Diseño de un motor síncrono con imanes de ferritas para motocicleta eléctrica.

Harry Nick Aguilar Gamarra

Departamento de Ingeniería Eléctrica (DEE),
Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú (EPSEVG),
Av. Victor Balaguer 1, 08800 Vilanova i la Geltrú, Barcelona.

Resumen

El esperado incremento de ventas de las motocicletas eléctricas, hace que se busquen nuevas mejoras en los motores de tracción eléctrica. En el presente proyecto se lleva a cabo el diseño de un motor síncrono con imanes de ferritas (PMSM) para una motocicleta eléctrica, como alternativa a los motores que utilizan imanes de NdFeB. Se muestran los cálculos del dimensionamiento del motor, se realiza el análisis con elementos finitos a partir del cual se obtienen los parámetros del motor y se proponen soluciones constructivas originales. Finalmente se hace la evaluación del rendimiento del motor y se comentan posibles mejoras.

1. Introducción

La actual situación mundial sobre la contaminación hace que se tengan que reducir las emisiones contaminantes (CO_2, CO, Hidrocarburos…). Esto afecta a los vehículos con motor de combustión interna, los fabricantes de los cuales han desarrollado vehículos eléctricos e híbridos, con pocas o ninguna emisión de CO_2. En este apartado las motocicletas han tenido una rápida adaptación a la propulsión eléctrica y en algunos países del este de Asia con un gran éxito de ventas. Gran parte de las motocicletas eléctricas usan motores síncronos de imanes permanentes (PMSM), estos motores disponen de una gran densidad de potencia y un gran rendimiento. Estos es debido en parte ha que la mayoría usan imanes de tierras raras como el NdFeB. Su elevado precio de estos y el echo que su producción dependa mayoritariamente de China, hacen que estén dentro del grupo de materiales críticos que pueden comprometer el desarrollo de las "tecnologías" verdes, por eso se buscan alternativas para poder reducir la dependencia de estos materiales[1]–[7]. Una de las tecnologías es la utilización de los imanes de ferritas, debido a su bajo precio en comparación con los imanes de tierras raras. Los imanes de ferritas tienen en contra unos valores de inducción remanente Br del orden de tres veces inferior, además cuentan con un campo coercitivo Hc del orden de cuatro veces inferior.

Estos inconvenientes hacen que se tenga que buscar un diseño que compense la inferioridad de los imanes de ferritas sin que el motor tenga unas dimensiones excesivamente mayores a las de un motor con imanes de NdFeB.

En el presente proyecto se ha llevado a cabo el diseño de un motor síncrono de imanes permanentes de ferritas como motor de tracción para una motocicleta eléctrica, el cual a través de una transmisión mecánica de relación 10:1, entrega una potencia de 4 kW, alimentado de una batería a 48 Vdc a través de un controlador electrónico. Este diseño del motor parte de unas limitaciones estructurales, así como de unas características impuestas por la motocicleta que ha de impulsar.

En este documento se presenta el dimensionamiento del motor según los parámetros establecidos, posteriormente se muestran los resultados obtenidos mediante las simulaciones con elementos finitos a partir de las cuales se obtendrán sus parámetros. Finalmente se muestran los datos del rendimiento del motor y se exponen las conclusiones derivadas del estudio realizado.

2. Motor PMSM

Se ha modelado el motor PMSM utilizando el modelo fasorial de las máquinas de corriente alterna. Para particularizar este modelo a las máquinas sincronías con imanes, se escoge la referencia solidaria con el rotor (d, q) y el circuito equivalente propuesto por Leonhard, Figura 3, donde los imanes se substituyen por dos fuentes de corriente dispuestas de la forma que se muestra en la Figura 3.

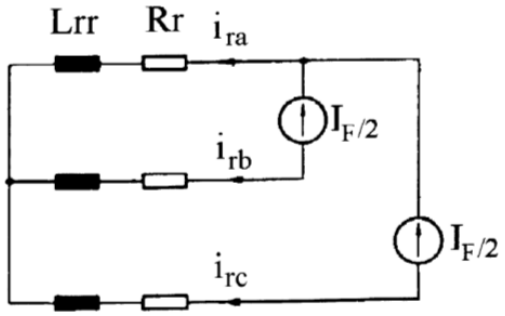

Figura 1. Circuito rotórico equivalente de un motor síncrono con imanes exteriores.

Aplicando este circuito equivalente de Leonhard a las máquinas con distintos valores de inductancia según los ejes d y q, se obtienen las siguientes ecuaciones que caracterizan a este tipo de máquinas[8].

$$v_{sd} = R * i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_r * \psi_{sq} \quad (1)$$

$$v_{sq} = R * i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} - \omega_r * \psi_{sd} \quad (2)$$

$$\psi_{sd} = L_s * i_{sd} + L_m * I_F = L_s * i_{sd} + \emptyset_F \quad (3)$$

$$\psi_{sq} = L_s * i_{sq} \quad (4)$$

En régimen permanente:

$$v_{sd} = R * i_{sd} - \omega_r * L_{sq} * i_{sq} \quad (5)$$

$$v_{sq} = R * i_{sq} + \omega_r * L_{sd} * i_{sd} + \omega_r * \emptyset_F \quad (6)$$

$$T = -\frac{3}{2} * p[(L_{sd} - L_{sq}) * i_{sd} * i_{sq} + \emptyset_F * i_{sq} \quad (7)$$

El par motor tiene dos componentes, la debida a la interacción entre el flujo de los imanes y la componente q de la corriente y la de reluctancia consecuencia de la diferencia entre las inductancias del eje d y eje q.

Donde:
v_{sd}: Tensión del estator en referencia rotórica d (V).
v_{sq}: Tensión del estator en referencia rotórica q (V).
i_{sd}: Corriente del estator en referencia rotórica d (A).
i_{sq}: Corriente del estator en referencia rotórica q (A).
ψ_{sd}: Flujo concatenado del estator en referencia rotórica d.
ψ_{sq}: Flujo concatenado del estator en referencia rotórica q.
R: Resistencia del estator.
L_{sd}: Inductancia estator referida al eje d (H).
L_{sq}: Inductancia estator referida al eje q (H).
ϕ_F: Flujo del imán permanente (Wb).
T: Par motor (Nm).

Existen diferentes modelos de motores PMSM dependiendo la disposición del rotor y de los imanes en el rotor, motores de rotor exterior Figura 1 o rotor interior Figura 2.

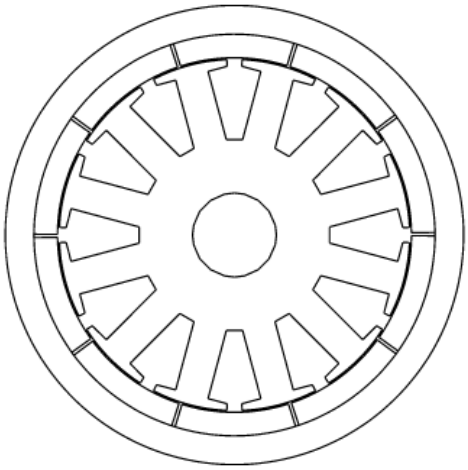

Figura 2. PMSM rotor exterior

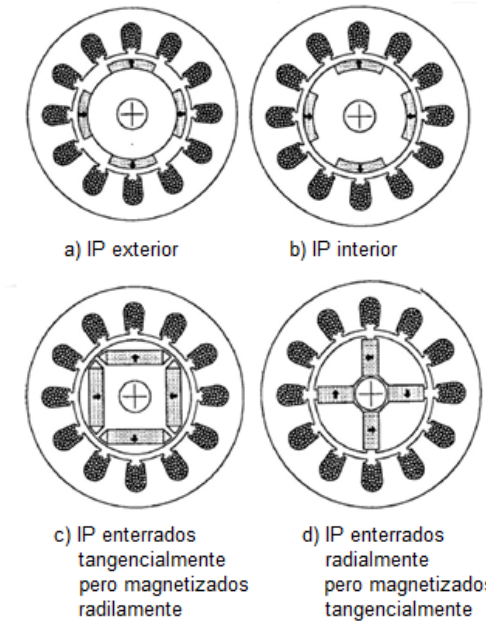

Figura 3. PMSM rotor interior

Dependiendo de la aplicación del motor, se elegirá el tipo de montaje más conveniente.

Los motores con rotor exterior son la mejor elección para motores de tracción directa dispuestos en el interior de la rueda. Los imanes son de NdFeB y la componente del par de reluctancia es prácticamente nula.

Los motores con rotor interior se clasifican en PMSM con imanes exteriores y PMSM con imanes interiores, el la tabla 1 se muestran sus principales características.

Tabla 1. Comparación configuración de los imanes en el PMSM

PMSM con imanes exteriores	PMSM con imanes interiores o enterrados
Imanes exteriores colocados sobre el rotor.	Imanes interiores asociados con piezas polares.
Constitución mecánica simple.	Constitución mecánica compleja.
$Br>B_\delta$ no es posible concentración de flujo.	$B_\delta>Br$, es posible la concentración de flujo.
La inductancia es independiente de la posición del rotor.	La inductancia depende de la posición del rotor.
Par de reluctancia negligible.	Importante par de reluctancia.
Maquina mal adaptada para trabajar a potencia constante.	Buen funcionamiento a potencia constante a elevadas velocidades.

El PMSM que se ha elegido para el diseño del motor es el motor con imanes interiores dispuestos radialmente pero magnetizados tangencialmente. Con esta disposición a parte de contar con la componente de reluctancia del par motor se podrá conseguir una inducción $B_\delta > Br$, así compensar en parte la baja inducción remanente Br de los imanes de ferritas.

3. Característica de la motocicleta

Las principales características de la motocicleta que ha de propulsar el motor en estudio se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 2. Principales parámetros de la motocicleta.

Parámetros	Valores
Masa total (kg)	250
Coef. de rodadura	0,01
Coef. de penetración aerodinámico	0,7
Radio rueda (m)	0,2387
Superficie del vehículo (m^2)	0,6 m^2
Relación de transmisión	10:1
Rendimiento de transmisión	0,97

Con estos parámetros y aplicando la ecuación de la fuerza tractora:

$$F_t = M * g * (f * cos \propto + sin \propto) + \frac{1}{2} * \xi * S * C_D * (v \pm v_0)^2 + m * km * \frac{dv}{dt} \quad (8)$$

Donde:

- F_t: es la fuerza tractora (N).
- M: masa del vehículo (kg).
- g: aceleración de la gravedad 9,81 m/s^2.
- *f*: coeficiente de rodadura.
- α: ángulo de la pendiente que forma con la horizontal (^{0}).
- ξ: densidad del aire (1,293 kg/m^3).
- S: superficie del vehículo m^2.
- C_D: coeficiente de penetración.
- v: velocidad final m/s.
- v_0: velocidad inicial m/s.
- Km: coeficiente que tiene en cuenta las masas rotativas.

El momento referido a la rueda viene determinado por:

$$T_r = F_t * r \quad (9)$$

Velocidad de la rueda:

$$\omega_r = \frac{V}{r} \quad (10)$$

El momento referido al eje del motor:

$$T_m = \frac{F_t * r}{r_t * \eta_t} \quad (11)$$

Velocidad del motor:

$$\omega_m = \frac{V}{r} * r_t \quad (12)$$

Donde:

- T_r: el par en la rueda (Nm).
- T_m: el par en el eje del motor (Nm).
- r: radio de la rueda (m).
- r_t: relación de trasmisión.
- η_t: rendimiento de la transmisión.
- ω: velocidad en rad/s.

Se obtiene:

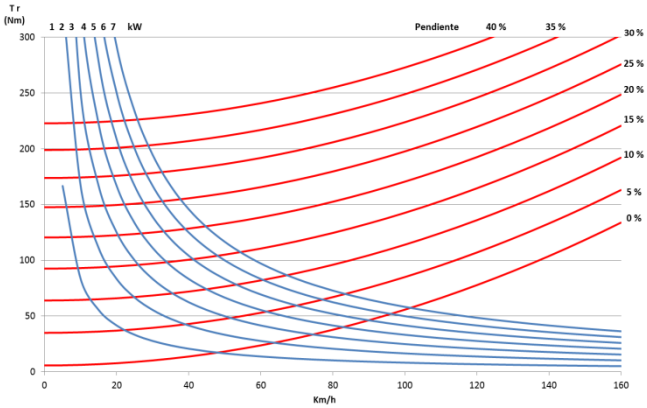

Figura 4.Par requerido en la rueda respecto la velocidad de la rueda y la pendiente.

El motor se diseñara para superar pendientes del 35%.

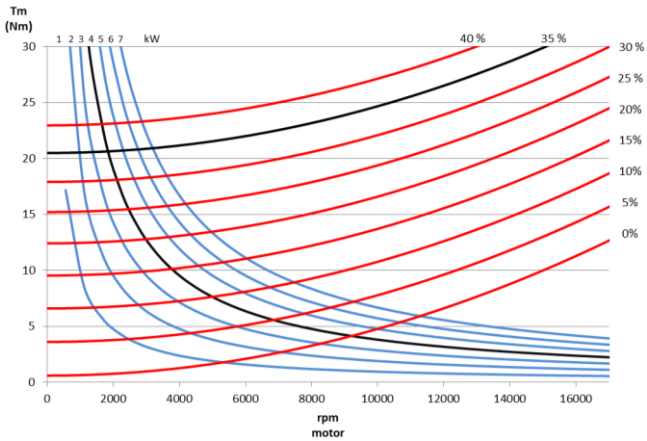

Figura 5. Par requerido en el eje del motor respecto a la velocidad del motor y la pendiente.

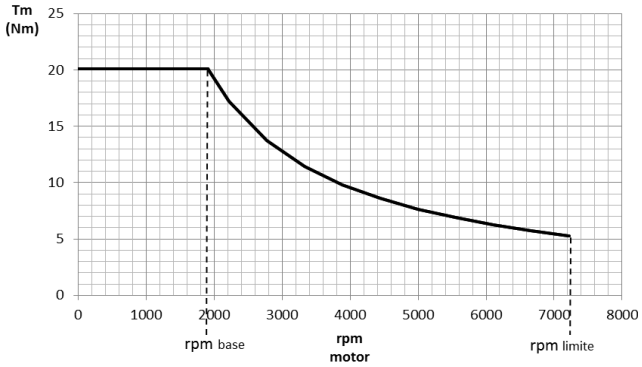

Figura 6. Característica Par- velocidad referente al eje del motor (par base 20 Nm, velocidad base 1910rpm).

Por lo tanto de la Figura 5 se deduce la característica par velocidad que ha de proporcionar el motor y que se muestra en la Figura 6, junto con los datos de partida, se obtienen las principales características del motor de la motocicleta.

Tabla 3. Principales características del motor de la motocicleta.

Requerimientos	Valores
Potencia nominal(kW)	4
Voltaje (V)	48
Velocidad base (rpm)	1910
Par base (rpm)	20

4. Dimensionamiento del motor

Las restricciones de medidas con las que se parte en el diseño se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4. Restricciones dimensionales del motor síncrono.

Parámetro	Medidas (mm)
Diámetro exterior estator	<190
Longitud máxima del motor	230
Entrehierro mínimo	0.5

Con los parámetros obtenidos anteriormente se pasa al dimensionado del motor.

A. Longitud del motor

Determinamos la longitud del motor mediante la siguiente ecuación.

$$L = \frac{T}{\frac{\pi}{4} * TVR * D^2} \quad (13)$$

Donde se escoge un valor de TVR de 35 kN/m^3, valor adecuado para los motores de alta densidad de potencia.

B. Numero de ranuras

El número de ranuras del estator se obtiene de la siguiente ecuación.

$$Q = m * p * n_{pf} \quad (14)$$

Dado que el motor es trifásico m=3, el numero de polos del motor 2p=6 y el numero de ranuras por polo y fase n_{pf} =2, el numero de ranuras elegido es de 36.

C. Diámetro exterior del estator

El diámetro exterior del estator se obtiene de valores orientativos de diferentes máquinas de la misma potencia, se ajustara el diámetro en función de los cálculos obtenidos y en cualquier caso será inferior a 190mm.

D. Diseño del rotor

Para el diseño del rotor se ha dado una solución constructiva original, formada por 4 partes: piezas polares, imanes, tapas del rotor y eje. Es importante destacar que para evitar cortocircuitar los imanes el eje debe ser de un material amagnético. Se ha diseñado esta distribución por la disposición que tienen los imanes en el rotor, de esta forma se mejora la sujeción de las piezas.

E. Devanado

Se ha seleccionado un devanado concéntrico de corriente alterna de paso entero de simple capa con 5 conductores por ranura. Se tiene en cuenta que el motor esta controlado por un inversor trifásico PWM.

En la tabla 5 se relacionan los principales parámetros del dimensionado del motor y en la Figura 7 se muestra una sección transversal del motor diseñado.

Tabla 5. Principales parámetros del dimensionado del motor.

Parámetros	Valores
Tensión fase máx. (v)	21.6
Intensidad nominal (A)	75
Velocidad nominal (rad/s)	200
m	3
2p	6
Diámetro exterior del estator (mm)	166
Diámetro interior estator (mm)	104
Longitud estator (mm)	70
Entrehierro (mm)	0.5
Tipo imán	Ferrita Br =0.4 T
Dimensiones imán (mm)	12x35.87x70
Enrollamiento tipo	Concéntrico
Nombre total de conductores	180
Nombre de espires per fase	30
Nº conductores por ranura	5
Nombre de hilos en paralelo	6
Diámetro del hilo (mm)^2	1.6

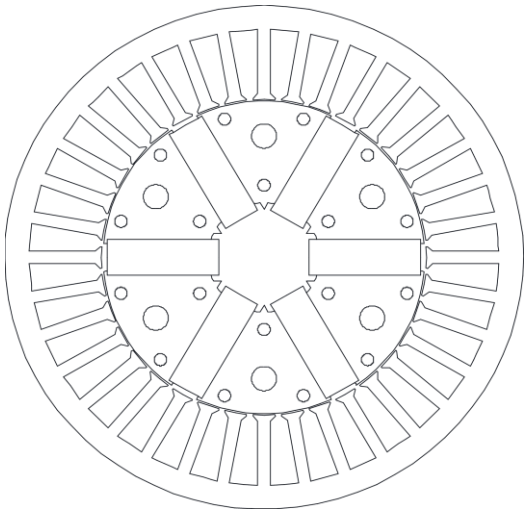

Figura 7. Sección transversal del PMSM.

5. Análisis del motor

El análisis del motor se ha realizado mediante el programa de elementos finitos FEMM.

A. Inducción en el entrehierro

La inducción en el entrehierro dado el diseño del motor debe de cumplir B_δ >Br, en la simulación con elementos finitos se obtienen los valores de inducción en el entrehierro que pueden verse en la Figura 8.En esta figura se observa que el valor máximo de la forma de onda de inducción en el entrehierro esta por encima de los 0,4 T, valor de la inducción remanente del imán. Tambien se aprecia claramente el efecto de las ranuras.

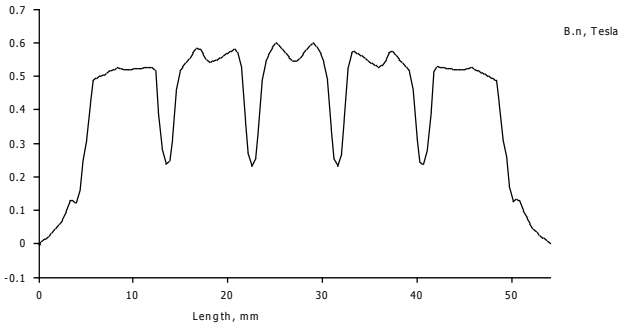

Figura 8.Valores de inducción en el entrehierro.

B. Inductancias Ld y Lq

En las siguientes figuras se muestran las líneas de campo magnético de los ejes d y q del motor.

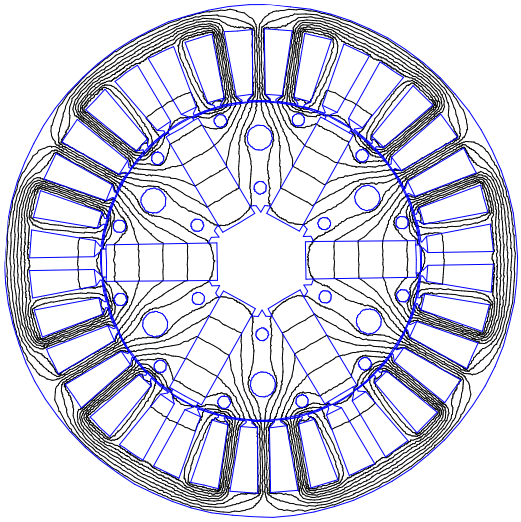

Figura 9. Distribución de las líneas de campo del eje d.

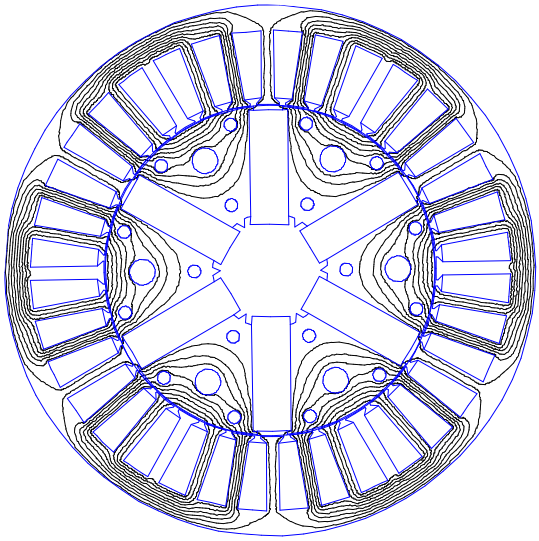

Figura 10. Distribución de las líneas de campo del eje q.

En la siguiente figura 11 se muestra la variación de las Ld y Lq en función de diferentes Imáx.

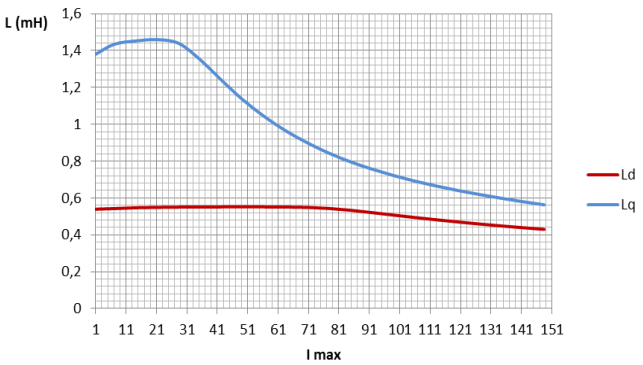

Figura 11. Variación de las inductancias en función de la intensidad.

C. Par motor en función de la posición del rotor

Se calcula el par a diferentes intensidades de funcionamiento.

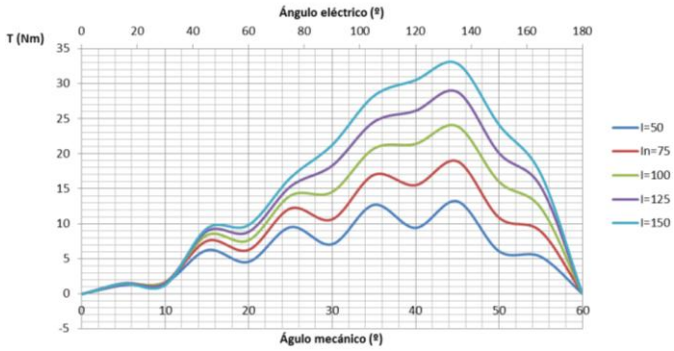

Figura 12. Par motor respecto a la posición del rotor.

Se hace un análisis más preciso para la intensidad nominal, obteniéndose para este el par máximo y la posición (ángulo) del par máximo.

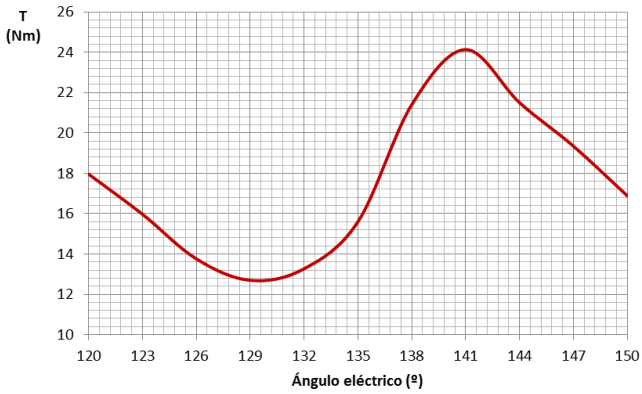

Figura 13.Gráfica del par máximo en función de la posición del rotor.

Del valor del par máximo, se obtiene la potencia máxima que desarrolla el motor a In y ω_N.

D. Cogging torque

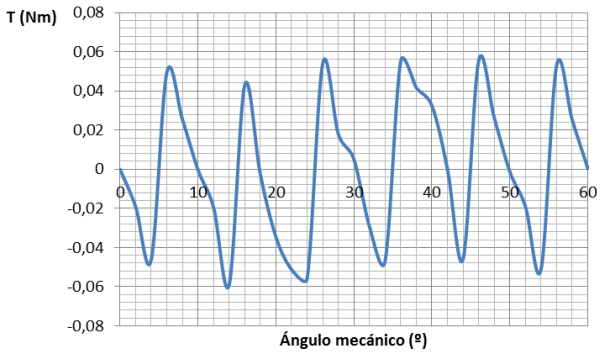

Figura 14.Cogging torque

El efecto del cogging torque, par debido a la interacción de los imanes con las ranuras del estator para una corriente nula, en el motor es negligible debido a que su valor de retención es del 0,23% del valor de par máximo.

E. Desmagnetización de los imanes

La simulación de desmagnetización se debe realizar debido al bajo campo coercitivo de los imanes de ferritas, el valor de inducción remanente Br de los imanes no debe ser inferior a 1/4 parte de su Br. Alimentando el motor al valor más desfavorable, con el rotor en posición de par máximo y In, se simula y se ve que la densidad de flujo en todas las partes del imán no baja de 0,1 T.

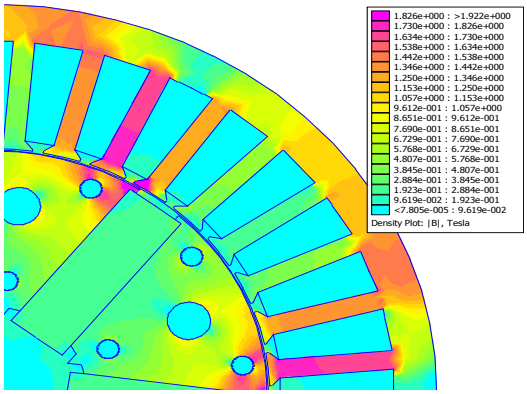

Figura 15.Mapa del flujo de desmagnetización de los imanes.

El punto de inducción mas bajo en el imán es 0,104 T, es un valor cercano al punto de desmagnetización.

Tabla 6. Tabla de parámetros principales del motor.

Parámetros	Valores
Inductancia fase Lmd (In)	0,512 mH
Inductancia fase Lmq (In)	0,829 mH
Inductancia cabeza de bobina Lcb	0,03392 mH
Inductancia fase Ld (In)	0,5459 mH
Inductancia fase Lq (In)	0,8629 mH
Resistencia de fase a 20ºC	16,75 mΩ
Par nominal	20 Nm
Par máximo	24,13 Nm
Potencia máxima (kW)	4.83
Masa total del motor (kg)	17,47

6. Evaluación del rendimiento

En la siguiente figura se muestran las perdidas, manteniendo la corriente nominal y a diferentes frecuencias de funcionamiento.

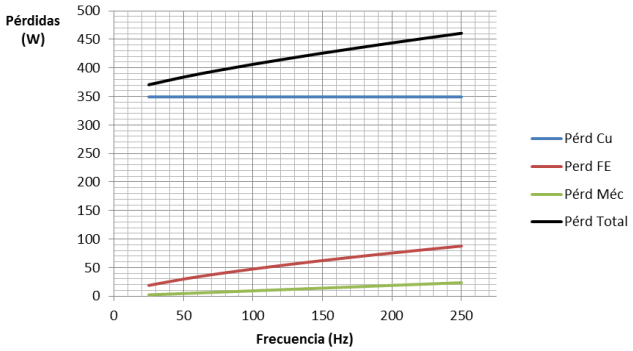

Figura 16. Evaluación de las pérdidas en el motor en función de la frecuencia de funcionamiento.

A partir de estas perdidas se calcula el rendimiento del motor para diferentes frecuencias.

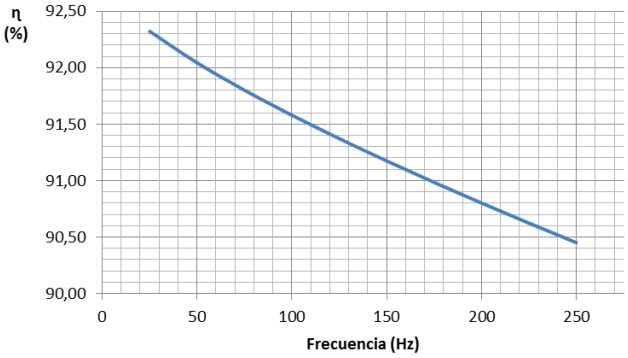

Figura 17. Rendimiento del motor respecto a la frecuencia de funcionamiento y a corriente constante.

El rendimiento del motor a In y a ω_N es del 91,62 %.

7. Evaluación de coste de diseño y construcción

El precio de producción se determina con la suma del precio de los materiales utilizados y del precio de fabricación. Para la elaboración de la siguiente tabla, se ha calculado el precio de los materiales a partir de la masa total de cada material utilizado en el motor, el precio de fabricación del motor se elabora a partir de las horas que se dedican a la producción y ensamblaje de las piezas. Al precio del prototipo se le suma también el precio de las horas de ingeniería dedicadas al diseño del motor.

Tabla 7. Precio total de producción.

Apartado de precios		Precio (€)	Precio con IVA (€)
Precio total prototipo	Precio material	108,78	131,62
	Precio fabricación	1.950	2.359,50
Precio total prototipo		**2.058,78**	**2.491,12**
Sueldo ingeniero		14.625	17.696,25
Precio Total		**16.683,78**	**20.187,37**

8. Conclusiones

En este proyecto se ha realizado el diseño de un PMSM con imanes ferritas para una motocicleta eléctrica. Se ha podido observar que con el diseño de PMSM con imanes de ferritas se obtiene un rendimiento parecido a los PMSM con imanes de tierras raras. Esto implica que con los imanes de ferritas se obtienen motores con un alto rendimiento además de una reducción del precio del motor.

El motor diseñado cumple con las especificaciones requeridas por la motocicleta. Mediante los análisis electromagnéticos se ha podido observar que los imanes de ferritas utilizados alcanzan uno valores de inducción aceptables y que el diseño garantiza que no haya una posible desmagnetización de los imanes.

Se ha podido observar que si se utiliza otro tipo de ferritas con unas Br y Hc mayores a las utilizadas en el motor, se podrían mejorar los resultados del motor y se reduciría el riesgo de la desmagnetización.

9. Agradecimientos

Doy mi agradecimiento a todos los profesores del EPSEVG por sus enseñanzas y conocimientos que he adquirido gracias a ellos. En especial quiero agradecer al tutor del proyecto, Pere Andrada por su gran ayuda y dedicación en la realización del proyecto.

Referencias

[1] Critical Metals Handbook. John Wiley & Sons, 2013, p. 456.

[2] V. Technologies, EVALUATION OF THE 2008 LEXUS LS 600H HYBRID SYNERGY DRIVE SYSTEM 2008 LEXUS LS 600H HYBRID SYNERGY, no. January. 2009.

[3] T. Miller, “Brushless reluctance-motor drives,” Power Eng. J., no. 21, 1987.

[4] D. Hurst and J. Gartner, “Executive Summary : Electric Motorcycles and Scooters Electric Power Two-Wheelers : Market Drivers and Barriers , Technology Issues , Key Industry Players , and Global Demand Forecasts,” 2014.

[5] P. Andrada, B. Blanqué, E. Martinez, M. Torrent, J. A. Sánchez, and J. I. Perat, “Electric drives for light e-scooters", ICREPQ 2013 Bilbao.

[6] P. Andrada, “Vehícles elèctrics i híbrids,” 2013.

[7] “Metal-Pages - Neodymium prices.” [Online]. Available: http://www.metal-pages.com/metalprices/neodymium/. [Accessed: 31-May-2014].

[8] P. Andrada, B. Blanqué, “Accionaments elèctrics Pràctica 5 control vectorial d’un motor síncron trifàsic.”