocidades respecto a otros tipos de motores.

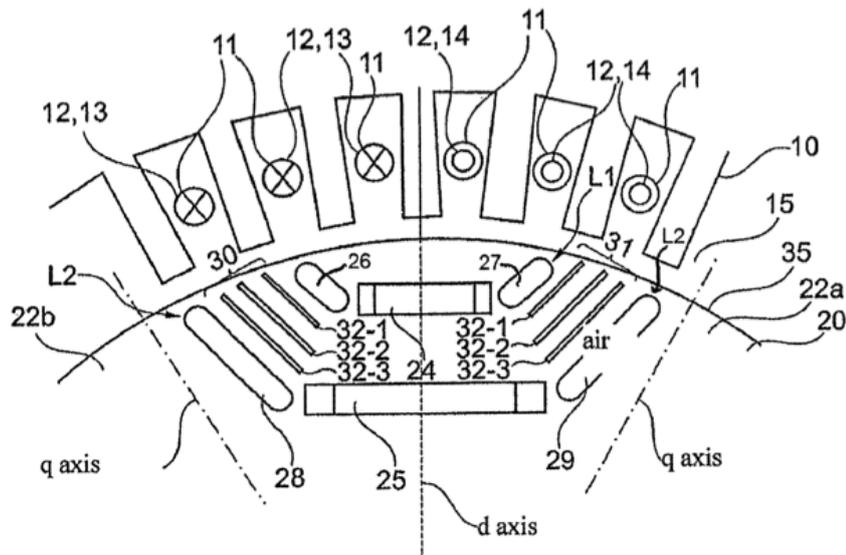


Figura 56-Esquema de la patente del Motor de BMW

La imagen muestra una propuesta de diseño patentada por BMW, que incrementaría la eficiencia, colocando dos imanes permanentes por cada polo y realizando unas ranuras específicamente colocadas, número de patente N° 2012/0267977

7.5.3 TESLA MODEL 3



Figura 57-Estator del motor de reluctancia con imanes permanentes

Con sus primeros modelos el fabricante Tesla Motors utilizaba motores de inducción, sin embargo, en 2017 comenzó a utilizar motores de reluctancia con imanes permanentes en el eje delantero de sus Model3.

Este movimiento era justificado, por los beneficios de la pre excitación de estos motores con imanes permanentes, su mayor eficiencia y su capacidad para poder ser acoplados a una transmisión de una sola velocidad al igual que los motores de inducción que usaban hasta el momento.

Otro factor es el aumento de la autonomía de los vehículos que ha sido mucho mayor gracias a estos motores.

La gran diferencia de rendimiento entre los dos motores es más apreciable si se circula por áreas urbanas, con muchas aceleraciones y paradas, en esta situación el motor de reluctancia con imanes permanentes es mucho más eficiente.

La competencia por obtener el vehículo más barato con la mayor autonomía, hace que se avance en motores más eficientes y baterías que pueden almacenar más energía en menos espacio.





8. Motores lineales

Los principios en los que están basados estos motores se estudiaron a finales de siglo 19, sin embargo, su primer uso práctico llegó en los años cincuenta del siglo 20 cuando el ingeniero inglés Eric Laithwaite construyó el primer prototipo de que se podría llamar “Maglev” tren de levitación magnética.

En contraste con el resto de motores, el estator no está dispuesto en forma de anillo o rodeando al rotor, como sugiere su nombre el estator está dispuesto de manera lineal, este tipo de motores puede trabajar con corriente continua o alterna, a su vez pueden ser de inducción o síncronos, actualmente los más usados son los motores lineales síncronos de corriente alterna.

Este tipo de motores son utilizados en grúas puente, transportadores sin cinta, trenes de alta velocidad y actuadores, en la actualidad también se estudia su uso para el transporte de mercancías por carretera.

En la actualidad se usan mayoritariamente como actuadores y transporte de objetos pesados, en todo tipo de industrias, en comparación con otros tipos de motores utilizados como actuadores, los motores lineales cuentan con algunas ventajas, como la ausencia de conversión del movimiento rotativo en lineal, lo que se traduce en menores pérdidas mecánicas, sin embargo, cuando se requiere una alta precisión en el posicionamiento, es necesario utilizar sensores ópticos que encarecen mucho los costes.

8.1 Funcionamiento

El funcionamiento está basado en la interacción entre el campo magnético del estator, el cual se desplaza a lo largo del mismo y el campo magnético del rotor o secundario que se desplazara a lo largo del estator.

La interacción de estos dos campos magnético da como resultado, una fuerza lineal que propulsa al rotor en la dirección del flujo.

El campo magnético del rotor puede estar generado por electroimanes, imanes superconductores o imanes permanentes.



8.2 Tipos

Los motores lineales síncronos se pueden clasificar en dos subtipos:

Carril guía activo: en el que los electroimanes que crea el campo magnético en movimiento se encuentran en el estator o también llamado primario y en el rotor o secundario se encuentra un campo magnético constante.

Carril guía pasivo: en este caso el campo magnético que se mueve es generado en el secundario, esto hace que la parte móvil sea muy pesada.

A su vez en función de la forma del estator o primario se pueden diferenciar otros tres tipos de motores lineales:

Motores Cilíndricos

Fueron los primeros en explotarse comercialmente, utilizando bobinados a lo largo de toda su longitud, incrementando la fuerza y el alcance de los antiguos actuadores magnéticos, pero siguen teniendo una longitud de actuación limitada.



Figura 58-Motores Lineales Cilíndricos

Motores con Canal en U

Este tipo tiene dos filas paralelas de imanes permanentes, entre las que discurre un secundario que contiene a los electroimanes y está unido a los cables de alimentación, la longitud de este motor puede ser tanta como nos permita el sistema de manejo del cable



Figura 59-Motores lineales con estator en U

Motores Planos

Este tipo es muy similar al anterior la única diferencia es que cuenta con solo una fila plana de imanes permanentes



Figura 60-Motores Lineales con estator plano

8.3 Ejemplo de uso del Motor Lineal

8.3.1 Tren de levitación magnética japonés (Shinkansen)



Figura 61-Tren Shinkansen

Este tren de alta velocidad japonés, es un prototipo de línea de alta velocidad que utilizando la tecnología de levitación magnética unida con los motores lineales, pretende reducir el tiempo de los trayectos en tren, con el objetivo de competir y sustituir en un futuro, a los vuelos de corta distancia entre ciudades importantes de un mismo país, lo que ahorraría la emisión de grandes cantidades de CO_2 a la atmosfera.

En esta aplicación del motor lineal se utilizan imanes superconductores que se sitúan en los laterales del tren, aportando suspensión y levitación al tren, se utilizan este tipo de imanes debido a las altas potencias necesarias además de ser más ligeros que los imanes permanentes y los electroimanes para la misma potencia.

Los raíles en forma de U contienen dos bobinas de metal cruzadas en forma de “ocho” que crean un campo electromagnético. Cuando está parado, el tren descansa sobre unas ruedas de caucho.

Al comenzar el movimiento, el tren avanza lentamente sobre ellas haciendo posible que los imanes situados bajo el tren interactúen con los de la vía. Una vez que el tren alcanza los 150 kilómetros por hora, la fuerza magnética creada



es lo suficientemente potente para elevar el tren 10 centímetros del suelo, eliminando la fricción y permitiendo incrementar la velocidad.

La misma fuerza magnética que eleva el tren hace que avance y se mantenga centrado sin salirse de la vía, lo que hace que viajar en él resulte muy agradable y excepcionalmente seguro.

En abril de 2015 un tren superconductor Maglev tripulado rompió los dos records de velocidad existentes de vehículos sobre raíles. El tren alcanzó los 603 kilómetros por hora.

La línea (Chuo Shinkansen) ha sido ideada para unir Tokio y Nagoya se prevé su finalización para el año 2027. Está previsto que el trayecto dure solo 40 minutos, menos tiempo que volando en avión entre las dos ciudades y también menos que la hora y media que se tarda en recorrer con la actual línea de tren. El objetivo inicial del proyecto era lograr un tren que pudiese cubrir la ruta de Tokio a Osaka en menos de una hora. Esta meta se alcanzará cuando la línea se prolongue desde Nagoya hasta Osaka, algo que está previsto que ocurra para el año 2045.





9. Motores de corriente continua.

El primer motor eléctrico fue construido y patentado por Thomas Davenport en 1837, pero no fue hasta casi 50 años después, cuando el primer motor práctico fue construido por Frank Julian Sprague en 1886.

Estos primeros motores fueron los que propulsaron los primeros coches y trenes eléctricos en los primeros años del siglo 20.

El otro salto en el diseño de estos motores se dio en 1962, cuando se construyó el primer motor sin escobillas con imanes permanentes, controlado por un conmutador sin escobillas, su uso no se extendió hasta los años ochenta, cuando los metales raros de los que están hechos los imanes empezaron a estar disponibles en grandes cantidades.

La ventaja fundamental de estos motores era su mayor flexibilidad para el control de la velocidad y del par, por esto se usaron en accionamientos industriales hasta finales del siglo 20.

Hoy en día está cayendo en desuso en la tracción eléctrica con la evolución de la electrónica, ya no se utilizan ni en trenes ni vehículos eléctricos, sin embargo, son ampliamente utilizados en electrodomésticos. En los últimos años se ha popularizado su uso gracias a los patinetes eléctricos un medio de transporte individual y asequible que representa una alternativa a los medios de transporte tradicionales.

9.1 Funcionamiento

Su funcionamiento está basado en la fuerza que se produce sobre un conductor eléctrico recorrido por una intensidad eléctrica en el seno de un campo magnético, según la Ley de Lorentz se define es fuerza como:

$$F = k * (B * L * I)$$

donde:

F = fuerza sobre el conductor en Newtons

B = Inducción del campo magnético en Teslas

L = Longitud del conductor en metros

I = Intensidad que recorre el conductor en amperios

k = número de conductores en caso de haber más de una espira

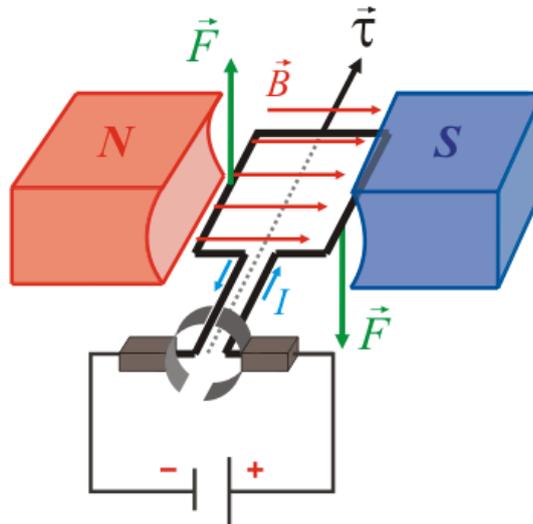


Figura 62- Esquema de fuerzas sobre un conductor electrificado

Como acabamos de ver según la Ley de Lorentz, el conductor por el cual circula la corriente eléctrica se convertirá en un electroimán en el cual se producirá una fuerza, similar a la fuerza de repulsión que ejercen los polos magnéticos de un imán cuando interactúan con los polos magnéticos de un electroimán que se encuentra montado en un eje.

Cuando la corriente eléctrica circula por la bobina del rotor, el campo electromagnético que se genera interactúa con el campo magnético permanente del estator. Si los polos del estator y del rotor coinciden, se produce un rechazo y por lo tanto un par magnético lo cual hace que el rotor gire, el sentido dependerá de la polaridad en la que los terminales del motor de corriente continua estén conectados a la fuente de corriente continua.

Se pueden diferenciar dos tipos motores de corriente continua en función de cómo crean el campo magnético.

9.2 Tipos

9.2.1 Con arrollamientos

Mediante unos arrollamientos entorno a un núcleo de acero, este método es empleado en motores grandes, estos arrollamientos componen los polos principales del estator del motor, en caso de los motores de una potencia grande, se alternan junto con otros polos auxiliares o de conmutación los

cuales son macizos y cuya misión es evitar en la medida de lo posible el chisporroteo en el contacto entre las delgas y las escobillas en el colector.

Para poder llevar la corriente hasta el rotor y generar ese campo magnético, cuentan con lo que se denomina colector de delgas, este sirve para conmutar constantemente el sentido de circulación de la corriente eléctrica través del bobinado del rotor a la vez que gira, haciendo que sus polos conmuten constantemente. De esta forma el polo norte del estator coincidirá siempre con el polo norte del rotor e igualmente pasará con los polos sur.

Como resultado, cuando en el rotor se forma polo norte, de inmediato también el polo norte del estator lo rechaza. Al mismo tiempo el polo sur que se forma en el polo opuesto, es rechazado por el polo sur del estator, por lo tanto, se produce una fuerza de repulsión en ambos extremos del rotor.

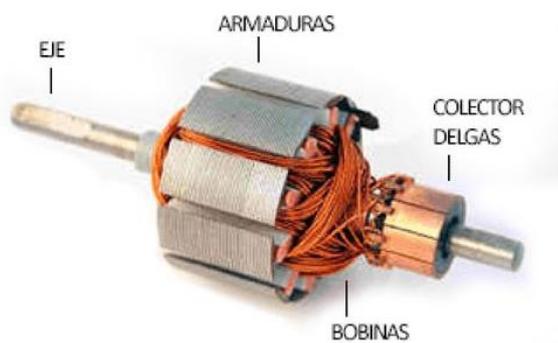


Figura 63- Rotor del motor de corriente continua

Es por esa razón, por la cual el mantenimiento del colector de delgas es la parte más importante dentro del motor de corriente continua, su limpieza y mantenimiento de las escobillas de grafito, que van rozando constantemente con el colector es una parte fundamental para su buen funcionamiento

9.2.2 Con imanes permanentes

Un motor brushless se diferencia de los tradicionales, descritos anteriormente, en que el rotor está formado por imanes permanentes, esto hace que no se necesario el colector de delgas, reduciendo los mantenimientos y alargando la vida útil del motor.

Los motores sin escobillas pueden alcanzar una larga vida útil de decenas de miles de horas, solo limitada por el desgaste de los rodamientos.

El estator de este tipo de motores se basa en la agrupación de tres bobinas, colocadas eléctricamente a 120° para generar el campo magnético giratorio del motor.

En cuanto al control, en función de las necesidades de precisión y ajuste, deberemos seleccionar qué tipo de control necesitamos: bucle abierto o bucle cerrado y qué modo de funcionamiento debe tener, uno o cuatro cuadrantes.

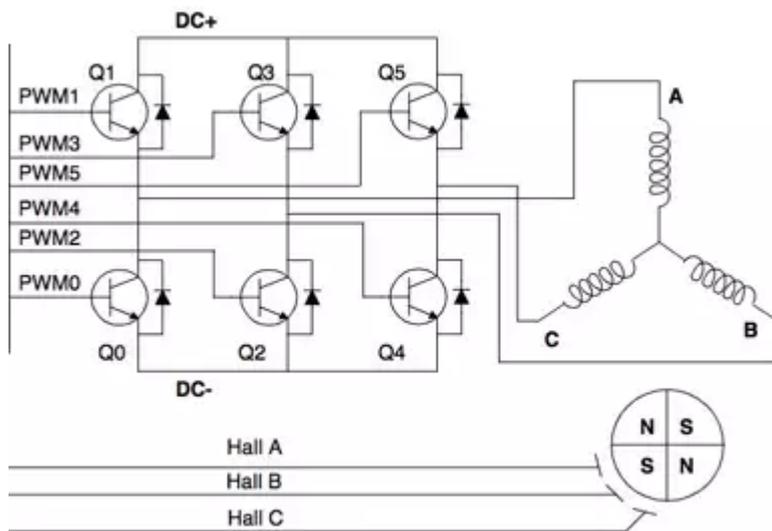


Figura 64- Esquema de transistores para control

En la figura superior podemos ver el esquema más común de conmutación en un motor sin escobillas, con la apertura y cierre de los transistores se completa la secuencia de la conmutación del estator.

Es necesario llevar un orden correcto a la hora de ejercer esta conmutación por lo que se precisa de una lógica de control. La conmutación secuencial de estas bobinas se puede basar en las señales de la posición del rotor, generadas por los sensores Hall, por una electrónica de conmutación en bloque, gracias a la que se pueden alcanzar pares más elevados en el arranque, o si la conmutación es sinusoidal, el funcionamiento del motor es más suave y el par en funcionamiento en continuo es mayor.

Lo más utilizado para dar información sobre la posición del rotor son los sensores Hall, de esta manera la lógica de control toma una referencia para pilotar la apertura de dichos transistores.



Gracias a la electrónica de control somos capaces de regular la tensión aportada al motor y la intensidad, de esta manera ejercemos un control total sobre el motor.

La regulación del voltaje nos permite variar la velocidad de rotación, e incluso invertir el sentido de giro (tensión negativa) y el control de la intensidad nos permite variar el par aportado por el motor siendo capaces incluso de frenar invirtiendo la intensidad aportada (intensidad negativa).

Además, gracias a el control de posición angular aportado por los sensores Hall seríamos capaces de pararnos en una posición deseada y mantenerla venciendo fuerzas externas o la propia inercia de la carga aportando el par deseado.

9.3 Ejemplo de uso, los patinetes eléctricos



Figura 65- Patinete de Xiaomi

A finales del 2016 la compañía china Xiaomi lanzó al mercado su primer patinete eléctrico asequible el M365, desde ese momento hasta la actualidad la cantidad de patinetes eléctricos ha ido en aumento, su uso se generalizó tan rápido que las ciudades tuvieron que crear normativas de circulación específicas para ellos en un breve periodo de tiempo, limitando su velocidad a 25km/h y delimitando las zonas por donde debía circular, en la actualidad representa un medio de transporte individual muy accesible, que ayudara a

reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y las congestiones de coches en las grandes ciudades.

Existen actualmente muchos modelos, pero en general cuentan con una batería de ion litio, un motor de corriente continua con imanes permanentes, un acelerador, un freno de disco y una pantalla que indica la velocidad y el estado de la carga de la batería.

El motor en la mayoría está incorporado en una de las ruedas.

Como podemos ver en las figuras de abajo el rotor de estos motores va por fuera del estator, en este caso es un motor de 250 w con unos 16 Nm



Figura 66- Estator y Rotor situados en el interior de la rueda

El estator cuenta con 27 electroimanes y el rotor con 30 imanes permanentes de neodimio, los 27 electroimanes están divididos en 9 grupos de tres polos que están separados entre sí 120°

El control de la conmutación se realiza mediante un sensor Hall que podemos ver en la imagen inferior, cuando fluye una corriente a través de un sensor Hall y éste se aproxima a un campo magnético perpendicular a la corriente, entonces se crea en el sensor una tensión proporcional al producto de la intensidad del campo magnético y de la corriente. Gracias a este principio mediante un disco magnético acoplado al eje del motor podemos detectar la posición del rotor.



Figura 67- Sensores Hall en el estator del motor



10. Comparación de los distintos motores

En este apartado recopilaremos y compararemos las características principales de todos los motores de los que hemos hablado con anterioridad.

Con el objetivo de comprender y visualizar sus diferencias.

Parece claro que la selección del motor, para una determinada aplicación, debería ser la de mayor rendimiento, sin embargo, otros factores como el peso reducido (alta densidad de potencia), bajo coste, mínimo mantenimiento, fácil control y bajo ruido influyen de un modo determinante.

10.1 Rendimiento

La definición de rendimiento de un motor eléctrico no es fácil, ya que en ella influyen muchos factores entre ellos el tamaño o la velocidad de giro, por lo que no facilita la expresión de un método estandarizado.

No obstante, es posible llegar a algunas conclusiones.

En la figura 67 se pueden observar los rendimientos de 4 motores de reluctancia síncrona, donde se observa que cuanto mayor es la potencia mayor es su rendimiento a una velocidad constante.

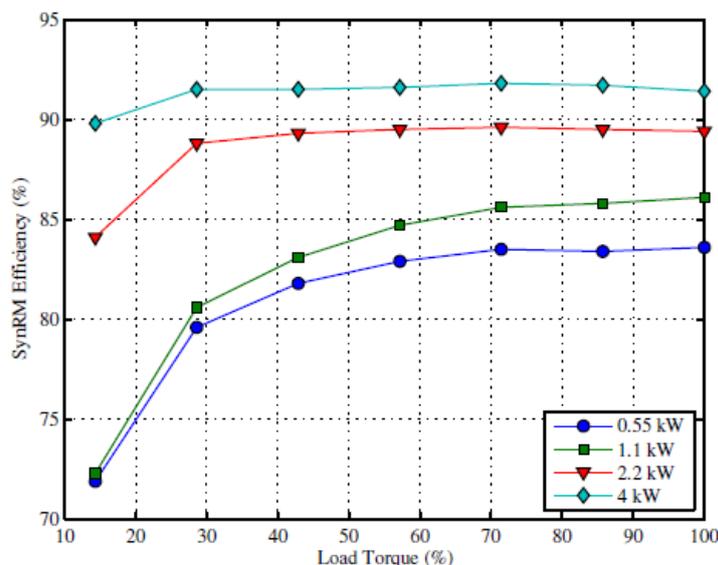


Figura 68- rendimiento de motores de reluctancia síncrona a 1500 rpm en función de su potencia

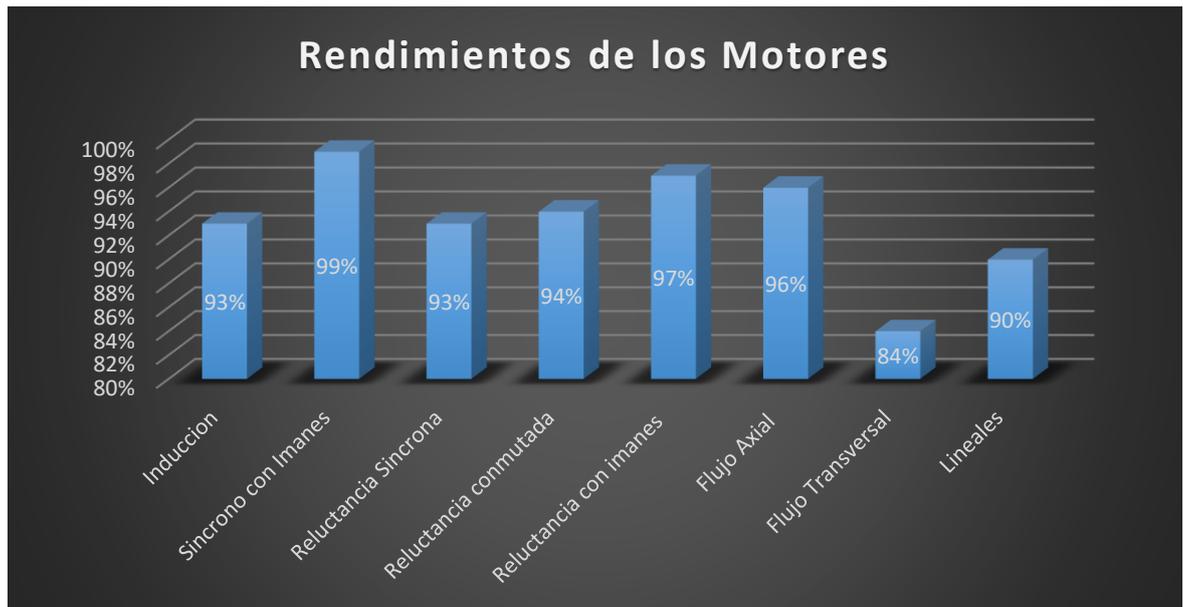


Figura 69- rendimiento de los motores

En este gráfico podemos observar las máximas eficiencias alcanzadas por los distintos tipos de motores, estos rendimientos son algo subjetivos ya que son aportados por los fabricantes.

La conclusión a la que llegamos con el gráfico, es que los motores de flujo transversal son sobre los que menos se ha investigado, esto se traduce en los rendimientos que alcanza, entre un 10% y un 8% inferiores al resto.

A pesar de ello, su rendimiento es muy superior al de cualquier motor de combustión interna.

También se puede observar que los motores con los mayores rendimientos utilizan imanes permanentes, esto se debe a los fuertes campos magnéticos que generan, sin apenas pérdidas.

Otro factor que influye en el rendimiento de un motor es la carga a la que está trabajando, cuanto más cerca trabaje el motor de su carga nominal su rendimiento será mayor.

Como podemos ver en la figura 70 en un motor de inducción El rendimiento es grande un para cierto valor del deslizamiento que debería ser el deslizamiento nominal del motor. Esto exige un adecuado dimensionamiento de estos motores. Por ejemplo, no deben utilizarse para potencias muy inferiores a la nominal indicada por el fabricante, pues el deslizamiento se acercaría a cero y el rendimiento sería muy bajo.

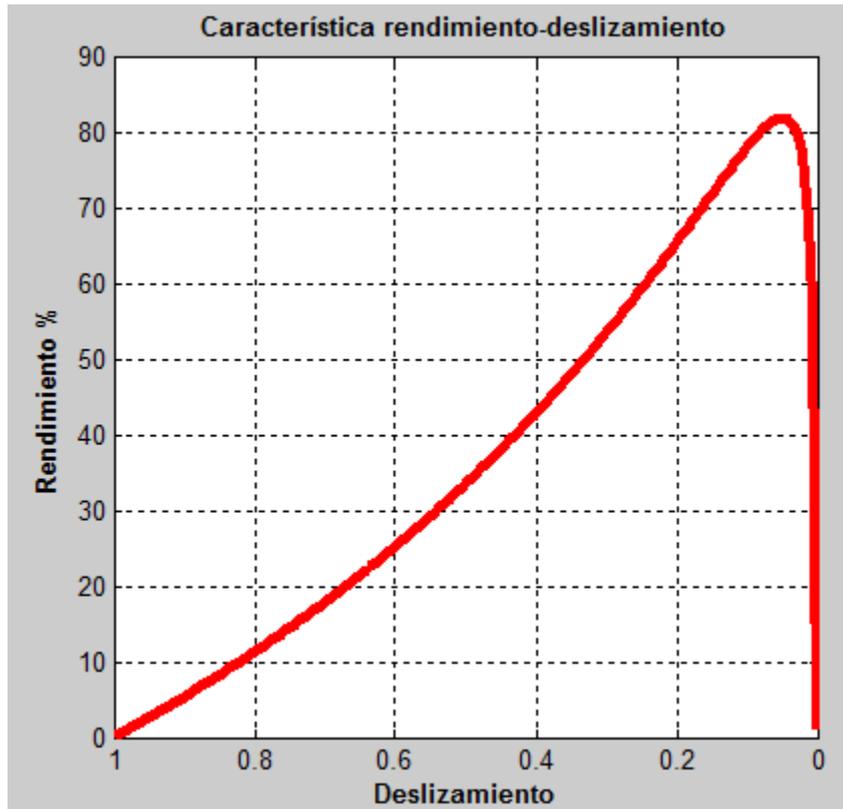


Figura 70- rendimiento de los motores de inducción

10.2 Densidad de potencia

Un motor eléctrico debería ser, generalmente, lo más pequeño y ligero posible compatible con la potencia requerida.

Una buena densidad de potencia unido a un rendimiento elevado, proporcionarían una mayor autonomía al vehículo.

Los motores de mayor rendimiento como los de imanes permanentes y reluctancia síncrona con imanes, tienen mayor densidad de potencia que los de inducción.

La figura 69 muestra un mapa de potencias específicas de diferentes motores a distintas potencias.

Tomando como ejemplo el motor de imanes permanentes, se puede observar que el método de refrigeración utilizado marca importantes diferencias.

La razón es que cuando son refrigerados por aire, un mayor tamaño implica una mayor superficie de disipación. Si el motor está refrigerado por líquido, entonces el mismo calor se puede extraer de un motor más pequeño.

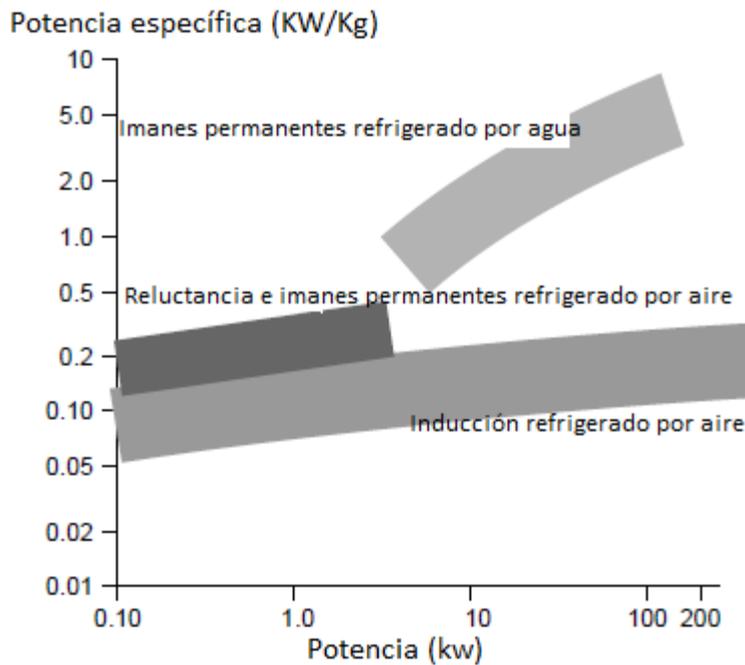


Figura 71- mapa de potencias específicas

Esta grafica nos indica porque la mayoría de los motores, usados para tracción, están refrigerados por líquidos o aceite.

En la actualidad también se están desarrollando motores de inducción refrigerados por líquido que aumentan su densidad de potencia, por ejemplo, en el Audi E-Tron.

10.3 Costes

Como es de esperar los motores con imanes permanentes son los que tiene un mayor coste, los motores de flujo transversal, síncronos, flujo axial y lineales son los que más cantidad tienen.

Los motores de reluctancia síncrona con imanes tienen una menor cantidad de estos. Además, se están usando imanes que no están hechos de tierras raras lo cual desciende aún más su coste

En un segundo escalón estarían los motores de reluctancia síncrona y conmutada de diseño complejos, pero con una baja cantidad de cobre los que los hace tener un coste moderado

Por último, los motores de inducción, los más sencillos de construir, con un coste muy contenido y que cada vez tiene una cantidad de cobre menor y mejor utilizada.





11. Conclusiones

Los vehículos de tracción eléctrica ya eran viables hace 100 años.

Sin embargo, no ha sido hasta esta última década, en la que, empujados por una conciencia climática mayor, su desarrollo e investigación está viviendo su segunda edad dorada.

Como hemos podido comprobar hay dos tipos de motores que se están usando de manera más numerosa en estos vehículos, los motores de reluctancia síncrona con imanes permanentes y los asíncronos o inducción. Utilizados por los distintos fabricantes en función de cuál se adapta mejor a las necesidades de cada vehículo.

Hemos visto que existen otros tipos que tiene unas características únicas, sin embargo, tienen una menor eficiencia y una mayor complejidad en su diseño, estos tipos de motores seguirá aumentando su eficiencia y aplicaciones en los próximos años.

Todos ellos ayudando en la descarbonización de los transportes por carretera de pasajeros y mercancías.

Creo que los objetivos de este trabajo de fin de grado han sido alcanzados.

En el ámbito personal me ha servido para comprender mucho mejor los motores eléctricos.

Además, me alegra saber que el grado que he estudiado tiene un gran futuro por delante no solo en la generación y transporte de energía eléctrica.





12. Bibliografía

- Maquinas eléctricas- Jesús Fraile Mora (7ªEdicion)
- Calculo Industrial de Maquinas Eléctricas- Juan Corrales Martin
- Apuntes de la asignatura de accionamientos
- Apuntes de la asignatura de tracción
- Variación de velocidad de motores asíncronos- M.A.Rodríguez
- Catálogos ABB
- Catálogos Tesla Motors
- Catálogos Audi
- Catálogos Siemens
- Brusheless Permanent-Magnet Motor Design- Dr. Duane C. Hanselman
- Theoretical and Experimental Investigations of a Permanent Magnet Excited Transverse Flux Machine with a Segmented Stator for In-Wheel Motor Applications -S. Baserrah (2014).
- Linear Synchronous Motors For Maglev- Richard D. Thornton, David Perreault, Tracy Gark, Massachusetts Institute of Technology (1993)
- Linear Motor-Powered Transportation: History,Present Status, and Future Outlook-Rolf Hellinger y Peter Mnich (2009)





13. Webgrafía

Fecha de consulta (5/03/2021)

- Belgian startup Magnax has found a way to mass-produce the axial-flux motor- Daan Moreels y Peter Leijnen-(2019)- disponible en: <https://spectrum.ieee.org/transportation/alternative-transportation/this-insideout-motor-for-evs-is-power-dense-and-finally-practical>

-Linear Motors-Application Guide, Aerotech-(2020)- disponible en: <https://www.aerotech.com/linear-motor-application-guide>

-United States Patent Application Publication N° 2012/0267977 (2009)- disponible en: <https://patents.google.com/patent/US20120267977A1/en>

Fecha de consulta (7/03/2021)

-Who invented the induction Motor-(2020)-T.puiu- disponible en: <https://www.zmescience.com/science/history-science/history-induction-motor/#:~:text=The%20first%20induction%20m>

-Tesla Polyphase Induction Motors-(2020)- disponible en: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-13/tesla-polyphase-induction-motors/>

- Working of Tesla cars-(2018)- Rajat Kumar Pal -disponible en: <https://estudiarx.blogspot.com/2018/10/tesla.html>

- BorgWarner Launches 800-volt Electric Motor for the Commercial Vehicle Segment-(2019)- Auburn Hills- disponible en: <https://www.borgwarner.com/newsroom/pressreleases/2021/02/10/borgwarner-launches-800-volt-electric-motor-for-the-commercial-vehicle-segment>

- Slip ring Induction Motor, ¿How it works? -(2019)- disponible en: <https://learnengineering.org/slip-ring-induction-motor-how-it-works.html>

- Slip-ring modular motors-(2020)- disponible en: <https://new.abb.com/motors-generators/high-voltage-induction-motors/slip-ring-modular-motors>

Fecha de consulta (9/03/2021)

- BorgWarner To Supply Electric Motors For Plug-In Hybrid Truck-(2019)- Mark Kane- disponible en: <https://insideevs.com/news/342972/borgwarner-to-supply-electric-motors-for-plug-in-hybrid-truck/>



-Audi opting for induction motor technology in its e-tron EV -(2019)- David Merriman - disponible en: <https://roskill.com/news/rare-earths-audi-opting-for-induction-motor-technology-in-its-e-tron-ev/>

Fecha de consulta (10/03/2021)

-What kind of electric drive units/motors are Audi using on their e-tron-(2020)

- disponible en: <https://github.com/etrondriver/etron-issues/issues/53>

-Audi drive concept for e-tron S-models-(2020)- disponible en:

<https://www.greencarcongress.com/2020/03/20200306-audi.html>

Fecha de consulta (15/03/2021)

-Electrobat, el primer coche eléctrico -(2011)- Ariel Palazzesi- disponible en:

<https://www.neoteo.com/electrobat-el-primer-coche-electrico-1894/>

-Worth the Watt: A Brief History of the Electric Car, 1830 to Present-(2018)-

Kevin A. Wilson - disponible en:

<https://www.caranddriver.com/features/g15378765/worth-the-watt-a-brief-history-of-the-electric-car-1830-to-present/>

-A Brief History and Evolution of Electric Cars-(2020)- Christopher McFadden -

disponible en: <https://interestingengineering.com/a-brief-history-and-evolution-of-electric-cars>

-The History of the Electric Car-(2014)- disponible en:

<https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>

Fecha de consulta (16/03/2021)

-Audi opting for induction motor technology in its e-tron EV -(2019)- David

Merrima- disponible en: <https://roskill.com/news/rare-earths-audi-opting-for-induction-motor-technology-in-its-e-tron-ev/>

-A Permanent Magnet Synchronous Motor for Traction Applications of Electric Vehicles -(2003)- Y.K. Chin, Juliette Soulard- disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/4022594_A_permanent_magnet_synchronous_motor_for_traction_applications_of_electric_vehicles



-El sistema de propulsión del Porsche Taycan-(2021)- disponible en:

https://newsroom.porsche.com/es_ES/producto/taycan/es-sistema-de-propulsion-20249.html

-NEODYMIUM IRON BORON MAGNETS-(2019)- disponible en:

<https://www.arnoldmagnetics.co.uk/products/neodymium-iron-boron-magnets/>

- How to ensure EV traction motor magnets aren't pushed beyond their operating limits-(2020)-Tom Lombardo- disponible en:

<https://chargedevs.com/features/how-to-ensure-ev-traction-motor-magnets-arent-pushed-beyond-their-operating-limits/>

-Vector Control for PMSM-(2014)- Mingyu Gao- disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/288070294_Vector_control_for_PMSM

Fecha de consulta (17/03/2021)

- VECTOR CONTROL OF INDUCTION MACHINES USING IMPROVED MACHINE MODELS-(1998)-MATIJA SOKOLA- disponible en:

<https://core.ac.uk/reader/74237560>

- INDUCTION MOTOR MODELLING FOR VECTOR CONTROL PURPOSES-(2000)- Mircea Popescu - disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/269517505_INDUCTION_MOTOR_MODELLING_FOR_VECTOR_CONTROL_PURPOSES

Fecha de consulta (25/03/2021)

-SMC cores in Honda's prototype Transverse Flux Motor for hybrid powertrains-(2013)- D. Takizawa- disponible en:

<https://www.pm-review.com/smc-cores-in-hondas-prototype-transverse-flux-motor-for-hybrid-powertrains/>



- Rim driven thruster having transverse flux motor-(2010)- Jacek F.

Gieras Gregory I. Rozman- disponible en:

<https://patents.google.com/patent/US8299669B2/en>

-SMALL BUT MIGHTY: HOW COMPACT TFM E-MOTORS DELIVER IN PERFORMANCE-(2018)- disponible en:

<https://www.gknpm.com/en/innovation/electrification/soft-magnetic-composites/tfm-case-study/>

-GKN Sinter Metals to promote its innovative Transversal Flux Motor at the CWIEME-(2013)- disponible en:

<https://www.pm-review.com/gkn-sinter-metals-to-promote-its-innovative-transversal-flux-motor-at-the-cwieme-2013/>

Fecha de consulta (26/03/2021)

-Reluctance Motor Chapter 13 - AC Motors-(2019)- disponible en:

<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-13/reluctance-motor/>

-Switched Reluctance Motor (SRM) Construction, Working, Types, Advantages-(2018)- disponible en:

<https://www.electrical4u.net/induction-motor/switched-reluctance-motor-srm-construction-working-types-advantages/>

-Switched Reluctance Motors-(2019)- Joseph Alvarado- disponible en:

<https://electricmotorcycle.com/switched-reluctance-motors/>

Fecha de consulta (27/03/2021)

- Analysis and Application of a Hybrid Motor Structure Convenient to Modify the Magnet and Reluctance Torques on the Rotor-(2012)- Esra Kandemir Beser-- disponible en:

<http://koreascience.or.kr/article/JAKO201215239617475.pdf>

- BMW's hybrid motor design seeks to deliver high efficiency and power density with lower rare earth use-(2013)- disponible en:

<https://www.greencarcongress.com/2013/08/bmw-20130812.html>



-Design of Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor for Maximized Back-EMF and Torque Ripple Reduction-(2017)- disponible en:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7845596>

Fecha de consulta (30/03/2021)

-A New Generation of Axial Flux EV Motors-(2018)- Kevin Clemens- disponible en:

<https://www.magnax.com/magnax-blog/a-new-generation-of-axial-flux-ev-motors>

-This Inside-Out Motor for EVs Is Power Dense and (Finally) Practical-(2019)- Daan Moreels y Peter Leijnen- disponible en:

<https://spectrum.ieee.org/transportation/alternative-transportation/this-insideout-motor-for-evs-is-power-dense-and-finally-practical>

- Alta potencia y máxima eficiencia: Magnax quiere revolucionar el coche eléctrico con un motor axial-(2018)- Carlos García Oliva- disponible en:

<https://www.autonocion.com/magnax-motor-electrico-flujo-axial/>

- Secrets of the electrified Ferrari SF90 Stradale-(2020)- John Carey - disponible en: <https://evcentral.com.au/secrets-of-the-electric-ferrari-sf90-stradale/>

- Why the Ferrari SF90 Stradale's new e-motor is insane-(2020)- Louis CORDONY- disponible en:

<https://www.whichcar.com.au/features/ferrari-sf90-stradale-hybrid-tech-talk>

Fecha de consulta (1/04/2021)

- Tesla Model 3 Motor-(2018)- Steve Bakker- disponible en:

<https://cleantechnica.com/2018/03/11/tesla-model-3-motor-in-depth/>

-Switched Reluctance Motors-(2019)- Joseph Alvarado- disponible en:

https://electricmotorcycle.com/switched-ireluctance-motors/iaos4wMTA0MjAyMQ&v=esUb7Zy5Oio&feature=emb_title



Fecha de consulta (2/04/2021)

- Electric vehicle traction motors without rare earth magnets-(2015)- James D.Widmer- disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993715000032>

- Motor Control System for Electric Two Wheelers, E-Autos and Other Electric Vehicles-(2019)- disponible en:

<https://www.embitel.com/automotive-insights/how-does-motor-control-system-work-for-electric-vehicles>

Fecha de consulta (3/04/2021)

-Tesla Model S Drive Unit now has Infinite Mile Warranty-(2014)- disponible en: <http://www.electric-vehiclenews.com/2014/08/tesla-model-s-drive-unit-now-has.html>

- History of Tesla: Timeline and Facts-(2020)- ERIC REED- disponible en:

<https://www.thestreet.com/technology/history-of-tesla-15088992>

- Design Considerations of High Voltage Battery Packs for Electric Buses-(2016)- Emrah Yirik- disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/316624177_DESIGN_CONSIDERATIONS_OF_HIGH_VOLTAGE_BATTERY_PACKS_FOR_ELECTRIC_BUSES

Fecha de consulta (4/04/2021)

-What kind of electric drive units/motors are Audi using on their e-tron-(2020)- disponible en:

<https://github.com/etrondriver/etron-issues/issues/53>

-Audi drive concept for e-tron S-models: three motors, new quattro generation with electric torque vectoring-(2020)- disponible en:

<https://www.greencarcongress.com/2020/03/20200306-audi.html>

-Audi joins the class of 2019 with the e-tron-(2019)- disponible en:



<https://chargedevs.com/features/audi-joins-the-class-of-2019-with-the-e-tron/>

Fecha de consulta (5/06/2021)

- Electrobat, el primer coche eléctrico (1894)- (2011)- Ariel Palazzesi - disponible en:

<https://www.neoteo.com/electrobat-el-primer-coche-electrico-1894/>

- Worth the Watt: A Brief History of the Electric Car, 1830 to Present-(2018)- KEVIN A. WILSON- disponible en:

<https://www.caranddriver.com/features/g15378765/worth-the-watt-a-brief-history-of-the-electric-car-1830-to-present/>

-A Brief History and Evolution of Electric Cars-(2020)- Christopher McFadden- disponible en:

<https://interestingengineering.com/a-brief-history-and-evolution-of-electric-cars>

-The History of the Electric Car-(2014)- Department of Energy- disponible en:

<https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>

Fecha de consulta (6/06/2021)

- Tipos de motores eléctricos para transporte unipersonal-(2016)- SEOLOGIC_ADMIN- disponible en:

<https://www.monocicloselectricos.org/sin-categoria/iman-es-electrocamnes-permanentes.html>

Fecha de consulta (23/06/2021)

- The Japanese Maglev: World's fastest bullet train-(2019)- disponible en:

<https://www.jrailpass.com/blog/maglev-bullet-train>

- Linear Motor Basics-(2017)- disponible en:

<https://www.automate.org/blogs/linear-motor-basics>

- Linear and Rotary Motors by Linmot-(2020)- disponible en:

<https://www.airoil.com/products/view/670/linear-and-rotary-motors.html>