

Raúl Carayol Rodríguez

Diseño de un motor síncrono de imanes permanentes para un patinete eléctrico

TREBAJO DE FIN DE GRADO

dirigido por Jordi García Amorós

Grado de Ingeniería eléctrica



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2023

ÍNDICE

1	Introducción.....	1
2	Objetivos	2
3	Metodología	3
4	Estado del arte: patinetes eléctricos.....	4
4.1	Patinetes eléctricos	4
4.1.1	Evolución histórica	5
4.1.2	Partes de un patinete.....	6
4.1.3	Tipos de motores eléctricos.....	9
5	Maquina síncrona de imanes permanentes.....	11
5.1	Funcionamiento	12
5.1.1	Tipologías	13
5.1.1.1	Motores de imanes superficiales	13
5.1.1.2	Motores de imanes interiores	14
5.2	Ventajas e inconvenientes del motor síncrono de imanes permanentes	15
5.3	Aplicación de los PMSM en patinetes eléctricos.....	17
6	Diseño del motor	18
6.1	Previsión de potencia	19
6.1.1	Estudio mecánico.....	20
6.1.2	Cálculo de potencia:	22
6.1.2.1	Cálculo de la potencia en llano:.....	22
6.1.2.2	Cálculo de la velocidad en una rampa de 15%:	24
6.2	Especificaciones eléctricas	26
6.3	Selección de materiales	27
6.4	Diseño analítico.....	30
6.4.1	Dimensionamiento inicial	30
6.4.1.1	Cálculo del Par	31
6.4.1.2	Dimensiones en el entrehierro	31
6.4.1.3	Dimensionamiento de los imanes	31
6.4.1.4	Dimensionamiento devanado	34
6.4.1.5	Dimensionamiento estator	37
6.4.1.6	Dimensionamiento del rotor	40
6.5	Diseño numérico por elementos finitos.....	42
6.5.1.1	Definición geométrica	43
6.5.1.2	Definición del Devanado	45
6.5.1.3	Generación del mallado	48
7	Simulaciones	49
7.1	Ensayo magnetostático.....	49
7.2	Ensayo de vacío.....	51

7.3	Ensayo con carga.....	54
8	Resultados finales	58
8.1	Cálculo de rendimiento.....	58
8.2	Conclusiones	61
9	Referencias.....	62
10	Anexos	63
10.1	Anexo I: Estudio de patinetes del mercado.....	64
10.2	Anexo II: Codigos MATLAB	68
10.2.1	Codigo Barrido Beta	68
10.2.2	Código Simulación en vacío.....	72
10.2.3	Código graficar par para diferentes betas	74
11	Planos	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Motor de inducción	10
Tabla 2.	Especificaciones mercancías.....	30
Tabla 3.	Especificaciones eléctricas	30
Tabla 4.	Parámetros de los imanes	33
Tabla 5.	Dimensiones del devanado y el entrehierro	36
Tabla 6.	Tabla de dimensiones de calibres AWG.....	39
Tabla 7.	Dimensiones del estator.	40
Tabla 8.	Dimensiones del rotor	41
Tabla 9.	Par para diferentes corrientes.....	58
Tabla 10.	Rendimientos para diferentes corrientes	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema de un patinete eléctrico del mercado.....	9
Figura 2.	Diagrama de la carga en el patinete eléctrico	20
Figura 3.	Diagrama del solido libre del patinete	20
Figura 4.	Diagrama del solido libre de la rueda.....	22
Figura 5.	Diagrama del solido libre de la rueda con inclinación del 15%	24
Figura 6.	Propiedades del imán	28
Figura 7.	Curva B/H de M19-Steel.....	29
Figura 8.	Propiedades del material del devanado.....	30
Figura 9.	Dimensiones de la rueda escogida para el patinete.	31
Figura 10.	Esquema del estator interior del motor	37
Figura 11.	geometrías del estator y del rotor con los imanes.....	43

Figura 12.	Geometrías del conjunto del motor	43
Figura 13.	Definición del problema FEMM	44
Figura 14.	Esquema devanado.....	46
Figura 15.	distribución del devanado para $Q=36$, $p=6$.....	47
Figura 16.	distribución del devanado en la geometría del motor diseñado	47
Figura 17.	Mallado del modelo completo.....	48
Figura 18.	líneas de flujo en el modelo.....	50
Figura 19.	Densidad de flujo.....	50
Figura 20.	Flujo del motor ensayo vacío.....	52
Figura 21.	Tensiones inducidas.....	52
Figura 22.	Formas de las corrientes tras cada transformación	55
Figura 23.	Corrientes I_a, I_b, I_c aplicadas al estor después de las transformaciones.	55
Figura 24.	Torque máximo para diferentes valores de beta.	56
Figura 25.	Par motor para $\beta = 36^\circ$.	56
Figura 26.	Par motor para diferentes corrientes	59

1 Introducción

A lo largo de la historia, el ser humano ha buscado diferentes formas de transporte para satisfacer sus necesidades de movilidad. Desde los carruajes tirados por caballos hasta los automóviles, el transporte ha evolucionado significativamente. La invención del motor de combustión interna a finales del siglo XIX cambió la forma en que la gente se movía, y el automóvil se convirtió en el medio de transporte más popular y común en el mundo.

Sin embargo, en las últimas décadas, el enfoque se ha desplazado hacia la reducción de la dependencia del petróleo y la disminución de la huella de carbono del transporte. Los vehículos eléctricos (EV) se han presentado como una alternativa limpia y eficiente a los vehículos de combustión interna. Aunque los primeros vehículos eléctricos se desarrollaron en la década de 1830, no fue hasta la década de 1990 cuando los fabricantes comenzaron a comercializar los EV. En los últimos años, los avances tecnológicos y la conciencia ambiental han aumentado el interés en los vehículos eléctricos.

Además, los vehículos eléctricos son más eficientes que los vehículos de combustión interna en la conversión de la energía almacenada en la batería en energía de movimiento. Los motores eléctricos tienen una mayor eficiencia energética y menos partes móviles en comparación con los motores de combustión interna, lo que significa que se pierde menos energía por fricción y otras formas de disipación de energía. Esto resulta en una mayor autonomía y un menor costo operativo a largo plazo.

Dentro de los vehículos eléctricos, los patinetes eléctricos se han vuelto cada vez más populares debido a su portabilidad y conveniencia. Los patinetes eléctricos han sido adoptados en muchas ciudades como una forma económica y sostenible de moverse.

Los patinetes eléctricos son más pequeños y maniobrables que los vehículos motorizados convencionales, lo que los hace ideales para desplazamientos cortos y para recorrer áreas urbanas congestionadas. Esto también los convierte en una opción popular para aquellos que buscan alternativas de transporte que no dependan de los servicios de transporte público.

Los patinetes eléctricos también son relativamente económicos de adquirir y mantener en comparación con los vehículos motorizados convencionales. No requieren combustible y tienen menos piezas móviles que requieren mantenimiento, lo que significa que los costos de reparación y mantenimiento son menores.

La tecnología de baterías ha mejorado significativamente en los últimos años, lo que ha permitido que los patinetes eléctricos tengan una mayor autonomía y una vida útil más larga. Esto ha hecho que los patinetes eléctricos sean una opción más atractiva y viable para las personas que buscan alternativas de transporte sostenible y económico en las áreas urbanas.

En este contexto, los motores síncronos de imanes permanentes se presentan como una opción óptima en cuanto a las prestaciones y el rendimiento que ofrecen. Es muy interesante realizar un diseño de este tipo de motor y estudiar su funcionamiento y características en un patinete eléctrico. De esta manera, se puede contribuir a la mejora continua de los vehículos eléctricos y al avance hacia un futuro más sostenible.

2 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto consiste en llevar a cabo el diseño de un motor síncrono de imanes permanentes especialmente diseñado para su implementación en patinetes eléctricos. Para lograr este propósito, se sigue una metodología estructurada que abarca diversas etapas clave.

En primera instancia, se lleva a cabo una investigación exhaustiva sobre los patinetes eléctricos y los vehículos eléctricos en general. Se indaga en el contexto histórico de los patinetes eléctricos, se evalúan detenidamente las ventajas e inconvenientes asociados a su uso y se realiza una descripción concisa de los elementos característicos y el funcionamiento de estos vehículos. Además, se profundiza en el análisis de los distintos tipos de motores eléctricos actualmente disponibles y su idoneidad para ser utilizados en patinetes.

A continuación, se procede a un análisis minucioso de las características fundamentales de los motores síncronos de imanes permanentes, a la vez que se justifica y argumenta su elección como motor preferido para su aplicación en patinetes eléctricos. Se examinan detalladamente los beneficios inherentes a estos motores y su capacidad para cumplir con los requerimientos de rendimiento y eficiencia exigidos en el contexto de esta aplicación específica.

Seguidamente, se inicia el proceso de dimensionamiento del motor, tomando en consideración tanto las prestaciones mecánicas como las eléctricas necesarias para garantizar un funcionamiento óptimo del patinete eléctrico. Se toman como referencia las prestaciones ofrecidas por los patinetes eléctricos disponibles en el mercado y las normas que rigen este tipo de vehículos. Durante este proceso, se seleccionan de manera adecuada parámetros críticos tales como el número de polos, el número de ranuras y el tipo de devanado.

Una vez completado el dimensionamiento, se procede a adquirir las competencias y conocimientos necesarios para llevar a cabo simulaciones mediante el uso de software especializado en elementos finitos, como FEMM y junto a la utilización de MATLAB. Estas simulaciones permiten analizar y comprender en detalle el comportamiento electromagnético del motor diseñado. Se realizan ensayos en la simulación para obtener información precisa acerca de las características de vacío y en carga del motor.

Por último, se lleva a cabo un análisis detallado y una interpretación exhaustiva de los resultados obtenidos durante las simulaciones. Se examinan las prestaciones en términos de par medio, par máximo y rendimientos a carga parcial del motor diseñado. Además, se exploran posibles mejoras en el diseño inicial y se consideran alternativas viables para optimizar aún más el rendimiento y la eficiencia del motor en el contexto específico de su aplicación en un patinete eléctrico.

3 Metodología

El desarrollo de este proyecto se ha llevado a cabo siguiendo una metodología estructurada compuesta por ocho fases distintas.

En la primera fase, se realizó un repaso exhaustivo de los conceptos relacionados con las máquinas eléctricas, centrándose especialmente en la geometría y el funcionamiento de las máquinas síncronas de imanes permanentes, así como en sus diversas aplicaciones industriales.

En la segunda fase, se llevó a cabo un estudio detallado sobre los patinetes eléctricos, explorando sus características generales y analizando su relevancia en el ámbito de la movilidad eléctrica.

Posteriormente, en la tercera fase, se procedió al dimensionamiento inicial de un motor de imanes permanentes basado en las prestaciones eléctricas y mecánicas de un patinete eléctrico convencional disponible en el mercado. Este dimensionamiento se realizó utilizando ecuaciones electromagnéticas fundamentales y considerando las especificaciones del patinete estudiado previamente.

En la cuarta fase, se adquirieron los conocimientos y habilidades necesarios para utilizar programas de simulación por elementos finitos, como FEMM y MATLAB, para resolver problemas electromagnéticos. Esto se logró a través de la realización de ejemplos prácticos guiados y el estudio de referencias.

En la quinta fase, se procedió a modelar y verificar la geometría del motor diseñado mediante simulaciones por elementos finitos. Esto permitió evaluar y validar la geometría del motor en un entorno virtual antes de su fabricación física.

Una vez completado el modelado, en la sexta fase se configuraron y ejecutaron las simulaciones de los ensayos básicos para caracterizar el diseño del motor. Estos ensayos incluyeron pruebas de vacío y de carga, que proporcionaron información valiosa sobre el rendimiento y las características electromagnéticas del motor.

En la séptima fase, se validaron y evaluaron los resultados obtenidos en las simulaciones. Se calcularon parámetros importantes, como el par máximo y los rendimientos a cargas parciales, con el fin de analizar el desempeño del motor síncrono de imanes permanentes diseñado.

Por último, en la octava fase, se justificaron los resultados obtenidos y se comprobó la idoneidad del motor diseñado para su aplicación en patinetes eléctricos. Se exploraron posibles mejoras y se trazaron líneas futuras para continuar optimizando el diseño y explorar nuevas oportunidades en el campo de la movilidad eléctrica.

4 Estado del arte: patinetes eléctricos

La movilidad eléctrica ha experimentado un auge en los últimos años gracias a la creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de gases contaminantes en las ciudades. Los vehículos eléctricos, incluidos los patinetes eléctricos, han demostrado ser una solución viable y sostenible para el transporte personal en las ciudades.

Los patinetes eléctricos son una forma económica y eficiente de moverse por la ciudad, permitiendo a los usuarios evitar el tráfico y disfrutar de la flexibilidad que ofrecen. Además, los patinetes eléctricos son una alternativa más saludable al transporte motorizado convencional, ya que fomentan la actividad física al tiempo que reducen la huella de carbono.

En este contexto, el objetivo principal de este proyecto es diseñar un motor síncrono de imanes permanentes adecuado para su uso en un patinete eléctrico. El motor diseñado debe cumplir con las prestaciones necesarias para un vehículo eléctrico convencional del mercado y garantizar un correcto funcionamiento en condiciones de máxima velocidad.

Para alcanzar este objetivo, en primer lugar, se llevará a cabo un estudio detallado sobre los vehículos eléctricos, comenzando por su contexto histórico y las ventajas e inconvenientes de su uso. Luego se describirán los elementos característicos y su funcionamiento, y se explorarán los diferentes tipos de motores eléctricos disponibles actualmente para su aplicación en automóviles. A continuación, se profundizará en el conocimiento de las características principales de un motor síncrono de imanes permanentes y se justificará su elección como motor para vehículos eléctricos.

4.1 Patinetes eléctricos

El patinete eléctrico se ha convertido en un medio de transporte cada vez más popular en la sociedad actual debido a su practicidad, eficiencia y sostenibilidad. Los patinetes eléctricos son una alternativa económica y ecológica a otros medios de transporte como los coches, motos o autobuses, ya que no emiten gases contaminantes y requieren poco mantenimiento. Además, son ideales para trayectos cortos o para moverse por la ciudad de forma ágil y rápida, especialmente en lugares donde el tráfico es denso y el estacionamiento es limitado.

Otra ventaja del patinete eléctrico es su bajo costo de operación en comparación con otros medios de transporte. Los usuarios pueden cargar sus patinetes eléctricos en cualquier toma de corriente, y su costo de funcionamiento es muy bajo, en comparación con los gastos de combustible, mantenimiento y estacionamiento de un coche o moto. Además, los patinetes eléctricos son una opción de transporte más saludable, ya que promueven la actividad física y la reducción del sedentarismo.

En resumen, el patinete eléctrico es un medio de transporte cada vez más popular en la sociedad actual debido a su practicidad, eficiencia, bajo costo de operación, sostenibilidad y promoción de un estilo de vida más saludable. Además, a medida que aumenta la conciencia sobre la necesidad de reducir la emisión de gases contaminantes, se espera que el uso de patinetes eléctricos continúe creciendo y que se convierta en un medio de transporte más común en las ciudades de todo el mundo.

4.1.1 Evolución histórica

La historia del patinete eléctrico se remonta a la década de 1990, cuando algunos fabricantes de vehículos comenzaron a experimentar con vehículos eléctricos de dos ruedas, incluidos los patinetes. Los primeros patinetes eléctricos eran bastante simples y tenían una autonomía limitada, pero ofrecían una alternativa interesante a los patinetes tradicionales impulsados por la fuerza humana.

A medida que la tecnología de las baterías y los motores eléctricos ha avanzado, los patinetes eléctricos han evolucionado significativamente. En la década de 2000, se lanzaron algunos modelos más avanzados con una mayor autonomía, mejores sistemas de frenado y opciones de velocidad ajustable. Estos patinetes eléctricos eran aún bastante caros y no estaban muy extendidos, pero marcaron el comienzo de una tendencia hacia los vehículos eléctricos de dos ruedas más avanzados.

En la década de 2010, el interés en los patinetes eléctricos comenzó a crecer. Empresas como Xiaomi y Segway lanzaron modelos más económicos y accesibles que ganaron popularidad en todo el mundo. También hubo un aumento en el número de empresas emergentes que ofrecían patinetes eléctricos personalizados y de alta gama para los consumidores que buscaban una experiencia más exclusiva.

En los últimos años, la tecnología de los patinetes eléctricos ha seguido avanzando rápidamente. Los modelos más modernos ofrecen autonomía mejorada, sistemas de frenado más avanzados, opciones de velocidad ajustable, así como suspensión y neumáticos más duraderos. Además, el aumento de la demanda ha llevado a una mayor inversión en la infraestructura de carga y estacionamiento, lo que ha hecho que los patinetes eléctricos sean más convenientes y accesibles para los consumidores.

Hoy en día, los patinetes eléctricos son una opción popular para aquellos que buscan una alternativa sostenible y económica a los medios de transporte convencionales en áreas urbanas. Con la tecnología en constante evolución y una mayor aceptación en todo el mundo, es probable que veamos más innovaciones en el mercado de los patinetes eléctricos en el futuro cercano.

4.1.2 Partes de un patinete

En este apartado se hablarán de forma general de las partes que puede tener un vehículo eléctrico aplicadas a un patinete eléctrico, pues patinetes eléctricos existen de una gran variedad donde los de gama baja tienen sistemas muy sencillos y simples, mientras que los de más alta gama se pueden comparar con sistemas de vehículos eléctricos grandes.

A continuación, se detallan las partes más comunes que conforman un patinete eléctrico:

- **Almacenamiento de energía**

Los patinetes eléctricos utilizan baterías recargables para almacenar la energía necesaria para su funcionamiento. Las baterías más comúnmente utilizadas en los patinetes eléctricos son las baterías de iones de litio, que son ligeras, eficientes y tienen una alta densidad de energía.

La capacidad de la batería en un patinete eléctrico puede variar según el modelo y la marca, pero generalmente se encuentra en el rango de 2000-5000 mAh. Cuanto mayor sea la capacidad de la batería, mayor será la autonomía del patinete eléctrico.

La autonomía del patinete eléctrico también depende del modo de conducción y de la velocidad a la que se conduce. Por lo general, los patinetes eléctricos tienen diferentes modos de conducción, que pueden ajustarse para maximizar la eficiencia y la duración de la batería.

Para recargar la batería, se utiliza un cargador específico que se conecta al puerto de carga del patinete eléctrico. La duración de la carga dependerá de la capacidad de la batería y de la velocidad de carga del cargador.

En general, el almacenamiento de energía en los patinetes eléctricos es bastante eficiente y ofrece una buena autonomía para su uso diario. Es importante seguir las instrucciones del fabricante para cargar la batería correctamente y mantenerla en buen estado para prolongar su vida útil.

- **Motor eléctrico**

Los patinetes eléctricos utilizan un motor eléctrico para propulsarse en lugar de un motor de combustión interna como en los vehículos tradicionales. Los motores eléctricos en los patinetes son típicamente motores de corriente continua (DC), que son compactos, eficientes y confiables.

La potencia del motor en un patinete eléctrico puede variar desde unos pocos cientos de vatios hasta varios miles de vatios, dependiendo del modelo y de la velocidad máxima que se desee alcanzar. Los patinetes eléctricos generalmente tienen un controlador que regula la cantidad de energía que se envía al motor, lo que permite ajustar la velocidad y la aceleración.

El motor está conectado a la rueda trasera del patinete eléctrico y utiliza un sistema de engranajes para aumentar la velocidad y la potencia de la rueda. Algunos

patinetes eléctricos tienen motores en ambas ruedas para proporcionar una tracción mejorada y un mejor control en diferentes superficies.

La eficiencia del motor en un patinete eléctrico es importante para la duración de la batería y la autonomía. Los motores de alta calidad tienen una mayor eficiencia energética, lo que significa que pueden convertir más energía eléctrica en movimiento y menos en calor. Además, los motores sin escobillas son más eficientes que los motores con escobillas, ya que no tienen partes mecánicas que generen fricción y calor.

En general, los motores eléctricos en los patinetes son una parte esencial y confiable del sistema de propulsión. Con la tecnología moderna, los patinetes eléctricos pueden proporcionar una experiencia de conducción suave y eficiente con un motor silencioso y sin emisiones.

- **Freno regenerativo**

El freno regenerativo es una característica común en muchos patinetes eléctricos que permite recuperar energía durante la frenada y utilizarla para recargar la batería del patinete.

Cuando se utiliza el freno regenerativo, el motor del patinete eléctrico actúa como un generador y convierte la energía cinética del movimiento en energía eléctrica, que se almacena en la batería. Esto puede ayudar a aumentar la autonomía del patinete eléctrico y prolongar la vida útil de la batería.

El freno regenerativo se activa generalmente mediante un freno de disco o un freno de tambor en la rueda trasera del patinete eléctrico. Al presionar el freno, se activa un interruptor que cambia la dirección del flujo de corriente en el motor, lo que hace que el motor funcione como un generador.

El freno regenerativo es especialmente útil en situaciones en las que se necesita frenar con frecuencia, como al bajar una pendiente o al conducir en tráfico denso. Al utilizar el freno regenerativo, se reduce la necesidad de utilizar el freno mecánico y se aumenta la eficiencia energética del patinete eléctrico.

Es importante tener en cuenta que el freno regenerativo no proporciona una fuerza de frenado tan potente como un freno mecánico, por lo que se debe utilizar con precaución y combinado con el freno mecánico para garantizar una frenada segura. Además, el freno regenerativo puede afectar ligeramente a la velocidad y la aceleración del patinete eléctrico, por lo que es importante ajustar la velocidad y la distancia de frenado en consecuencia.

- **Sistema regulador**

el sistema regulador en un patinete eléctrico es una parte importante del circuito eléctrico que se encarga de controlar la cantidad de energía que fluye desde la batería al motor. El regulador ayuda a mantener una velocidad constante y una aceleración suave, y también puede proteger la batería y el motor de daños.

El regulador se conecta al acelerador del patinete eléctrico y al controlador del motor. El acelerador envía una señal al regulador para indicar la cantidad de energía que se desea enviar al motor, y el regulador ajusta la corriente de energía en consecuencia. El regulador también monitorea la temperatura de la batería y el motor para evitar sobrecalentamientos y sobrecargas, lo que puede dañar los componentes y reducir la vida útil del patinete.

El regulador puede estar integrado en el controlador del motor o ser una unidad separada. Los reguladores pueden ser analógicos o digitales, y los modelos más avanzados pueden tener funciones adicionales como el freno regenerativo y la recuperación de energía cinética.

En general, el sistema regulador es una parte importante del circuito eléctrico del patinete eléctrico que ayuda a proporcionar una experiencia de conducción suave y segura. Un regulador de calidad puede ayudar a maximizar la eficiencia energética del patinete y prolongar la vida útil de los componentes.

- **Inversor**

El inversor es una parte importante del sistema eléctrico de un patinete eléctrico y se encarga de convertir la corriente continua (DC) de la batería en corriente alterna (AC) que es necesaria para alimentar el motor eléctrico.

El motor eléctrico de un patinete eléctrico funciona con corriente alterna (AC), pero la mayoría de las baterías proporcionan corriente continua (DC). El inversor convierte la corriente continua en corriente alterna mediante un proceso de conmutación que alterna la dirección y la magnitud de la corriente eléctrica a alta velocidad.

El inversor también controla la velocidad del motor al variar la frecuencia y la amplitud de la corriente alterna que se suministra al motor. Al controlar la frecuencia y la amplitud de la corriente eléctrica, el inversor puede ajustar la velocidad y la aceleración del patinete eléctrico.

Los inversores pueden ser analógicos o digitales, y algunos modelos más avanzados pueden tener funciones adicionales como el freno regenerativo y la recuperación de energía cinética.

Es importante tener en cuenta que el inversor es una parte crítica del sistema eléctrico de un patinete eléctrico, y un inversor de mala calidad o mal diseñado puede reducir el rendimiento del patinete y reducir su vida útil.

- **Controlador**

El controlador es otro componente clave del sistema eléctrico de un patinete eléctrico. El controlador es un circuito electrónico que se encarga de controlar el suministro de energía eléctrica del patinete, y es el responsable de coordinar y regular la velocidad del motor, la energía de frenado, y la entrega de potencia de la batería.

El controlador recibe información del acelerador del patinete, así como de otros sensores, y utiliza esta información para controlar la velocidad del motor eléctrico del patinete. El controlador también puede tener un sistema de frenado regenerativo, que aprovecha la energía cinética del patinete para recargar la batería durante el frenado.

Además de controlar la velocidad y la energía de frenado, el controlador también puede proporcionar información al usuario del patinete, como el nivel de carga de la batería y la velocidad actual del patinete. Los controladores también pueden incluir medidas de seguridad, como cortocircuitos y protección contra sobrecarga.

Los controladores pueden variar en complejidad y características, y la calidad del controlador puede afectar la eficiencia y el rendimiento del patinete eléctrico.

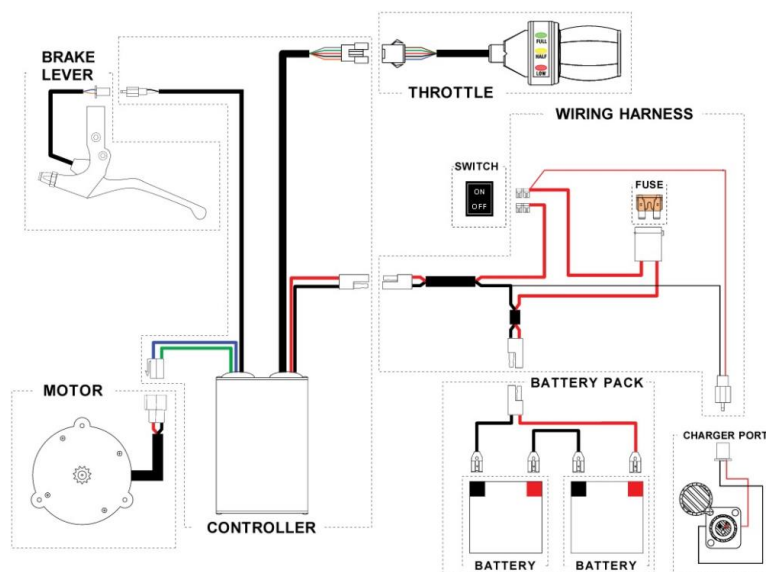


Figura 1. Esquema de un patinete eléctrico del mercado.

4.1.3 Tipos de motores eléctricos

Los patinetes eléctricos, y de forma más general, los vehículos eléctricos cuentan con una variedad de motores eléctricos que les permiten impulsarse de manera eficiente y sostenible. A continuación, se presentan los principales motores utilizados en estos vehículos, junto con sus características y desventajas.

Motor de corriente continua

El motor de corriente continua (DC) es uno de los motores más comunes en los vehículos eléctricos. Funciona mediante la interacción entre el campo magnético de los imanes permanentes y las bobinas del rotor, utilizando corriente continua. Este motor destaca por su simplicidad y bajo costo. Además, ofrece un buen rendimiento a bajas velocidades y un torque inicial sólido. Sin embargo, presenta una menor eficiencia en comparación con otros motores eléctricos y requiere mantenimiento de las escobillas y del conmutador.

Motor de Inducción

Otro motor ampliamente utilizado es el motor de inducción (AC), basado en el principio de inducción electromagnética. Este motor utiliza corriente alterna para generar un campo magnético rotativo en el rotor. Se caracteriza por su amplia disponibilidad y experiencia en su uso. Ofrece un buen rendimiento a altas velocidades y una buena eficiencia en condiciones de carga parcial. No obstante, su mayor complejidad en comparación con los motores de corriente continua requiere un controlador de velocidad y un inversor para un funcionamiento óptimo.

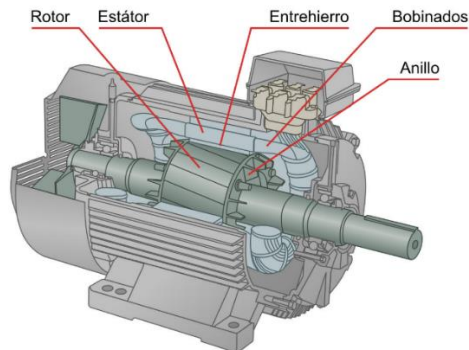


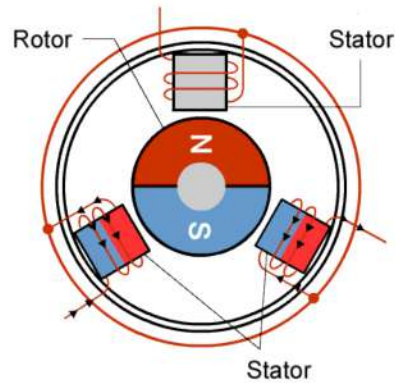
Tabla 1. Motor de inducción

Motor de reluctancia conmutada (SRM)

El motor de reluctancia conmutada (SRM) se basa en la variación de la reluctancia magnética para generar el movimiento. Este motor destaca por su alta eficiencia y bajo costo de fabricación. A diferencia de otros motores, no utiliza imanes permanentes, lo que simplifica su construcción y reduce su costo. Sin embargo, presenta ciertas desventajas, como una menor suavidad de funcionamiento y mayor nivel de ruido en comparación con otros motores. Además, al igual que los demás, también requiere un controlador de velocidad y un inversor para su correcto funcionamiento.

Motor síncrono de imanes permanentes (PMSM)

El motor síncrono de imanes permanentes (PMSM) utiliza imanes permanentes en el rotor y un campo magnético rotativo para generar el movimiento. Destaca por su alta eficiencia y alta densidad de potencia. Ofrece un excelente rendimiento a altas velocidades y un amplio rango de velocidad de operación. Sin embargo, su costo es generalmente más elevado debido al uso de imanes permanentes de tierras raras. Además, su funcionamiento adecuado requiere un controlador de velocidad y un inversor.



El motor síncrono de imanes permanentes (MSIP) se explicará más extensamente en el siguiente apartado.

5 Máquina síncrona de imanes permanentes

Desde su creación, la máquina síncrona se ha extendido hasta abarcar un amplio espectro de aplicaciones tecnológicas en la industria, tanto en su aplicación como generador, en centrales de generación eléctrica, como en su aplicación como motor eléctrico, destacando su utilización en vehículos eléctricos.

Inicialmente, la aplicación de la máquina síncrona como motor era viable únicamente a potencias muy elevadas o en gamas de potencias muy pequeñas, donde era posible solucionar el problema de ausencia de par de arranque que presentan este tipo de máquinas. Este problema actualmente se corrige mediante la utilización de accionamientos de velocidad variable, gracias al gran desarrollo de la electrónica de potencia en las últimas décadas, los cuales permiten el uso de motores síncronos en toda gama de potencias.

Hoy en día, se realizan innumerables esfuerzos para mejorar el rendimiento de las máquinas síncronas y aumentar su fiabilidad. En este ámbito, la máquina síncrona de imanes permanentes (MSIP) se presenta como una buena alternativa a los motores síncronos convencionales de rotor cilíndrico, proporcionando un elevado rendimiento y suficiente fiabilidad en sus prestaciones.

El avance en el desarrollo de la máquina síncrona de imanes permanentes está limitado por la evolución de los materiales magnéticos. Se denominan imanes permanentes a los imanes que poseen un elevado campo magnético remanente, es decir, una gran capacidad de almacenamiento de energía magnética.

En su comienzo en la década de 1970, las MSIP utilizaban aleaciones de AlNiCo y ferritas, las cuales proporcionaban un rendimiento moderadamente superior a los motores de inducción normalmente utilizados en esa época. A medida que se fueron descubriendo nuevos materiales magnéticos se fue popularizando el uso de este tipo de máquinas, hasta que finalmente en la década de 1980, se desarrollaron nuevos imanes de aleaciones de NdFeB, los cuales proporcionan un rendimiento superior en un 50-100% a los motores de inducción. La aplicación de esta nueva alineación supuso un momento crítico en la implantación de las máquinas síncronas de imanes permanentes en la industria.

5.1 Funcionamiento

La máquina síncrona de imanes permanentes sigue un funcionamiento similar al de una máquina síncrona convencional. Ambas son una máquina eléctrica rotativa de corriente alterna cuya velocidad de giro coincide con la velocidad del campo magnético giratorio. Se denomina así velocidad de sincronismo y sigue la siguiente expresión, donde f representa la frecuencia de las corrientes que circulan por un devanado polifásico según el Teorema de Ferraris.

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1)$$

Una máquina síncrona convencional está compuesta por dos devanados, uno de inducido y otro de campo, concatenados mediante un campo magnético. Generalmente, el devanado de inducido es un devanado trifásico y se encuentra en el estator, mientras que el devanado de campo se alimenta con corriente continua y se sitúa en el rotor. Tanto el estator como el rotor están formados por el apilamiento de chapas de material ferromagnético, normalmente de FeSi. [1]

Los imanes permanentes de espesor constante se fijan sobre la superficie cilíndrica de material ferromagnético del rotor utilizando un potente adhesivo, normalmente resinas. El montaje es más complicado que el de una máquina síncrona convencional y cuanto más potente es el adhesivo mayor tiempo requiere su secado. Los imanes se adhieren ya magnetizados por lo que se necesitan útiles, como tornillos no magnetizantes, para evitar la separación entre ellos.

En esta configuración se utilizan imanes permanentes de elevada densidad de energía y alta inducción remanente ya que al ir los imanes adheridos en la superficie del rotor, aumenta el entrehierro y se necesita una mayor energía para magnetizarlo. Solo son válidos los imanes de tierras raras de aleaciones de SmCo ($B_r=1$ T) y de NdFeB ($B_r=1,2$ T). Las líneas de campo que generan los imanes en esta disposición son radiales.

Desde un punto de vista geométrico los motores de imanes superficiales se parecen a una máquina síncrona de polos salientes, pero desde un punto de vista magnético su funcionamiento es similar al de un motor síncrono de rotor cilíndrico. Esto se debe a que la permeabilidad relativa μ_r de los imanes se encuentra en torno a 1,02-1,2, cercana a la del aire del entrehierro, por lo que se considera que la inductancia magnetizante del entrehierro es constante, lo cual es lo mismo que decir que las reactancias X_d y X_q son prácticamente iguales. De esta forma, la expresión del par de la máquina de imanes permanentes es idéntica a la de una máquina síncrona de rotor cilíndrico.

5.1.1 Tipologías

Según sea la disposición de los imanes en el rotor hay dos tipos de motores síncronos de imanes permanentes:

5.1.1.1 Motores de imanes superficiales

Los imanes permanentes de espesor constante se fijan sobre la superficie cilíndrica de material ferromagnético del rotor utilizando un potente adhesivo, normalmente resinas. El montaje es más complicado que el de una máquina síncrona convencional y cuanto más potente es el adhesivo mayor tiempo requiere su secado. Los imanes se adhieren ya magnetizados por lo que se necesitan útiles, como tornillos no magnetizantes, para evitar la separación entre ellos.

En esta configuración se utilizan imanes permanentes de elevada densidad de energía y alta inducción remanente ya que al ir los imanes adheridos en la superficie del rotor, aumenta el entrehierro y se necesita una mayor energía para magnetizarlo. Solo son válidos los imanes de tierras raras de aleaciones de SmCo ($B_r=1$ T) y de NdFeB ($B_r=1,2$ T). Las líneas de campo que generan los imanes en esta disposición son radiales.

Desde un punto de vista geométrico los motores de imanes superficiales se parecen a una máquina síncrona de polos salientes, pero desde un punto de vista magnético su funcionamiento es similar al de un motor síncrono de rotor cilíndrico. Esto se debe a que la permeabilidad relativa μ_r de los imanes se encuentra en torno a 1,02-1,2, cercana a la del aire del entrehierro, por lo que se considera que la inductancia magnetizante del entrehierro es constante, lo cual es lo mismo que decir que las reactancias X_d y X_q son prácticamente iguales. De esta forma, la expresión del par de la máquina de imanes permanentes es idéntica a la de una máquina síncrona de rotor cilíndrico.

$$M_e = 3 \cdot \frac{U \cdot E_o}{\Omega_s \cdot X_d} \cdot \sin \delta \quad (2)$$

Aunque la inductancia síncrona en el entrehierro se considere constante, su valor es más pequeño que el de una máquina síncrona de rotor cilíndrico al ser más grande el entrehierro, debido a que contiene el espesor de los imanes también. Al aumentar la longitud del circuito magnético disminuye la inductancia según la fórmula:

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N^2}{\frac{l}{\mu \cdot S}} \quad (3)$$

$N \equiv$ número de espiras

$R_m \equiv$ reluctancia magnética

$l \equiv$ longitud del circuito magnético

$S \equiv$ sección del circuito magnético

La disposición de imanes internos en un motor ofrece la ventaja de lograr pequeños pasos polares sin necesidad de aumentar el radio del rotor, a diferencia de las máquinas síncronas convencionales. Esto tiene importantes implicaciones en términos de aplicaciones específicas.

En primer lugar, esta configuración permite la construcción de motores de baja velocidad. Al tener imanes internos, el motor puede tener un tamaño compacto sin comprometer el paso polar deseado. Esto es especialmente útil en aplicaciones donde se requiere un control preciso de la velocidad a velocidades más bajas.

Además, el hecho de no tener que aumentar el radio del rotor para lograr pequeños pasos polares implica que los motores con imanes internos pueden tener un volumen reducido en comparación con las máquinas síncronas convencionales. Esto es especialmente beneficioso en aplicaciones donde el espacio es limitado o donde se busca una alta densidad de potencia.

5.1.1.2 Motores de imanes interiores

Los imanes se colocan en el interior del rotor, en unos huecos practicados en el material ferromagnético. En esta configuración se utilizan imanes permanentes de baja densidad de energía y baja inducción remanente, generalmente Ferrita ($B_r=0,4T$) por lo que el precio de la máquina no resulta tan elevado, a pesar de que el montaje del rotor se complica con respecto al de la máquina de imanes superficiales.

En esta distribución el rotor se encuentra dividido en dos zonas. Por un lado cuenta con la parte de los imanes que consta con una permeabilidad relativa μ_r muy pequeña, y por otro lado cuenta con la parte del material ferromagnético del rotor que tiene una permeabilidad alta. De esta forma, se puede considerar que este tipo de motor tiene dos ejes de reluctancia diferente. El eje correspondiente a la parte de los imanes tiene una reluctancia mayor y por lo tanto una menor reactancia X_d , y el eje correspondiente a la parte del material ferromagnético tiene una menor reluctancia y por lo tanto una mayor reactancia X_q .

El funcionamiento de este tipo de motor se puede asimilar al de un motor síncrono de polos salientes, menos por la diferencia de que X_d es menor que X_q , por lo que la expresión del par inducido es la siguiente:

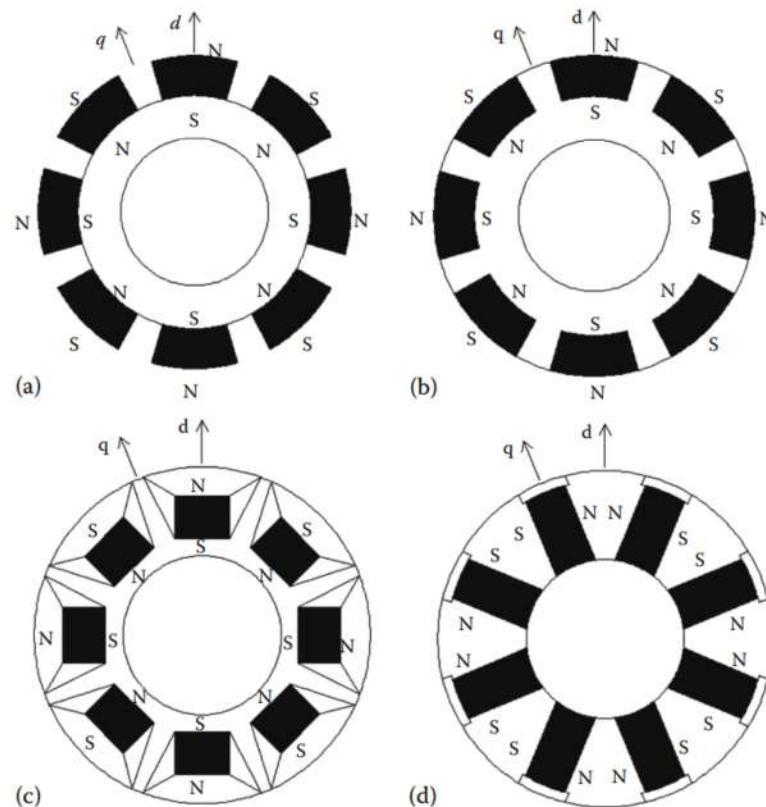
$$M_e = 3 \cdot \frac{U \cdot E_o}{\Omega_s \cdot X_d} \cdot \sin \delta + 3 \cdot \frac{U^2}{2 \cdot \Omega_s} \cdot \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) \cdot \sin 2 \cdot \delta \quad (4)$$

La ubicación de los imanes en el interior del rotor presenta ventajas significativas en el diseño de motores. Esta configuración contribuye a la robustez del motor y permite lograr una mayor densidad de flujo magnético para una cantidad dada de material magnético. Sin embargo, es importante destacar que esta ventaja viene acompañada de un mayor volumen ocupado por el motor.

El uso de imanes en el interior del rotor es especialmente adecuado en configuraciones con un menor número de polos. Esto se debe a que permite reducir el tamaño del entrehierro, que es la distancia entre el rotor y el estator. Un entrehierro más pequeño tiene como consecuencia una mayor densidad de flujo magnético, lo que resulta en un mejor rendimiento del motor.

Además, los motores con imanes internos son especialmente útiles en aplicaciones que requieren altas velocidades y generación de grandes pares de torsión. La disposición de los imanes en el rotor permite una distribución más eficiente del flujo magnético, lo que contribuye a un mejor desempeño en términos de velocidad y torque.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta configuración también tiene algunas limitaciones. Debido al mayor volumen ocupado por los imanes internos, estos motores tienden a tener un tamaño físico más grande en comparación con otros tipos de motores. Además, la colocación y fijación adecuada de los imanes internos requiere un diseño cuidadoso y precisa atención durante la fabricación del motor.



(a) Máquina síncrona PM de superficie (SPM). (b) PM insertado en la superficie (SIPM) máquina síncrona. (c) Máquina síncrona interior PM (IPM). (d) Máquina síncrona PM interior con orientación circunferencial. [2]

5.2 Ventajas e inconvenientes del motor síncrono de imanes permanentes

El motor síncrono de imanes permanentes cuenta con una extensa serie de ventajas. Debido a la ausencia del devanado de campo, las pérdidas de excitación se eliminan con la configuración de imanes permanentes, lo cual comparado con una máquina convencional compensa el sobrecoste de los imanes y aumenta el rendimiento. También, al no requerir un sistema de anillos colectores en la excitatriz se eliminan las pérdidas mecánicas del motor aumentando el rendimiento, se requiere un menor mantenimiento y produce menos ruido y menos vibraciones.

Aparte, debido a la elevada densidad de campo en el entrehierro se proporcionan un bajo rizado de par, aumenta el par proporcionado y mejora la respuesta dinámica.

Este tipo de motor también permite la distribución de un mayor número de polos para un diámetro más pequeño que en las máquinas síncronas. Esto resulta en diseños más compactos y de menor volumen. Aumentando el número de polos en una máquina de imanes permanentes se consigue reducir el diámetro de ésta, al contrario que en una máquina convencional en la cual la composición más eficaz de acortamiento del estator para conseguir reducir el diámetro es reducir el paso polar a una ranura por cada fase y en cada polo. De esta forma, en una máquina síncrona convencional si se quiere mantener la misma inducción y el mismo campo magnético en el entrehierro, cómo este acortamiento del estator también conlleva una reducción del rotor, se necesita mantener el mismo número de amperios vuelta en la nueva configuración del rotor. Mantener el mismo número de conductores en un ancho de sección menor conlleva a un aumento de la altura del polo y a su vez a un aumento del diámetro. Otra opción para conseguir que circulen el mismo número de conductores con la misma corriente en una sección menor sin provocar un aumento de la altura del polo es reducir la sección de los conductores. Esta opción tampoco es válida ya que aumentando la densidad de corriente de los conductores aumenta la resistencia de estos y se provocan más pérdidas de excitación. En cambio, en una máquina de imanes permanentes el campo magnético no depende del ancho del imán por lo que se puede reducir su espesor hasta el valor deseado y conseguir máquinas multipolares con diámetros reducidos. Por ello, el motor de imanes permanentes es la opción ideal para aplicaciones que requieren máquinas multipolares.

Otra ventaja destacable es la posible reducción de volumen del motor debido a la eliminación del dispositivo reductor ya que el motor puede trabajar a cualquier velocidad.

Pese a sus numerosas ventajas, el motor de imanes permanentes también presenta inconvenientes.

Su principal inconveniente respecto a las máquinas síncronas convencionales, es que la regulación del campo magnético no se puede realizar directamente. Este campo es generado por los imanes permanentes, por lo tanto, es necesario el desarrollo de estrategias de control de debilitamiento de campo. Además, el control de la potencia reactiva tampoco es inmediato como en las máquinas síncronas convencionales a través de la intensidad de excitación, si no que está asociado al control del par electromagnético, el cual se modifica mediante un convertidor utilizado como fuente de alimentación, al no tener control sobre el valor de E_o .

Otro de sus inconvenientes es la dificultad de montaje y fabricación, dependiendo de su distribución rotórica.

En cuanto a sus materiales, los imanes permanentes tienen el inconveniente de que una vez se desmagnetizan su nivel de inducción tras la siguiente magnetización alcanza un valor menor. Por esta razón, hay que tener en cuenta los efectos que pueden provocar la desmagnetización de los imanes.

5.3 Aplicación de los PMSM en patinetes eléctricos

En general, para un patinete eléctrico, se recomienda el uso de motores eléctricos de tipo Brushless DC (BLDC) o motores síncronos de imanes permanentes (PMSM). Ambos tipos de motores ofrecen una alta eficiencia, bajo mantenimiento y alta densidad de potencia.

Los motores BLDC son ampliamente utilizados en patinetes eléctricos debido a su bajo costo y buena relación entre potencia y peso. Estos motores son adecuados para patinetes eléctricos de gama media, ya que ofrecen una buena eficiencia energética y una larga vida útil. Sin embargo, los motores BLDC pueden tener un mayor nivel de vibración y ruido en comparación con los motores PMSM.

Por otro lado, los motores PMSM son una opción más avanzada para patinetes eléctricos de alta gama. Estos motores ofrecen una mayor eficiencia energética y un mayor par motor, lo que permite una mayor aceleración y velocidad máxima. Además, los motores PMSM pueden tener un funcionamiento más suave y silencioso en comparación con los motores BLDC.

Los motores de imanes permanentes son muy adecuados para su uso en patinetes eléctricos debido a varias razones:

- **Alta eficiencia:** los motores de imanes permanentes tienen una alta eficiencia energética, lo que significa que pueden convertir la mayor parte de la energía eléctrica suministrada en energía mecánica para mover el patinete. Esto es particularmente importante en patinetes eléctricos, ya que una mayor eficiencia significa una mayor duración de la batería y, por lo tanto, una mayor autonomía.
- **Alta densidad de potencia:** los motores de imanes permanentes tienen una alta densidad de potencia, lo que significa que pueden generar una gran cantidad de energía mecánica en un espacio reducido. Esto es importante en patinetes eléctricos, ya que el espacio es limitado y el motor debe ser compacto y ligero.
- **Velocidad constante:** los motores de imanes permanentes son motores síncronos, lo que significa que su velocidad de operación es constante y está directamente relacionada con la frecuencia de la fuente de alimentación. Esto hace que sean ideales para patinetes eléctricos, ya que se requiere una velocidad constante y precisa para garantizar una experiencia de conducción suave y segura.
- **Bajo mantenimiento:** los motores de imanes permanentes no tienen partes móviles adicionales, como escobillas o conmutadores, lo que los hace menos propensos a fallas y menos costosos de mantener. Esto es importante en patinetes eléctricos, ya que se espera que sean de bajo mantenimiento y fiables.
- **Mayor vida útil:** debido a que los motores de imanes permanentes tienen menos partes móviles, tienen una mayor vida útil en comparación con otros tipos de motores eléctricos. Esto es importante en patinetes eléctricos, ya que se espera que duren mucho tiempo y proporcionen una experiencia de conducción consistente.

En resumen, los motores de imanes permanentes son muy adecuados para su uso en

patinetes eléctricos debido a su alta eficiencia, alta densidad de potencia, velocidad constante, bajo mantenimiento y mayor vida útil. Estas características permiten a los patinetes eléctricos ser más eficientes, compactos, ligeros, fiables y duraderos, lo que los convierte en una excelente opción para una amplia gama de usuarios.

6 Diseño del motor

Diseñar un motor síncrono de imanes permanentes implica varios pasos. A continuación, se detallan los pasos generales que se pueden seguir:

1. Definir los requisitos del motor: El primer paso es definir los requisitos del motor, como el par motor requerido, la velocidad de rotación, la eficiencia y la potencia. Estos requisitos ayudarán a determinar el tamaño y la capacidad del motor.
2. Selección del material: Los imanes permanentes son una parte crítica del motor y la selección del material adecuado es importante para garantizar el rendimiento óptimo del motor. Los imanes permanentes pueden estar hechos de materiales como neodimio-hierro-boro (NdFeB), samario-cobalto (SmCo) o ferrita de estroncio (SrFe).
3. Diseño del núcleo del estator: El núcleo del estator es la parte estática del motor que aloja los devanados del estator. El diseño del núcleo debe optimizarse para maximizar la eficiencia del motor y minimizar las pérdidas de energía.
4. Diseño del rotor: El rotor es la parte móvil del motor que contiene los imanes permanentes. El diseño del rotor debe optimizarse para maximizar la densidad de flujo magnético y minimizar las pérdidas por corrientes parásitas.
5. Diseño de los devanados del estator: El estator contiene los devanados que generan el campo magnético rotativo que impulsa el rotor. El número y la configuración de los devanados deben optimizarse para garantizar un rendimiento óptimo del motor.
6. Análisis y simulación del motor: Se pueden utilizar herramientas de análisis y simulación para optimizar el diseño del motor y verificar que cumpla con los requisitos establecidos. Esto incluye el análisis del flujo magnético, la eficiencia y la potencia del motor.
7. Construcción y pruebas del prototipo: Una vez que se ha completado el diseño y la simulación del motor, se puede construir un prototipo y realizar pruebas para verificar su rendimiento y eficiencia. Las pruebas pueden incluir la medición del par motor, la velocidad de rotación y la eficiencia.

El diseño de un motor síncrono de imanes permanentes implica la definición de los requisitos del motor, la selección de los materiales adecuados, el diseño del núcleo del estator y del rotor, el diseño de los devanados del estator, el análisis y simulación del motor, la construcción y pruebas del prototipo.

6.1 Previsión de potencia

La previsión de potencia es una etapa crucial en el diseño de un motor eléctrico para un patinete eléctrico. Esto se debe a que la potencia del motor es la cantidad de energía que el motor puede entregar en un período determinado. La cantidad de energía que se puede entregar influye directamente en el rendimiento y la eficiencia del motor, así como en la velocidad y la capacidad de carga del patinete eléctrico.

La previsión de potencia implica determinar la cantidad de energía que se requerirá para impulsar el patinete eléctrico, considerando factores como el peso del patinete, la velocidad deseada. A partir de esta información, se puede calcular la potencia que el motor debe ser capaz de entregar para que el patinete funcione correctamente.

Al realizar una previsión de potencia precisa, se puede dimensionar el motor de forma adecuada para el patinete eléctrico, lo que puede mejorar significativamente el rendimiento y la eficiencia del patinete, así como su capacidad para manejar diferentes condiciones y terrenos. Además, también se puede optimizar el tamaño y el peso del motor, lo que puede tener un impacto directo en la maniobrabilidad y la portabilidad del patinete eléctrico.

Para la previsión de potencia se realiza un estudio mecánico del patinete para poder estimar la potencia necesaria según las especificaciones.

6.1.1 Estudio mecánico

Todo el estudio se tomará como base el modelo de patinete “Xiaomi Mi Electric Scooter PRO 2”.

Distribución del peso entre las ruedas:

Se va a calcular cuál será aproximadamente el máximo peso a soportar por una de las ruedas. Se supone una posición del usuario en la que la carga se encuentra concentrada a 200 mm del eje de la rueda trasera, se puede simplificar el sistema a una viga biapoyada en la que la carga se repartirá entre los dos apoyos.

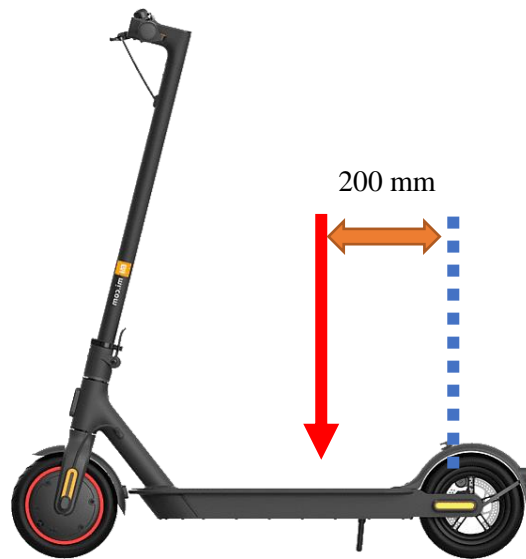


Figura 2. Diagrama de la carga en el patinete eléctrico

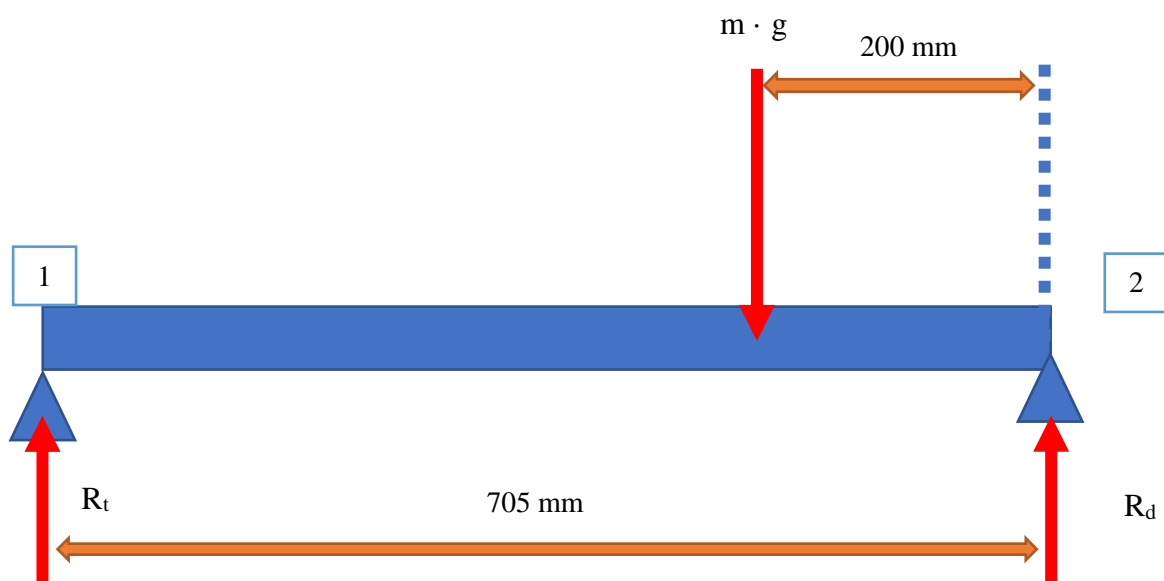


Figura 3. Diagrama del sólido libre del patinete

Para calcular la distribución de carga:

$$\sum M_2 = 0 \rightarrow m \cdot g \cdot 200 - R_t \cdot 705 = 0 \quad (5)$$

Sabiendo que $m = 120 \text{ Kg}$ y $g = 9.81 \text{ N/kg}$, se obtiene:

$$R_t = \frac{235\,440 \text{ (N mm)}}{705 \text{ (mm)}} = 333,96 \text{ N} \quad (6)$$

Se realiza ahora sumatorio de fuerzas en el eje vertical para calcular la reacción en la rueda delantera, aunque se sabe que será inferior.

$$\sum F_y = 0 \rightarrow -m \cdot g + R_t + R_d = 0 \quad (7)$$

$$R_d = 843,24 \text{ N} \quad (8)$$

Fuerza del viento:

La fuerza de resistencia ejercida por el viento es difícil de calcular con exactitud, pero, se debe de tener en cuenta porque si no obtendríamos resultados muy desviados de la realidad.

Se supone un coeficiente de resistencia aerodinámico de 1, algo razonable sabiendo que un perfil muy ineficiente tendrá un coeficiente de 1.3 y un automóvil un coeficiente de 0.3). En cuanto al área frontal efectiva se tomará 0.6 m^2 ya que este es un valor alto en el caso de las bicicletas y sería válido en nuestro caso, equivale suponer un usuario de 1.8 metros de altura con un ancho constante de 0.33 metros.

La fricción del viento para una velocidad de 25 km/h es:

$$v = 25 \frac{\text{km}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} * \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} = 6,94 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (9)$$

$$F_{viento} = 1 \cdot 0.6 \cdot 6,94^2 = 28,94 \text{ N} \quad (10)$$

6.1.2 Cálculo de potencia:

Con los datos anteriores se puede calcular la potencia necesaria en el motor eléctrico. Primero se va a calcular la potencia necesaria para circular en llano (pendiente 0°) a una velocidad de 25 km/h, y posteriormente, se va a comprobar si con esta potencia se podría subir una rampa con una inclinación del 15 %.

6.1.2.1 Cálculo de la potencia en llano:

Para calcular la potencia en llano, se ha realizado el diagrama del cuerpo libre de la rueda.

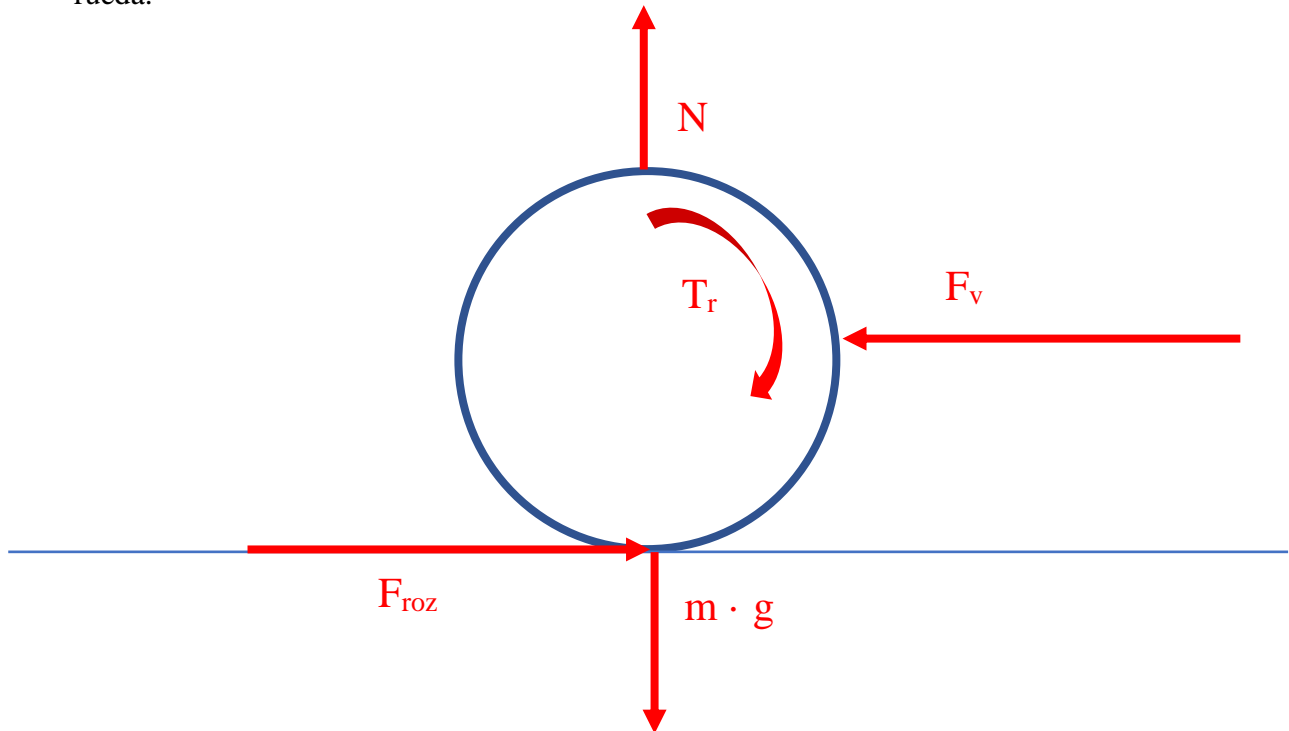


Figura 4. Diagrama del sólido libre de la rueda

$$\sum F_y = 0 \rightarrow N = m \cdot g = 333,96 \text{ N} \quad (11)$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F_{roz} - F_v = 0 \rightarrow F_{roz} = F_v = 28,94 \text{ N} \quad (12)$$

Se aplica la ecuación fundamental de la dinámica de rotación:

$$\sum M = I \cdot \alpha \quad (13)$$

Suponiéndose una velocidad constante, la aceleración angular será nula, por tanto:

$$F_{roz} \cdot r - T_r = 0 \rightarrow F_{roz} \cdot r = T_r = 28,94 \text{ N} \cdot 0,125 \text{ m} = 3,62 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (14)$$

$$T_r = 3,62 \text{ Nm} \quad (15)$$

Conociéndose la velocidad lineal y el radio de la rueda se puede obtener la velocidad angular de la rueda:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{6,94 \frac{m}{s}}{0.125 m} = 55,52 \text{ rad/s} \quad (16)$$

$$n_s = 55,52 \frac{\text{rad}}{s} \cdot \frac{1 \text{ vuelta}}{2\pi \text{ rad}} \cdot \frac{60 s}{1 \text{ min}} = 530.18 \text{ rpm} \quad (17)$$

Luego la potencia ejercida en la rueda será:

$$P = T \cdot \omega = 3,62 \text{ Nm} \cdot 55,52 \frac{\text{rad}}{s} = 200,98 \text{ W} \quad (18)$$

$$P_{rueda} = \eta \cdot P_{motor} \rightarrow P_{motor} = \frac{P_{rueda}}{\eta} = \frac{200,98 \text{ W}}{0.85} = 236,447 \text{ W} \quad (19)$$

$$P_{motor} = 236,447 \text{ W} \quad (20)$$

Finalmente se ha decidió usar un motor con una potencia de 250 W, es una potencia superior a la calculada, para tener un valor normalizado y para que tenga potencia de sobra para cumplir con los requisitos de diseño.

6.1.2.2 Cálculo de la velocidad en una rampa de 15%:

Una vez calculada la potencia en llano se procede a calcular la velocidad que tendría en una rampa por tal de comprobar si cumple los requisitos que se han estipulado para el patinete objetivo.

La inclinación equivalente a una rampa del 15% es la siguiente:

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{15}{100}\right) = 8,53^\circ \quad (21)$$

Primero se realiza el diagrama del cuerpo libre (DSL):

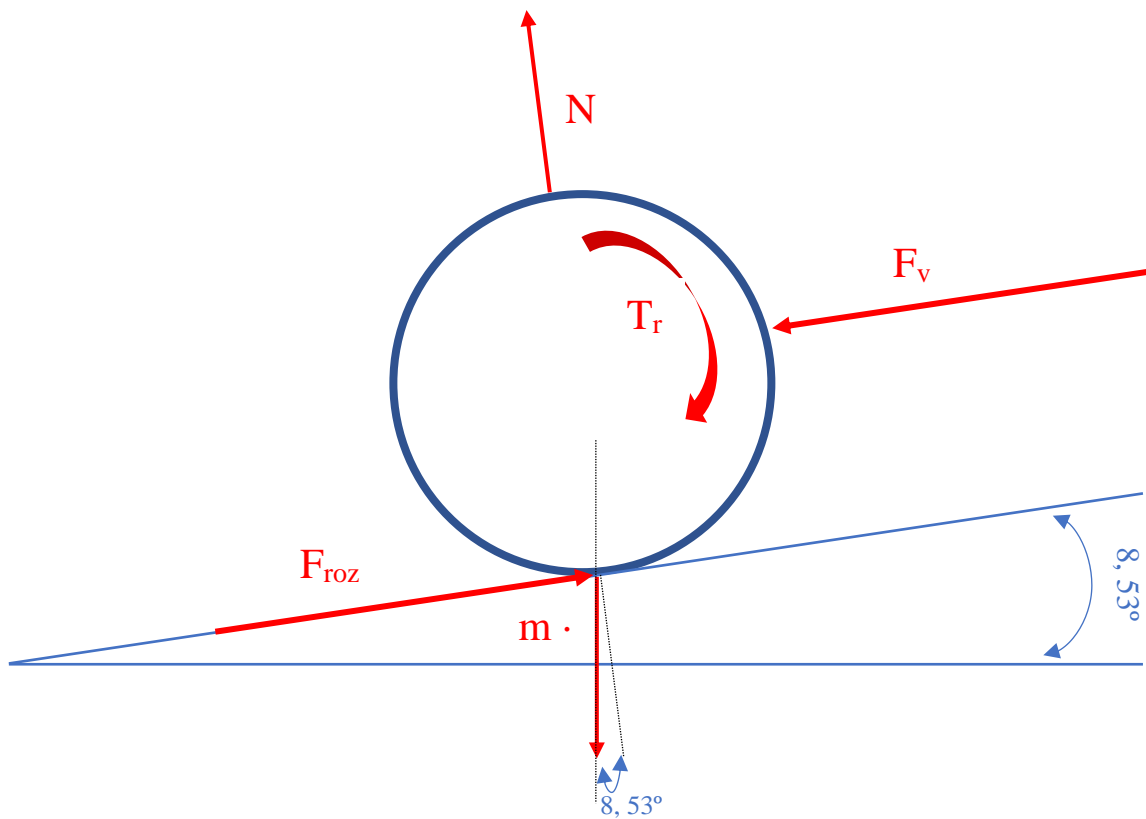


Figura 5. Diagrama del sólido libre de la rueda con inclinación del 15%

$$\sum F_y = 0 \rightarrow N = m \cdot g \cdot \cos(8,53) = 330,27 \text{ N} \quad (22)$$

En este caso no se conoce la velocidad, por lo que se expresa todo en función de la velocidad.

$$\begin{aligned} \sum F_x = 0 \rightarrow F_{roz} - F_v - m \cdot g \cdot \sin(8,53) &= 0 \rightarrow F_{roz} \\ &= F_v + m \cdot g \cdot \sin(8,53) \end{aligned} \quad (23)$$

$$F_{roz} = 0,6v^2 + 174,61 N \quad (24)$$

Se aplica la ecuación fundamental de la dinámica de rotación:

$$\sum M = I \cdot \alpha \quad (25)$$

Suponiéndose una velocidad constante, la aceleración angular será nula, por tanto:

$$F_{roz} \cdot r - T_r = 0 \rightarrow F_{roz} \cdot r = T_r = (0,6v^2 + 174,61) N \cdot 0,125 m \quad (26)$$

$$T_r = 21,83 + 0,075v^2 N \cdot m \quad (27)$$

La velocidad angular es el cociente entre la velocidad lineal y el radio de la rueda:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{v \frac{m}{s}}{0,125 m} = \frac{v}{0,125} rad/s \quad (28)$$

Como la potencia de la rueda es conocida se puede operar para obtener la velocidad:

$$P = T \cdot \omega \rightarrow 250 = (21,83 + 0,075v^2) \cdot \frac{v}{0,125} \quad (29)$$

Operando se obtiene una ecuación de tercer grado en función de la velocidad:

$$-0,6v^3 - 174,64v + 250 = 0 \quad (30)$$

La solución de la ecuación anterior es la siguiente:

$$v = 1,4216 \frac{m}{s} = 5,12 \frac{km}{h} \quad (31)$$

6.2 Especificaciones eléctricas

El sistema eléctrico del patinete incluye una batería de Ion-Litio que suministra una tensión continua de 36 V. Para convertir esta tensión continua en una tensión alterna, se utiliza un inversor de puente completo controlado mediante la técnica de modulación por ancho de pulso (PWM) unipolar.

En el proceso de conversión, se genera una onda triangular que actúa como referencia para modular la señal de salida del inversor. Esta onda triangular tiene un valor pico de V_{tr} . Al mismo tiempo, se genera otra onda de corriente alterna (CA) con un valor pico de V_{sen} y una frecuencia igual a la que se desea obtener en la salida del inversor.

El control mediante la técnica PWM unipolar implica que la señal de salida del inversor se modula en función de los índices de modulación. Estos índices determinan el ancho de los pulsos de la señal de salida y se ajustan de acuerdo con la forma de onda triangular de referencia y la señal de corriente alterna deseada.

$$\text{Índice de modulación de frecuencia: } m_f = \frac{f_{tr}}{f_{sen}}$$

$$\text{Índice de modulación de amplitud: } m_a = \frac{V_{sen}}{V_{tr}}$$

La onda obtenida por el inversor se podrá descomponer en armónicos. El armónico fundamental coincidirá con una senoide con una frecuencia f_{sen} y cuyo valor de pico será:

$$V_{sen} = m_a * V_{tr} \quad (32)$$

Es importante tener en cuenta que al tratarse de un inversor unipolar, los armónicos de orden par serán despreciables debido a que aparecerían a frecuencias de valores de $2 * f_{tr}$ (donde f_{tr} es la frecuencia de la onda triangular de referencia). Por lo tanto, la onda resultante de la conversión será principalmente la del armónico fundamental de tensión.

Para garantizar una onda senoidal sin armónicos, se puede ajustar el índice de modulación de amplitud m_a a un valor igual a la unidad. En este caso, la máxima tensión eficaz que se podrá obtener será $V_{max} = V_{tr}$, correspondiente a una senoide con un índice de modulación de amplitud de 1.

Si se intentara generar una onda con mayor tensión eficaz aumentando el índice de modulación por encima de la unidad, se obtendría una onda de tensión con armónicos de baja frecuencia, lo cual no sería adecuado para la excitatriz del motor que requiere una onda senoidal sin armónicos.

Cómo la excitatriz del motor requiere de una onda senoidal sin armónicos, la máxima tensión eficaz que se podrá obtener de la batería será:

$$m_a = 1 \quad (33)$$

$$V_{sen} = m_a * V_{tr} = 36 V \quad (34)$$

$$V_{ef} = \frac{V_{sen}}{\sqrt{2}} = 25,4558 \text{ V} \quad (35)$$

De esta forma la tensión eficaz de alimentación de 25,46 V; La frecuencia asignada es de 50 Hz, la correspondiente a la velocidad de giro nominal (≈ 500 rpm) considerando una máquina de 6 pares de polos.

$$p = \frac{60f}{n_s} = \frac{60 * 50}{500} = 6 \text{ pares de polos} \quad (36)$$

Se ha asignado estos valores pues para un valor de polos superior significaría tener que aumentar la frecuencia y las pérdidas en el hierro. Además, se tenía como objetivo una frecuencia de 50 Hz de tal forma de tener una frecuencia normalizada y porque en el mercado se encuentran diversos controladores que operan en este rango de frecuencias.

6.3 Selección de materiales

Material imanes permanentes:

Para los imanes permanentes que serán utilizados en los polos de la máquina, se ha optado por seleccionar imanes de Neodimio debido a sus propiedades magnéticas sobresalientes y su alto rendimiento. Estos imanes son ampliamente utilizados en el mercado debido a su capacidad para generar una inducción magnética elevada.

Los imanes de Neodimio suelen estar compuestos por una aleación de materiales de tierra rara de neodimio (Nd) y hierro (Fe). Esta combinación de materiales proporciona una excelente fuerza magnética y una alta coercitividad, lo que significa que retienen su magnetismo de manera efectiva.

La elección de los imanes de Neodimio se debe a su capacidad para generar campos magnéticos intensos y su eficiencia en la conversión de energía eléctrica en energía mecánica. Estas características los hacen ideales para aplicaciones que requieren una alta densidad de flujo magnético y una respuesta rápida.

Las propiedades de los imanes escogidos son las siguientes:

- Permeabilidad relativa: $\mu_r = 1,05$
- Conductividad: $\sigma = 0.667 \text{ MS/m}$
- Densidad: $\rho = 7.550 \text{ kg/m}^3$
- Campo magnético coercitivo: $H_c = 997529 \text{ A/m}$

Figura 6. Propiedades del imán

Material ferromagnético:

Se ha optado por utilizar "M-19 Steel" como el material para el núcleo magnético tanto del estator como del rotor. El "M-19 Steel" es una aleación de acero al silicio que se caracteriza por sus propiedades magnéticas favorables y su alta permeabilidad magnética.

La elección de este material se debe a varias razones. En primer lugar, el "M-19 Steel" exhibe una baja reluctancia magnética, lo que significa que ofrece una ruta de menor resistencia al flujo magnético. Esto resulta en una mayor eficiencia en la transferencia de energía magnética entre el estator y el rotor.

Además, el "M-19 Steel" presenta una baja pérdida por histéresis, lo que significa que tiene una menor tendencia a disipar energía en forma de calor durante los ciclos de magnetización y desmagnetización. Esto contribuye a la eficiencia general del motor y ayuda a reducir la generación de calor no deseado.

Otra ventaja del "M-19 Steel" es su alta permeabilidad magnética, lo que permite una mayor densidad de flujo magnético en el núcleo. Esto resulta en un motor más compacto y eficiente, ya que se puede lograr una mayor inducción magnética en el espacio disponible.

- Densidad: $\rho = 7,7 \text{ g/cm}^3$.
- Conductividad eléctrica: se considera nula.

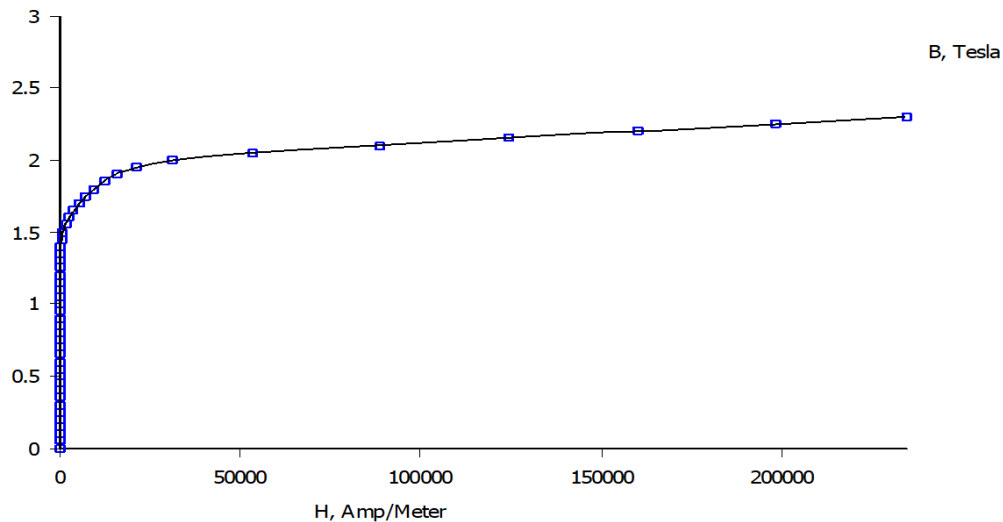


Figura 7. Curva B/H de M19-Steel

Material devanado:

Se ha seleccionado el cobre como el material principal para realizar el bobinado del devanado en el motor. El cobre es ampliamente utilizado en aplicaciones de bobinado debido a sus excelentes propiedades eléctricas y térmicas.

Una de las principales ventajas del cobre es su alta conductividad eléctrica. El cobre es uno de los metales más conductores, lo que significa que permite un flujo eficiente de corriente eléctrica a través del devanado. Esto minimiza las pérdidas por resistencia y ayuda a maximizar la eficiencia del motor.

Además de su alta conductividad, el cobre también presenta una buena resistencia a la corrosión, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en entornos diversos. Esto es importante, ya que el bobinado del devanado puede estar expuesto a condiciones ambientales variables.

Otra ventaja del cobre es su excelente capacidad para disipar el calor generado durante el funcionamiento del motor. El cobre tiene una alta conductividad térmica, lo que significa que puede transferir eficientemente el calor generado hacia el entorno circundante. Esto ayuda a mantener la temperatura del devanado bajo control y evita posibles daños debido al sobrecalentamiento.

- Permeabilidad relativa: $\mu_r = 0,999991$
- Conductividad: $\sigma = 58 \text{ MS/m}$
- Densidad: $\rho = 8.933 \text{ kg/m}^3$

The screenshot shows the 'Block Property' dialog box for a material named '18 SWG'. The 'B-H Curve' is set to 'Linear B-H Relationship'. Under 'Linear Material Properties', 'Relative μ_x ' and 'Relative μ_y ' are both set to 1, and ' ϕ_{hx} , deg' and ' ϕ_{hy} , deg' are both set to 0. Under 'Nonlinear Material Properties', there is an 'Edit B-H Curve' button and ' ϕ_{hmax} , deg' is set to 0. Under 'Coercivity', ' H_c , A/m' is set to 0. Under 'Electrical Conductivity', ' σ , MS/m' is set to 58. Under 'Source Current Density', ' J , MA/m²' is set to 0. Under 'Special Attributes: Lamination & Wire Type', the dropdown is set to 'Magnet wire'. 'Lam thickness, mm' is 0, 'Lam fill factor' is 1, 'Number of strands' is 1, and 'Strand dia, mm' is 1.2192. 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom.

Figura 8. Propiedades del material del devanado

6.4 Diseño analítico

6.4.1 Dimensionamiento inicial

Primero que todo se dimensionamiento general del motor a partir de sus especificaciones tanto mecánicas como eléctricas. Para realizarlo se emplearán las ecuaciones eléctricas y mecánicas conocidas para ello y de forma iterativa.

Para el diseño del motor se ha escogido un motor eléctrico de flujo radial con imanes permanentes superficiales dispuestos sobre el rotor. Anteriormente se ha realizado la previsión de potencia, que encaja entre los baremos del mercado, y se han especificado características que este debe cumplir. El rotor es solidario a la rueda por lo que no hay mecanismos de transmisión del motor a la rueda ni reductores entre ambos elementos.

Especificaciones mecánicas

Especificaciones	Símbolo	Valor	Unidades
Potencia	P	250	W
Velocidad de sincronismo	ω	55,52	rad/s

Tabla 2. Especificaciones mercancías

Especificaciones eléctricas

Especificaciones	Símbolo	Valor	Unidades
Tensión de fase	Uf	25,46	V
Corriente de fase	If	3,27	A
Frecuencia nominal	f	50	Hz
Factor de potencia	$\cos \varphi$	1	-
Pares de polos	p	6	-

Tabla 3. Especificaciones eléctricas

6.4.1.1 Cálculo del Par

Utilizando la relación entre potencia, velocidad de giro y par:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega} = \frac{250}{55,52} = 4.503 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (37)$$

6.4.1.2 Dimensiones en el entrehierro

Las dimensiones del motor vienen limitadas por las dimensiones disponibles de la rueda motriz del tamaño seleccionado de 10 pulgadas para patinetes. A continuación, se muestra un pequeño diagrama con las medias:



Figura 9. Dimensiones de la rueda escogida para el patinete.

Por lo tanto, se establece que el diámetro del conjunto del motor y la estructura que lo sujeta a la rueda debe ser inferior a 14,8 cm y la longitud de máxima de 5 cm (anchura interior de la goma).

Por estas limitaciones se decide que la longitud será 30 mm y el diámetro del entrehierro será de 10 cm. De esta forma el motor deja espacio para toda la carcasa que lo sujeta dentro de la rueda y que sea viable su construcción estando dentro del rango de las dimensiones de los imanes del mercado.

6.4.1.3 Dimensionamiento de los imanes

El primer parámetro a definir es la longitud del entrehierro en el motor. Esta dimensión se determina teniendo en cuenta consideraciones mecánicas de construcción y tolerancia, sin tener en cuenta el espesor del imán. El objetivo es asegurar que no haya contacto o rozamiento entre el imán y el estator.

La longitud del entrehierro se expresa como un porcentaje del diámetro medio del

entrehierro, D . En este caso, se ha establecido una tolerancia mecánica del 2%, lo que significa que la longitud del entrehierro se dimensionará de manera que sea un 2% del diámetro medio del entrehierro. Esta especificación garantiza un espacio adecuado entre el imán y el estator, permitiendo el movimiento libre y evitando fricciones no deseadas.

Es importante considerar cuidadosamente esta dimensión para asegurar un funcionamiento óptimo del motor. Una longitud de entrehierro inadecuada puede afectar el rendimiento y la eficiencia del motor, así como provocar desgaste prematuro o daños en los componentes.

$$l_{\delta} = x\% \cdot D = 0.02 \cdot 100 = 2 \text{ mm} \quad (38)$$

El siguiente parámetro a considerar es el ancho del paso del imán, que se refiere a la porción del arco de la máquina que ocupa el imán. En teoría, el imán podría ocupar todo el ancho del polo, es decir, tener el mismo paso polar que la máquina ($\tau p = \pi \cdot D / 2 \cdot P$). Sin embargo, en la práctica esto no se realiza debido a que la proximidad de los imanes haría que las líneas de campo se cerraran entre ellos, generando un flujo disperso que no se acoplaría adecuadamente al núcleo magnético del estator.

Por esta razón, se opta por que el imán no ocupe todo el paso polar, sino solo un porcentaje, que generalmente oscila entre el 70% y el 80%. Por encima del 80% del paso polar, el flujo disperso es demasiado alto, mientras que por debajo del 70% se produce una pérdida significativa de tensión inducida en el estator de la máquina. Este porcentaje es determinado por el criterio del diseñador y se expresa como el cociente entre la superficie del imán y la superficie del entrehierro.

En el caso específico del motor en cuestión, se ha establecido un recubrimiento polar del 73,5%, lo que significa que el imán ocupará aproximadamente el 73,5% del ancho del paso polar. Esta elección se basa en consideraciones de flujo magnético óptimo y eficiencia del motor.

$$\frac{S_m}{S_g} = 0,735 \quad (39)$$

Para conocer la dimensión necesaria de los imanes a utilizar, en primer lugar, es necesario establecer, a partir de la curva B-H del imán, diferente en cada tipo de imán, el nivel de inducción en el entrehierro.

Al igual que en el caso anterior, se va a comenzar estableciendo una serie de parámetros que corresponder al imán que utilizaremos a la hora del diseño:

El coeficiente de dispersión (K_{σ}) es una medida que indica la variabilidad en la distribución del flujo magnético en el entrehierro de un motor. Un valor de K_{σ} igual a 1 implica una distribución uniforme del flujo magnético, lo que resulta en un motor con una operación más suave y una menor vibración. Un valor mayor a 1 indica una distribución no uniforme del flujo magnético, lo que puede causar fluctuaciones y pérdidas adicionales en el motor. Por lo tanto, un valor igual a 1 se elige para minimizar estas fluctuaciones y pérdidas y están dentro de los valores recomendados.

El coeficiente de Carter (K_c) es utilizado para tener en cuenta la forma del flujo magnético en el entrehierro y la influencia de las ranuras en el diseño del motor. Un valor igual a 1 implica un flujo magnético uniforme y simétrico en el entrehierro, lo que reduce las pérdidas y mejora el rendimiento del motor. Valores mayores a 1 indican una mayor asimetría en el flujo magnético y pueden resultar en pérdidas adicionales y una eficiencia reducida.

La inducción remanente es la medida del campo magnético residual que permanece en un imán permanente después de haber sido magnetizado previamente.

Parámetros de los imanes

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Entrehierro	l_δ	2	mm
Altura del imán	l_m	3	mm
Coefficiente de dispersión	K_σ	1	-
Coefficiente de Carter	K_c	1	-
inducción remanente	B_r	1,1	T
Campo Magnético coercitivo	Hc	994	kA/m
Recubrimiento	-	0,735	-

Tabla 4. Parámetros de los imanes

Una vez se tienen establecidos todos los parámetros podemos proceder al cálculo de la inducción en el entrehierro:

$$B_\delta = \frac{\text{recubrimiento} \cdot K_\sigma \cdot B_r}{1 + \mu_r \cdot \text{Recubrimiento} \cdot K_c \cdot l_\delta / l_m} \quad (40)$$

$$B_\delta = 0.5275 \text{ T} \quad (41)$$

Cabe destacar que mediante el uso de la hoja de cálculo evitamos la realización de un gran número de iteraciones, limitándonos simplemente a ajustar los valores a la última de estas, que es la que viene representada en el proyecto.

Por último, para finalizar con el dimensionamiento de los imanes, se procederá a calcular conocer el flujo que afecta a cada polo. Suponiendo un nivel de inducción igual al estimado en el entrehierro, y con los valores de D y L, el flujo queda:

$$B_\delta = 0.5275 \text{ T} \quad (42)$$

$$\Phi_{0\delta} = L \cdot \frac{D}{p} \cdot \sqrt{2} \cdot B_\delta \quad (43)$$

$$\Phi_{0\delta} = 0.00037264 \text{ Wb} \quad (44)$$

6.4.1.4 Dimensionamiento devanado

El parámetro crítico en el diseño del devanado es el número de ranuras en las que se distribuyen las bobinas. La elección de este número depende de varios criterios, como la reducción de armónicos deseados, el tamaño del motor y el número de polos. Además, también tiene un impacto en el rizado de par generado por el motor.

En este caso, se ha seleccionado una configuración de tres ranuras por fase y por polo. Esta elección tiene como objetivo reducir el armónico de tercer orden y se considera adecuada en términos del tamaño del estator deseado. Cabe mencionar que al tratarse de un estator interno, se dispone de menos espacio para las ranuras en comparación con un estator externo de igual diámetro medio de entrehierro.

Esta configuración de tres ranuras por fase y polo ha sido elegida tras considerar diversos factores y criterios de diseño. Se espera que esta selección contribuya a obtener un funcionamiento más suave y eficiente del motor, minimizando los armónicos no deseados y el rizado de par.

Como el motor es trifásico de un par de polos, el número total de ranuras del estator será:

$$Q = m \cdot 2p \cdot q = 36 \text{ ranuras} \quad (45)$$

El cálculo del número de ranuras es un aspecto crucial en las máquinas de imanes permanentes debido a su influencia en el par de cogging. El par cogging se origina debido a la interacción entre los imanes permanentes del rotor y las ranuras del estator. Estas ranuras crean variaciones locales en el campo magnético producido por los imanes permanentes a medida que el rotor gira. Como resultado, se producen variaciones en el par motor que se sienten como un "cogging" o un "engranamiento" irregular del motor.

El par cogging puede tener varios efectos no deseados en la operación del motor. Por un lado, puede generar vibraciones y ruidos perceptibles, lo que puede ser indeseable en aplicaciones que requieren un funcionamiento silencioso. Además, puede causar fluctuaciones en el par de salida del motor, lo que puede afectar la precisión y estabilidad de las aplicaciones que dependen de un torque constante.

Lo siguiente que se debe decidir es si se emplean bobinas de una o dos capas. La capa doble está especialmente indicada para bobinas con paso acortado. El paso acortado ayuda a conseguir un flujo con una forma de onda senoidal de más calidad. Sin embargo, de nuevo por la limitación de tamaño del estator y porque ya se considera suficiente el efecto de una distribución en 3 ranuras, se opta por una única capa.

De esa manera se puede calcular el número de ranuras por polo y fase, q , que debe ser un número entero.

$$q = \frac{Q}{2p \cdot 3} = 1 \text{ ranuras polo, fase} \quad (46)$$

Para calcular el número de bobinas (B) se debe decidir el número de capas, para este tipo de motores la configuración más habitual que de una sola capa. El número de bobinas se determina:

$$B = \frac{Q \cdot \text{número de capas}}{2} = \frac{36 \cdot 1}{2} = 18 \quad (47)$$

Con el flujo que afecta a cada polo, calculado anteriormente, se entra en la ecuación de la tensión de inducido, y equiparándola a la tensión de fase se despeja el número de espiras por polo (n_s):

$$n_s = \frac{E}{4.44 \cdot p \cdot \Phi_{0\delta} \cdot f \cdot \xi} \quad (48)$$

Con n_s se recalcula el flujo por polo y se comprueba si el nivel de inducción de vacío $B\delta$ y la carga lineal A son similares a los supuestos al inicio de la iteración. De no ser así, se toman estos nuevos valores y se reinicia la iteración.

$$N_s = n_s \cdot p = 312 \text{ espiras} \quad (49)$$

El número de conductores es equivalente al número de espiras que tiene una fase por dos, ya que cada espira tiene dos conductores, uno de ida y otro de vuelta, y multiplicado por 3 ya que se trata de una máquina trifásica. Suponiendo que el sistema es equilibrado y que todas las bobinas de la máquina están puestas en serie, la corriente que circula por un conductor coincide con la corriente que circula por toda la fase. Con los valores previamente calculados se puede calcular la carga lineal (A) se puede calcular de la siguiente forma:

$$A = \frac{N_c \cdot I_c}{\pi \cdot D} = \frac{3 \cdot N \cdot 2 \cdot I}{\pi \cdot D} = \frac{6 \cdot N \cdot I}{\pi \cdot D} \quad (50)$$

Tras realizar varias iteraciones se ajustaron los parámetros a los siguientes valores:

Dimensiones del devanado y el entrehierro. Resultado analítico

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Factor de devanado	ξ	1	-
Inducción en el entrehierro	B_{δ}	0,537	T
Carga lineal	A	19 485,15	A/m
Número de ranuras	Q	36	-
Número de ranuras por polo y fase	q	1	-
Paso	ξ_p	2	mm
Capas	-	1	-
Número de Bobinas	B_{bob}	18	-
Número de espiras por polo y fase	n_s	52	-
Flujo del entrehierro en vacío	$\Phi_{o\delta}$	0,00037264	Wb
Longitud del entrehierro	l_{δ}	2	mm
Diámetro del entrehierro	D	100	mm
Longitud de la máquina	L	30	mm

Tabla 5. Dimensiones del devanado y el entrehierro

6.4.1.5 Dimensionamiento estator

Para definir el estator es necesario conocer sus dimensiones interna y externa, así como el número de ranuras y su geometría. Los parámetros que los describen son:

$D_{is} \equiv$ *Diámetro interno*

$D_{es} \equiv$ *Diámetro externo*

$w_r \equiv$ *Anchura de ranura*

$w_d \equiv$ *Anchura del diente*

$w_o \equiv$ *Anchura de la garganta*

$h_{s0} \equiv$ *Altura de la garganta*

$h_r \equiv$ *Altura de la ranura*

$h_{sy} \equiv$ *Altura de la ranura*

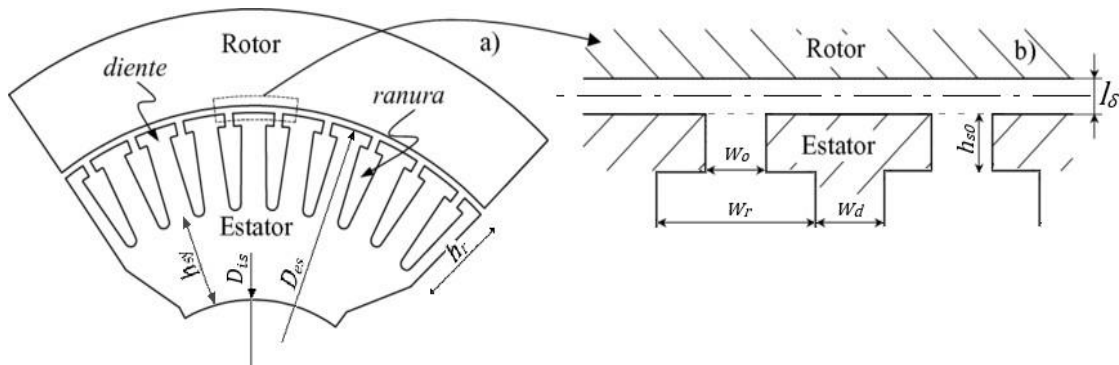


Figura 10. Esquema del estator interior del motor .

Hallar el diámetro externo resulta trivial:

$$D_{es} = D - l_{\delta} \quad (51)$$

Para el resto de los parámetros es necesario analizar la conservación del flujo a través de la máquina. Se toma como referencia el valor del flujo en el entrehierro, por tanto, los parámetros quedarán definidos a dicho nivel.

Se considera que todo el flujo que atraviesa el entrehierro se transmite al material únicamente a través de los dientes, pues es el camino preferente al ser estos de material ferromagnético mientras que la ranura tiene una permeabilidad próxima a la de vacío. De este modo, imponiendo una inducción de máxima de valor B_d de 1,5 T en el diente, se igualan las ecuaciones:

Para el cálculo del ancho y altura de garganta, se pueden tomar valores iniciales de 4 mm y 2 mm respectivamente. Estos valores se pueden ajustar posteriormente en función de los resultados obtenidos en la simulación.

La altura de la ranura se calcula en base a la forma que tendrá la ranura y el área de ranura requerida. El área de ranura necesaria se obtiene sumando las secciones transversales de todos los conductores y multiplicándolo por el inverso del factor de relleno (Fr). En este caso, se considera un factor de relleno de 0,5 para un devanado de una sola capa.

Estos cálculos se realizan a nivel del flujo en el entrehierro y sirven como parámetros iniciales que luego se pueden ajustar y refinar según los resultados de la simulación y el diseño de la máquina.

La sección de conductor se calcula según la densidad de corriente que considera el diseñador. Para esta decisión se tiene en cuenta, principalmente, las pérdidas por efecto Joule que se espera en las bobinas. Por tanto, influyen factores como el material del conductor, la frecuencia de excitación y el nivel de refrigeración con el que cuenta el accionamiento.

En el caso de accionamientos sin refrigeración forzada, la densidad de corriente generalmente se encuentra en el rango de 4.5 a 6 A/mm². Sin embargo, dado que el motor en este caso se utiliza para mover la rueda motriz de un patinete a una velocidad de 500 rpm y se espera una capacidad de refrigeración limitada debido a la proximidad de la rueda al rotor y la dirección del flujo de aire, es prudente optar por una densidad de corriente de 4.5 A/mm² para proteger y prevenir posibles problemas de calentamiento.

Según la documentación consultada, para accionamientos sin refrigeración forzada, la densidad de corriente δ se sitúa entre 4.5 y 6 A/mm². En la aplicación del motor en este trabajo, se recuerda que es para mover la rueda motriz de un patinete a una velocidad de 500 rpm. Teniendo en cuenta que esta rueda se encuentra fijada muy próxima al rotor, y que el flujo de aire sigue la dirección transversal del motor; la máquina tendrá una capacidad de refrigeración poco considerable durante su funcionamiento. Por ello, y a forma de proteger y ser precavido, se considera adecuada una densidad de corriente de 4,5 A/mm².

Cooling Method	J_{srms} Current Density (Arms/mm ²)
Totally enclosed without external cooling	4.5 to 6
Forced air cooling over stator surface	7.5 to 9
Air cooling through stator/rotor ducts or vents	14 to 15
Liquid cooling in ducts or spraying on end winding	20 or greater

Tabla 1. Densidad de corriente según el método de refrigeración. [T.A.Lipo, 2011]

Dado que la intensidad nominal del motor es de 3,27 A, la sección de conductor ac' necesaria será:

$$a'_c = \frac{I}{\delta} = 0.727 \text{ mm}^2 \quad (52)$$

La fabricación de conductores sigue varios estándares internacionales, por lo que hay que seleccionar un cable de calibre igual o superior a la sección hallada anteriormente:

AWG	Diameter [inches]	Diameter [mm]	Area [mm ²]	Resistance [Ohms / 1000 ft]	Resistance [Ohms / km]	Max Current [Amperes]	Max Frequency for 100% skin depth
0000 (4/0)	0.46	11.684	107	0.049	0.16072	302	125 Hz
000 (3/0)	0.4096	10.40384	85	0.0618	0.202704	239	160 Hz
00 (2/0)	0.3648	9.26592	67.4	0.0779	0.255512	190	200 Hz
0 (1/0)	0.3249	8.25246	53.5	0.0983	0.322424	150	250 Hz
1	0.2893	7.34822	42.4	0.1239	0.406392	119	325 Hz
2	0.2576	6.54304	33.6	0.1563	0.512664	94	410 Hz
3	0.2294	5.82676	26.7	0.197	0.64616	75	500 Hz
4	0.2043	5.18922	21.2	0.2485	0.81508	60	650 Hz
5	0.1819	4.62026	16.8	0.3133	1.027624	47	810 Hz
6	0.162	4.1148	13.3	0.3951	1.295928	37	1100 Hz
7	0.1443	3.66522	10.5	0.4982	1.634096	30	1300 Hz
8	0.1285	3.2639	8.37	0.6282	2.060496	24	1650 Hz
9	0.1144	2.90576	6.63	0.7921	2.598088	19	2050 Hz
10	0.1019	2.58826	5.26	0.9989	3.276392	15	2600 Hz
11	0.0907	2.30378	4.17	1.26	4.1328	12	3200 Hz
12	0.0808	2.05232	3.31	1.588	5.20864	9.3	4150 Hz
13	0.072	1.8288	2.62	2.003	6.56984	7.4	5300 Hz
14	0.0641	1.62814	2.08	2.525	8.282	5.9	6700 Hz
15	0.0571	1.45034	1.65	3.184	10.44352	4.7	8250 Hz
16	0.0508	1.29032	1.31	4.016	13.17248	3.7	11 k Hz
17	0.0453	1.15062	1.04	5.064	16.60992	2.9	13 k Hz
18	0.0403	1.02362	0.823	6.385	20.9428	2.3	17 kHz
19	0.0359	0.91186	0.653	8.051	26.40728	1.8	21 kHz
20	0.032	0.8128	0.518	10.15	33.292	1.5	27 kHz
21	0.0285	0.7239	0.41	12.8	41.984	1.2	33 kHz
22	0.0254	0.64516	0.326	16.14	52.9392	0.92	42 kHz
23	0.0226	0.57404	0.258	20.36	66.7808	0.729	53 kHz
24	0.0201	0.51054	0.205	25.67	84.1976	0.577	68 kHz
25	0.0179	0.45466	0.162	32.37	106.1736	0.457	85 kHz
26	0.0159	0.40386	0.129	40.81	133.8568	0.361	107 kHz
27	0.0142	0.36068	0.102	51.47	168.8216	0.288	130 kHz

Tabla 6. Tabla de dimensiones de calibres AWG.

El calibre que mejor cumple con la densidad de corriente objetivo es el calibre 18 (AWG), de sección $ac = 0,8128 \text{ mm}^2$. Sin embargo, se considera emplear 5 conductores, conectados en paralelo, de menor diámetro que sumen la sección necesaria, debido a que en el mercado se encuentra más disponibilidad de ellos y con el fin de poder aprovechar más el espacio de la ranura. El calibre 25 AWG de diámetro 0,45 mm cumple el requisito:

$$a_c = 0.162 \text{ mm}^2 \quad (53)$$

$$a'_c = a_c * 5 = 0.81 \text{ mm}^2 \quad (54)$$

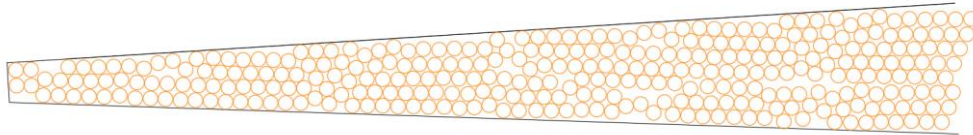
Conocido este dato, con un factor de relleno de 0.5, y sabiendo que hay 52 conductores por ranura, el área de ranura será de:

$$A_r = \frac{n_{bob} \cdot 5 \cdot ac}{Fr} = 84.24 \text{ mm}^2 \quad (55)$$

Al ser interno el estator, la ranura debe estrecharse progresivamente según aumenta su profundidad. Por ello para calcular la altura de ranura se ha optado por aproximarla según una geometría trapezoidal:

$$h_r = \frac{A_r}{\left(\frac{w_r + w_{r2}}{2}\right)} = 20.54 \text{ mm} \quad (56)$$

Se puede comprobar gráficamente que caben los $5 \times 52 = 260$ conductores de calibre AWG 25:



Para calcular la altura de la culata se hace otro balance de flujo, en el que se impone un valor límite de inducción a la chapa del estator, B_{sy} , de 1,2 T:

$$B_\delta \cdot \frac{\pi \cdot D}{2p} \cdot L \cdot \frac{1}{2} = B_{sy} \cdot h_{sy} \cdot L \quad (57)$$

El diámetro interior se resuelve fácilmente a partir del diámetro externo, la altura de ranura y la altura de culata:

$$D_{is} = D_{es} - 2 \cdot h_{sy} - 2 \cdot h_r \quad (58)$$

Dimensiones del Estator

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Diámetro externo del estator	D_{es}	98	mm
Diámetro interno del estator	D_{is}	46,42	mm
Ancho de ranura	w_r	5,57	mm
Ancho de diente	w_d	3,0688	mm
Ancho de garganta	w_o	2	mm
Altura de garganta	h_{s0}	2	mm
Altura de la ranura	h_r	20,54	mm
Altura de la culata	h_{sy}	5,75	mm

Tabla 7. Dimensiones del estator.

6.4.1.6 Dimensionamiento del rotor

$D_{ir} \equiv$ Diámetro interno

$D_{er} \equiv$ Diámetro externo

$h_{ry} \equiv$ Altura de la culata del rotor

$b_m \equiv$ Longitud iman

El cálculo del diámetro interno es directo a partir del diámetro del entrehierro, de su espesor, y el espesor del imán:

$$D_{ir} = D + l_\delta + 2 \cdot l_m \quad (59)$$

Para calcular la altura de la culata del rotor nuevamente ha de imponerse un nivel máximo de inducción magnética en el material. Se elige una inducción máxima B_{ry} de 1,3 T. Despejando de la ecuación:

$$B_\delta \cdot \frac{\pi \cdot D}{2p} \cdot L \cdot \frac{1}{2} = B_{ry} \cdot h_{ry} \cdot L \quad (60)$$

Por último, una vez hallada la altura de la culata, se halla el diámetro exterior del rotor:

$$D_{er} = D_{ir} + 2 \cdot h_{ry} \quad (61)$$

Dimensiones del Rotor

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Diámetro interno	D_{ir}	109	mm
Diámetro externo	D_{er}	119,8	mm
Altura de la culata	h_{ry}	5,4	mm

Tabla 8. Dimensiones del rotor

6.5 Diseño numérico por elementos finitos

El método numérico por elementos finitos (MEF) es una técnica matemática utilizada para aproximar soluciones numéricas de ecuaciones diferenciales que describen los fenómenos físicos de un sistema real. Su implementación a través de software de simulación permite resolver una amplia gama de problemas en geometrías complejas, facilitando el diseño y la mejora de manera más sencilla y económica.

El MEF se basa en dividir una geometría predefinida en un número finito de partes o elementos, creando una malla. El comportamiento de cada elemento se especifica mediante un conjunto finito de parámetros asociados a puntos característicos llamados nodos, que actúan como puntos de unión entre elementos adyacentes (discretización física). Las incógnitas del problema se aproximan mediante valores en los nodos, y el comportamiento dentro de cada elemento se define mediante funciones de interpolación (discretización matemática). De esta manera, se obtiene una aproximación discreta de la solución del problema continuo, donde el número de nodos determina la precisión y el tiempo de cálculo.

En el contexto del diseño de un motor de imanes permanentes, se utilizarán los parámetros geométricos obtenidos en el análisis analítico para configurar el motor en un programa de simulación basado en el MEF. A partir de esta configuración, se llevará a cabo un análisis estático y dinámico en dos dimensiones para evaluar el rendimiento del motor bajo diferentes condiciones y cargas.

Este enfoque permite estudiar el comportamiento del motor en un entorno virtual antes de su construcción física, lo que brinda la oportunidad de realizar ajustes y mejoras para optimizar su rendimiento de manera eficiente.

6.5.1.1 Definición geométrica

Para el definir la geometría del conjunto del motor y sus diferentes elementos se a utilizado el programa de diseño asistido por ordenador de Autodesk AutoCAD para crear el dibujo en 2D preciso del motor teniendo en cuenta los parámetros obtenidos previamente en el diseño analítico. Posteriormente el conjunto se exporta del programa AutoCAD para importarlo en el programa FEMM para poder realizar la asignación de materiales, mallado y diferentes simulaciones.

A continuación, se muestra el estator y el rotor con sus imanes permanentes realizados en AutoCAD conforme a los cálculos y medidas realizados en la etapa de diseño.

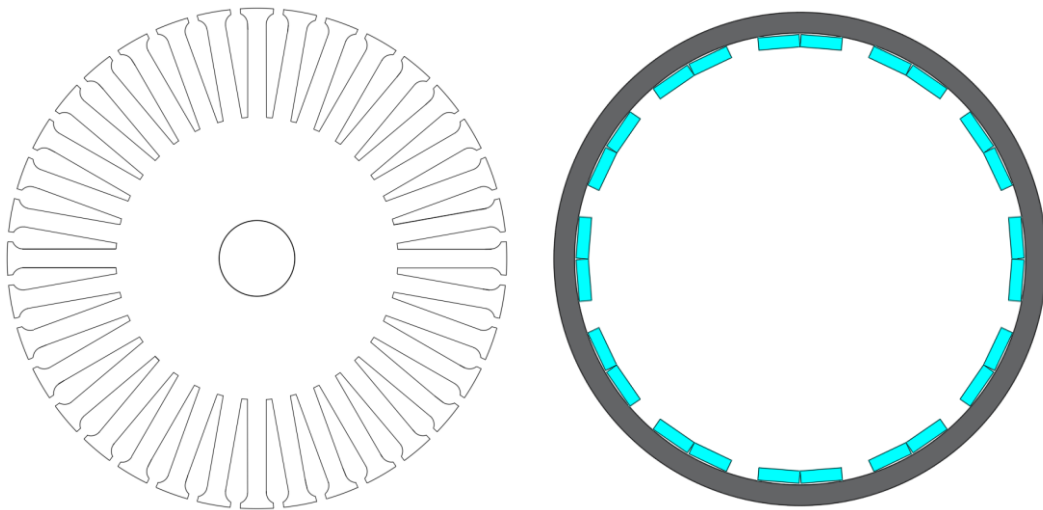


Figura 11. geometrías del estator y del rotor con los imanes

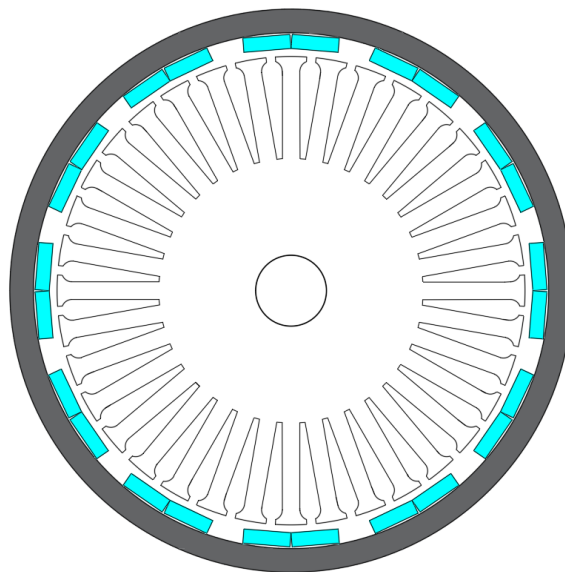


Figura 12. Geometrías del conjunto del motor

Para la realización del rotor es de imanes superficiales y se ha elegido que cada polo este compuesto por dos imanes. Esta elección viene dada por el análisis del mercado de los imanes comerciales disponibles, económicos y que mejor se adaptan a las características y dimensiones del motor que se desea diseñar. Estos dos imanes tienen las dimensiones de 30x10x3 mm lo que se adaptan perfectamente a la longitud del motor (30 mm) y como cada uno es de 10 mm, colocando uno al lado del otro se consigue una longitud total de 20 mm que realizando los cálculos pertinentes da el recubrimiento exacto al deseado en la etapa de diseño analítico.

El estator es interno y todas las dimensiones son las que se han calculado previamente y en el propio programa de AutoCAD se ha comprobado que tienen el área adecuada para que puedan caber los conductores deseados (comprobado con la herramienta que permite medir áreas y comprobado al dibujar cada uno de los conductores dentro de las ranuras). El estator tiene un diámetro interior de 15 mm porque es el diámetro del eje interior que se quiere incorporar a modo sujeción del motor. Es un diámetro que estudiando las diferentes soluciones constructivas que se encuentran en los patinetes comerciales es un valor muy normalizado y suficiente para poder aguantar los esfuerzos y que también permite pasar los cables de conexión del motor.

Este modelo realizado en AutoCAD se debe importar en el programa FEMM como un fichero DXF. Como se puede comprobar es un dibujo 2D de la geometría del motor, para poder realizar la simulación del motor entero teniendo en cuenta la profundidad solo hace falta especificarlo en las propiedades del problema del programa ya que el plano del motor se repite en toda su longitud y no varía.

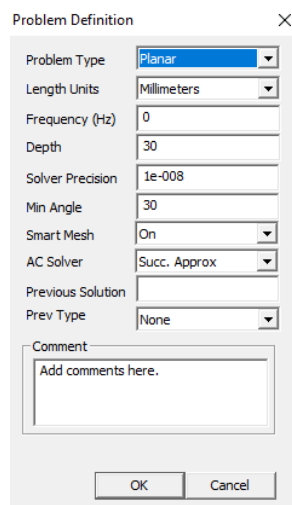


Figura 13. Definición del problema FEMM

6.5.1.2 Definición del Devanado

Para el devanado se ha escogido realizar un devanado distribuido, a continuación se detallan algunas ventajas que presentan este tipo de devanado respecto a otros como el devanado concentrado.

En primer lugar, el devanado distribuido permite una distribución más uniforme de la corriente a lo largo del estator. Esto evita la concentración de corriente en las bobinas individuales, lo que a su vez reduce las pérdidas por efecto Joule y la generación de calor. En aplicaciones de patinetes eléctricos, donde el tamaño y el peso son factores cruciales, mantener una baja temperatura de funcionamiento es esencial para evitar el sobrecalentamiento del motor.

Además, el devanado distribuido ofrece una mayor capacidad de carga en comparación con el devanado concentrado. Al distribuir las bobinas a lo largo del estator, se aumenta la superficie de contacto entre las bobinas y los núcleos magnéticos, mejorando la transferencia de calor y la capacidad de disipación de calor. Esto permite un mayor flujo de corriente y una mayor capacidad de carga, lo que resulta en un mejor rendimiento en términos de torque y potencia.

Otro aspecto importante es la reducción de armónicos. El devanado distribuido ayuda a minimizar las vibraciones y el ruido del motor al reducir los armónicos de corriente. Al distribuir las bobinas, se logra una mejor simetría y equilibrio en las corrientes, lo que disminuye la presencia de armónicos no deseados y mejora la calidad de la señal eléctrica.

En términos de tolerancia a fallas, el devanado distribuido ofrece ventajas significativas. Si una bobina o un grupo de bobinas falla en un devanado distribuido, el resto del devanado puede seguir funcionando de manera efectiva. Esto proporciona una mayor tolerancia a fallas en comparación con un devanado concentrado, donde la falla de una bobina puede afectar significativamente el rendimiento general del motor.

Además, el devanado distribuido puede ser más fácil de fabricar y bobinar, especialmente en motores de pequeño tamaño. Su diseño adaptable también permite su implementación en diferentes configuraciones y diseños de motores, lo que brinda flexibilidad en el proceso de fabricación.

Para lograr una distribución adecuada del devanado en el estator, es fundamental realizar un cálculo preciso del paso de bobina. Este parámetro determina el número de dientes que separan las ranuras en las que se ubican los distintos lados de una bobina (ida y vuelta).

Se establece que el paso de bobina en grados eléctricos es de 180° para cualquier bobina. A partir de esta información, es posible calcular los grados geométricos ocupados por cada ranura. De esta manera, el paso de bobina en términos de número de dientes se define de la siguiente manera:

$$\alpha_g = \frac{\alpha_e}{p} = \frac{180^\circ}{6 \text{ pares de polos}} = 30^\circ \quad (62)$$

$$\alpha_{ranura} = \frac{360^\circ}{Q} = \frac{360}{36} = 10^\circ \text{ cada ranura} \quad (63)$$

Después de calcular el paso de bobina se procede a calcular el paso entre fases. Para la secuencia que se seguirá para el sistema trifásico (A B C) cabe destacar que la polaridad de la bobina intermedia debe ser diferente en un devanado distribuido para generar un campo magnético rotativo en el estator. Esta configuración asegura una distribución asimétrica del flujo magnético y una secuencia adecuada de conmutación para lograr un funcionamiento eficiente y suave del motor. Por ello se seguirá la secuencia A+ C- B+. (el símbolo “+” denomina el lado de ida de la bobina y el símbolo “-” denomina el lado de vuelta de la bobina).

En un sistema eléctrico trifásico equilibrado las fases están a 120° entre sí, por lo que el paso entre fases queda:

$$\alpha_g = \frac{\alpha_e}{p} = \frac{120}{6} = 20^\circ \quad (64)$$

$$\tau_f = \frac{20^\circ}{10^\circ / \text{ranura}} = 2 \text{ ranuras} \quad (65)$$

A continuación, se muestra y se ilustra la secuencia final de todo el devanado para un motor eléctrico de rotor externo de 6 pares de polos y 36 ranuras con lo anteriormente calculado:

A|b|C|a|B|c|A|b|C|a|B|c|A|b|C|a|B|c|A|b|C|a|B|c|A|b|C|a|B|c|A|b|C|a|B|c|A|b|C|a|B|c|

Donde:

A ≡ A+ ; a ≡ A -

B ≡ B+ ; b ≡ B -

C ≡ C+ ; c ≡ C -

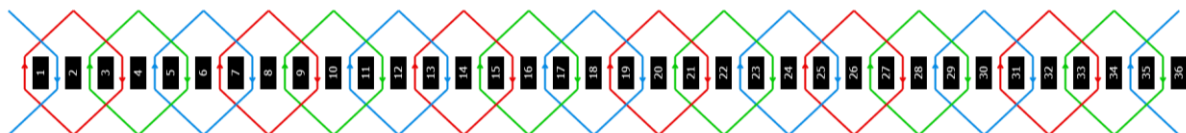


Figura 14. Esquema devanado.

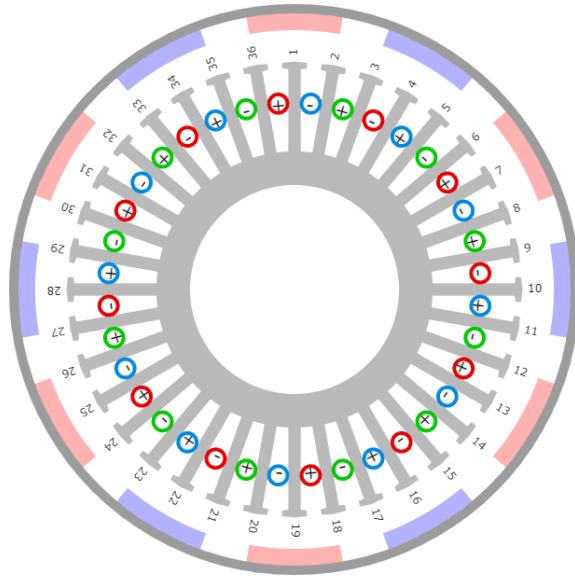


Figura 15. distribución del devanado para $Q=36$, $p=6$

Se ilustra la distribución del devanado del estator en el conjunto del motor diseñado:

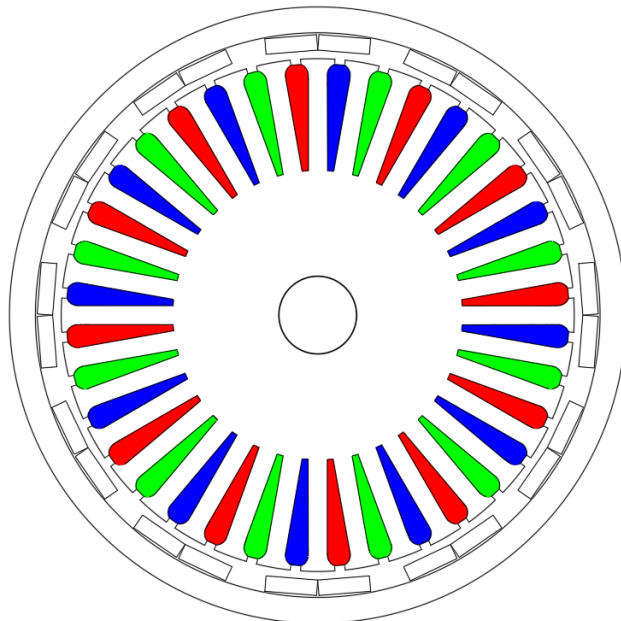



Figura 16. distribución del devanado en la geometría del motor diseñado

6.5.1.3 Generación del mallado

Para realizar el mallado en el programa FEMM previamente hay que importar el diseño de AutoCAD al proyecto y haber añadido todos los materiales y propiedades que corresponden a cada parte constructiva del motor. Cabe destacar que los imanes se deben orientar de forma manual y teniendo en cuenta que deben estar alternados entre si.

Una vez se ha realizado todo lo anterior y comprobado toda la distribución se puede realizar el mallado con el botón (). Esta acción lo que hace es generar una malla triangular para el problema. Si el espaciado de la malla parece fino o demasiado grueso, se pueden seleccionar etiquetas de bloque o segmentos de línea y ajustar el tamaño de malla definido en las propiedades de cada objeto.

Es importante destacar que cuanto mas pequeño es el tamaño de cada elemento del mallado, mejor será la calidad de los resultados de los cálculos pero se consumen muchas mas recursos y muchísimo mas tiempo. Es por ello que tras probar y comparar resultados se deja configuración por defecto porque esta no difiera en gran medida en los valores obtenidos para un mallado mucho mas exhaustivo y porque de esta forma se optimizan los recursos y el tiempo.

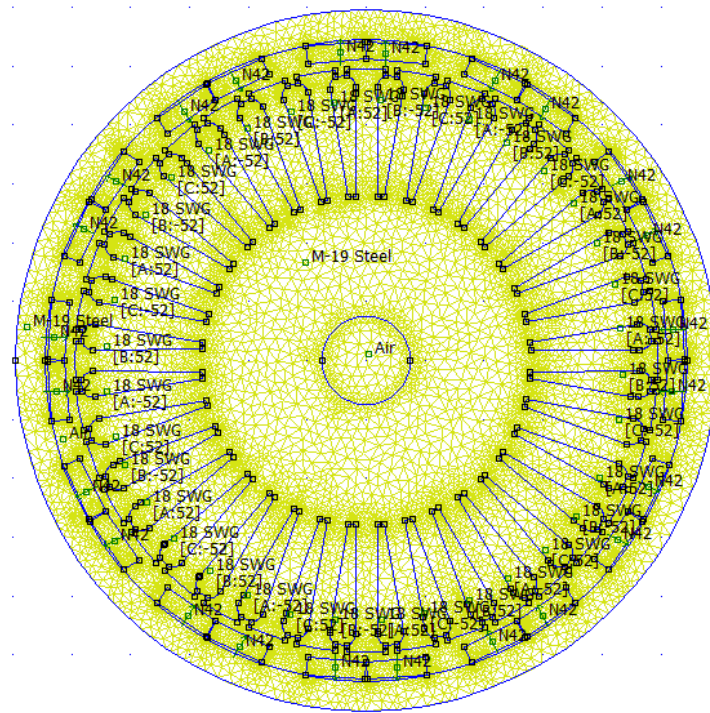


Figura 17. Mallado del modelo completo.

7 Simulaciones

A continuación, tras el diseño del motor a nivel constructivo, se procede a su comprobación a nivel funcional mediante una serie de simulaciones. Se pretende así garantizar que el modelo aporta las prestaciones eléctricas y magnéticas para las que ha sido diseñado.

El proceso de simulación del motor eléctrico de imanes permanentes se realizará utilizando el software FEMM (Finite Element Method Magnetics) y MATLAB.

En primer lugar, se importa el diseño realizado en AutoCAD en el software FEMM. Después se deben definir las propiedades de los materiales utilizados en el motor y también se deben establecer las condiciones de contorno y las restricciones para el análisis magnético, como las condiciones de excitación, condiciones de frontera y restricciones mecánicas.

Una vez que el motor está modelado, se procede a configurar la simulación en MATLAB. Esto implica definir los parámetros de simulación, como la frecuencia de operación, corriente de excitación, cálculos, etc. En MATLAB se abre el proyecto de FEMM y desde el programa se realizan ajustes, como puede ser la rotación del rotor, donde en FEMM se analiza y exporta los datos en MATLAB donde estos se pueden manipular y para calcular otros parámetros para finalmente ser analizados o realizar graficas.

Pese a que el software FEMM tiene su propio lenguaje (Lua) para poder realizar acciones y diferentes bucles con tal de obtener datos y simular, es una forma algo robusta y no permite realizar grandes acciones ni posteriormente manipular los datos obtenidos. Por este motivo se ha decidido realizar las simulaciones mediante MATLAB y FEMM.

El código implementado en Matlab para la realización de todas las simulaciones, diferentes comprobaciones y la realización de las diferentes graficas se encontrara al final del documento en los anexos.

7.1 Ensayo magnetostático

Como parte del proceso de evaluación del funcionamiento magnético del modelo, se lleva a cabo una simulación magnetostática, que consiste en un análisis estático para verificar la integridad del campo magnético. En este ensayo, se examinan las líneas de flujo y los niveles de inducción en los diversos componentes de la máquina.

Es importante destacar que esta simulación se realiza sin aplicar carga alguna, lo que permite evaluar exclusivamente el comportamiento magnético del sistema. Además, al tratarse de un análisis estático, no es necesario configurar parámetros de tiempo o ángulos de simulación.

Una vez completada la simulación, se procede a examinar los resultados obtenidos para verificar la correcta definición de los imanes y el establecimiento adecuado del campo magnético en el motor. Asimismo, se realiza una verificación para garantizar que se cumplan los criterios establecidos por el diseñador en cuanto a las inducciones máximas de los distintos elementos.

Al observar detenidamente las gráficas generadas, se puede constatar que las líneas de flujo del modelo siguen los patrones esperados. Esto confirma que las condiciones de contorno en los límites laterales, en relación al campo magnético, son adecuadas. En consecuencia, se puede concluir que los imanes permanentes se encuentran correctamente orientados en el sistema.

Es importante resaltar que estos resultados son el fruto de un riguroso proceso de análisis y verificación, que garantiza el correcto desempeño magnético del motor y respalda la calidad de su diseño.

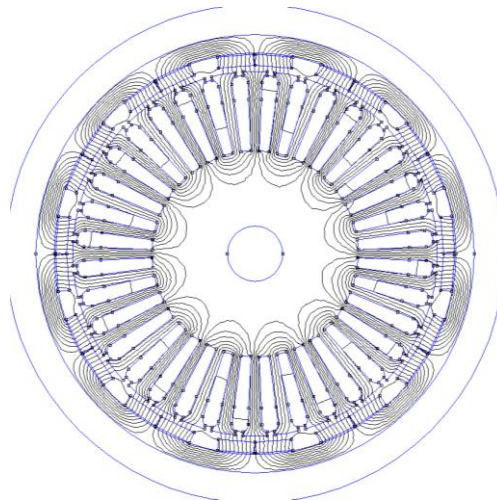


Figura 18. líneas de flujo en el modelo

Al analizar la representación gráfica, se puede verificar que las líneas de flujo del modelo siguen las trayectorias esperadas. Este resultado confirma que las condiciones de contorno en los límites laterales con respecto al campo magnético son adecuadas. Además, podemos concluir que los imanes permanentes están correctamente orientados, ya que su influencia en la dirección y distribución del campo magnético es coherente con el diseño y las especificaciones del motor.

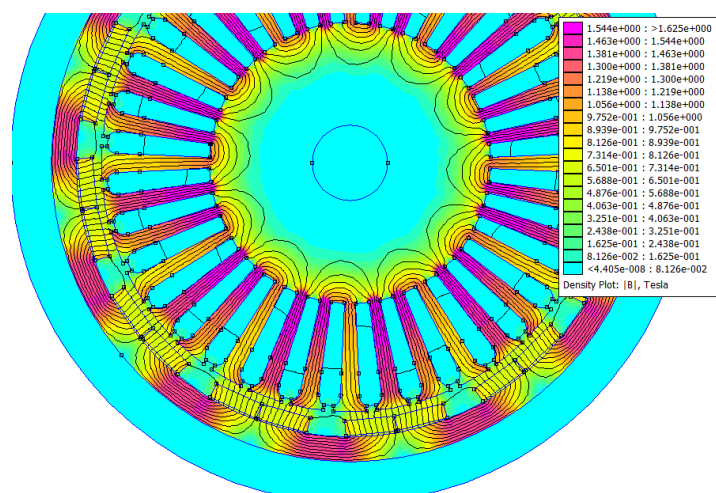


Figura 19. Densidad de flujo.

Al analizar la representación gráfica de las magnitudes de inducción magnética, se puede observar que los niveles de inducción en el motor se encuentran dentro de los rangos esperados y se mantienen dentro de los límites establecidos por el diseñador. Aunque se detectan valores de 1,544 T en las cerraduras de las ranuras, es importante destacar que los

valores en los dientes se mantienen por debajo del límite máximo de inducción. Esto indica que el diseño del motor cumple con los criterios de seguridad y rendimiento establecidos, evitando posibles problemas asociados a altos niveles de inducción magnética.

7.2 Ensayo de vacío

En la simulación del ensayo de vacío, se lleva a cabo una simulación dinámica para verificar que la inducción en las bobinas del estator sea correcta, es decir, que las tensiones y el flujo inducido sean senoidales. Para lograr esto, se realiza un análisis transitorio de la máquina en modo generador, con el rotor girando a la velocidad angular nominal y sin aplicar corriente en el devanado del estator.

En primer lugar, se configura el parámetro de carga de excitación en el estator. Se aplica la siguiente corriente a los bobinados del estator.

$$I_A = 0$$

$$I_B = 0$$

$$I_C = 0$$

Además de la configuración del parámetro de carga de excitación en el estator, también es necesario configurar el parámetro de excitación de la velocidad angular en las partes móviles de la máquina, es decir, en el rotor y los imanes permanentes. En este caso, se asigna un valor de 500 rpm, que corresponde a la velocidad angular nominal expresada en revoluciones por minuto.

Para realizar una simulación dinámica, es necesario configurar el tiempo de simulación. Esto implica definir dos parámetros: el tiempo de paso y el tiempo de parada.

El tiempo de paso de la simulación se refiere al intervalo de tiempo entre simulaciones consecutivas para diferentes puntos. Cuanto menor sea el tiempo de paso, mayor será la precisión de la simulación, pero también aumentará el tiempo de computación requerido. Por lo tanto, se busca encontrar un equilibrio razonable entre precisión y tiempo de cálculo. En este caso, se elige un tiempo de paso equivalente al tiempo que tarda el rotor en girar un grado. Dado que la velocidad nominal es de 500 rpm, el rotor gira 3000 grados cada segundo, es decir, completa un giro de un grado cada 0,3333 ms.

Se establece un tiempo de simulación de 80 ms, que es más que suficiente para simular una revolución de 120 grados del rotor, que son 40 ms, pues el comportamiento a partir de esa rotación se repite y no es necesario simular más tiempo.

Una vez que se haya realizado la simulación y se hayan obtenido los resultados, se podrá verificar si las bobinas están correctamente definidas y si la inducción se establece de manera adecuada.

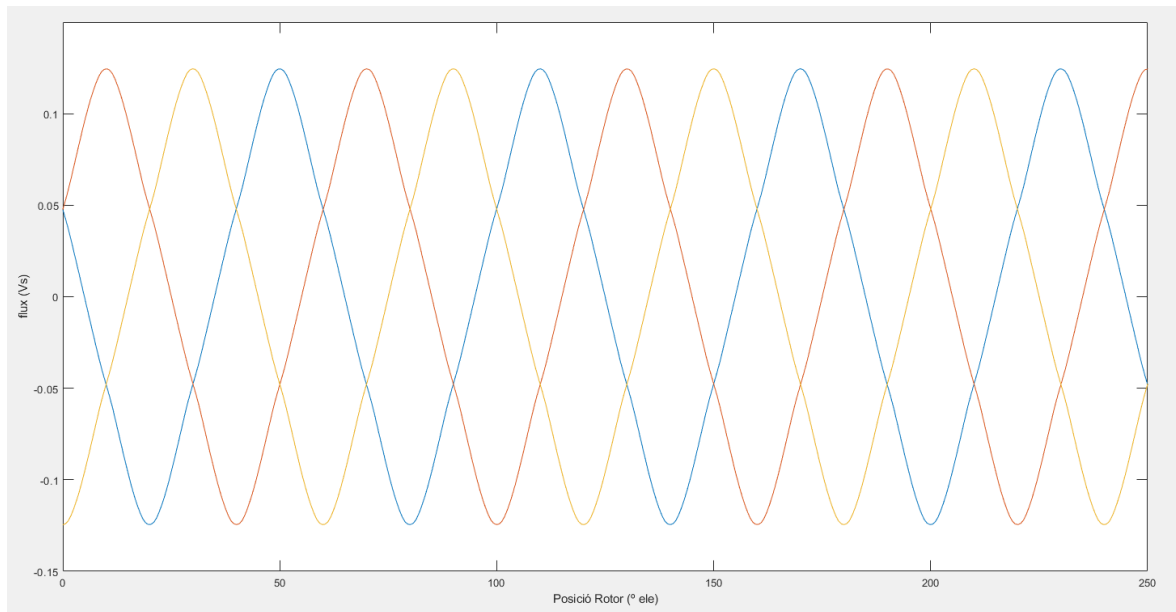


Figura 20. Flujo del motor ensayo vacío.

La gráfica proporcionada muestra la evolución de los enlaces de flujo a lo largo del tiempo. Es evidente que la frecuencia de la alimentación coincide con el valor teórico calculado en el diseño analítico, que es de 50 Hz, y se observa que siguen un patrón sinusoidal característico. Este resultado confirma que el flujo inducido en las bobinas es correcto y está en línea con las expectativas teóricas.

$$\Phi_{A\ ef} = 0.0784\ Wb$$

$$\Phi_{B\ ef} = 0.0814\ Wb$$

$$\Phi_{C\ ef} = 0.0800\ Wb$$

El valor diferente para cada fase se debe a la posición relativa de cada bobina con respecto a las zonas de mayor y menor reluctancia de la máquina.

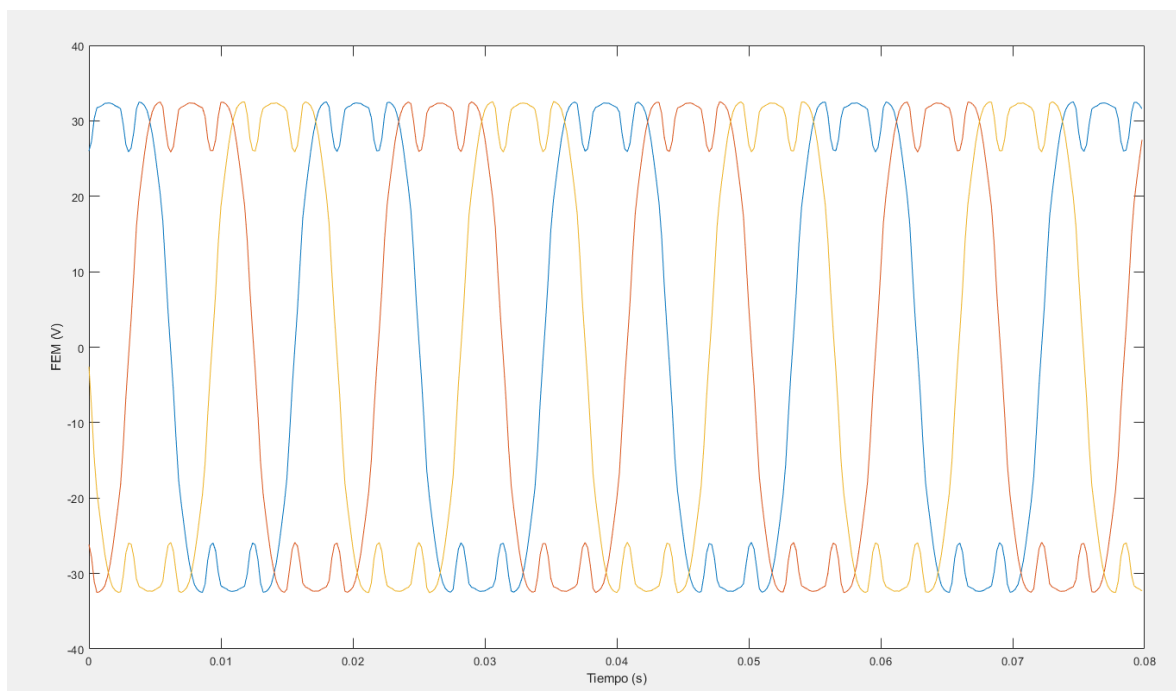


Figura 21. Tensiones inducidas

En relación a las tensiones inducidas, se observa en la gráfica que siguen el periodo establecido y presentan una forma sinusoidal. Además, se puede apreciar que las fases de las tensiones están desfasadas en un ángulo de 120 grados. Estos resultados confirman que la inducción se establece de manera correcta en las bobinas.

Para la obtención de las tensiones inducidas se calculan en Matlab como la derivada del flujo inducido, esto se obtiene a partir de la ley de Faraday:

$$E = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d\Psi}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = -\omega \cdot \frac{d\Psi}{d\theta} \approx -\omega \cdot \frac{\Delta\Psi}{\Delta\theta} = -\omega \cdot \frac{\Psi_{i+1} - \Psi_i}{\theta_{i+1} - \theta_i} \quad (66)$$

Es importante tener en cuenta que las tensiones inducidas no siguen una forma de senoide perfecta en la gráfica. Como resultado, la representación gráfica puede mostrar cierta discontinuidad. Sin embargo, es posible mejorar la precisión de la forma de la senoide al disminuir el tiempo de paso utilizado en la simulación. Reducir el tiempo de paso puede proporcionar resultados más precisos y una mejor aproximación de una forma senoide continua.

El valor eficaz de la tensión inducida para cada fase queda:

$$\begin{aligned} V_{A\ ef} &= 27,7442\ V \\ V_{B\ ef} &= 27,3712\ V \\ V_{C\ ef} &= 27,5551\ V \end{aligned}$$

La diferencia en los valores entre las fases de las tensiones inducidas se debe a la posición relativa de las bobinas en relación a las zonas de mayor y menor reluctancia, tal como se mencionó en el ensayo anterior. Esta variación se produce debido a las características geométricas y magnéticas del motor.

Al comparar estos valores con el valor eficaz teórico del motor, que es de 25,46 V, se observa que las prestaciones eléctricas del modelo son ligeramente superiores a las establecidas en el diseño del motor. La discrepancia entre los valores obtenidos en la simulación y los teóricos calculados en el diseño analítico se justifica principalmente por la consideración en el cálculo por histéresis en los núcleos ferromagnéticos mediante el Método de Elementos Finitos (MEF).

Tras el análisis de los resultados de la simulación, se puede confirmar que las bobinas del estator están bien definidas y cumplen con las especificaciones deseadas. La variación en las tensiones inducidas se puede atribuir a las consideraciones y aproximaciones realizadas durante el diseño y la simulación del motor.

7.3 Ensayo con carga

En la simulación del ensayo de carga nominal, se lleva a cabo una simulación dinámica para determinar el par que la máquina es capaz de proporcionar. Para ello, se realiza un análisis transitorio con la máquina girando a la velocidad angular nominal y se alimenta el devanado del estator con la corriente nominal.

Primero que todo cabe destacar que para el motor se llevara a cabo un control vectorial, pues es un tipo de control muy preciso, aunque requiere de un sistema electrónico avanzado para implementar las diversas transformaciones matemáticas requeridas.

Para ello se realiza la transformación $\alpha\beta$ o de Clarke, que tiene sirve para representar el sistema trifásico de corriente como un sistema de coordenadas cartesiano que genera el mismo campo magnético giratorio y facilita la posterior implementación de las estrategias de control vectorial.

Transformación $\alpha\beta$ o de Clarke en forma matricial

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (67)$$

Posteriormente este vector giratorio se cambia nuevamente de referencia para representarlo en un sistema de coordenadas ligado a la rotación de rotor, esto se denomina la transformación dq o de Park.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (68)$$

Donde:

$$\theta = \omega_{rotor} \cdot t \quad (69)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{Transformación } \alpha\beta \text{ o de Clarke}} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{transformación dq o de Park}} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (70)$$

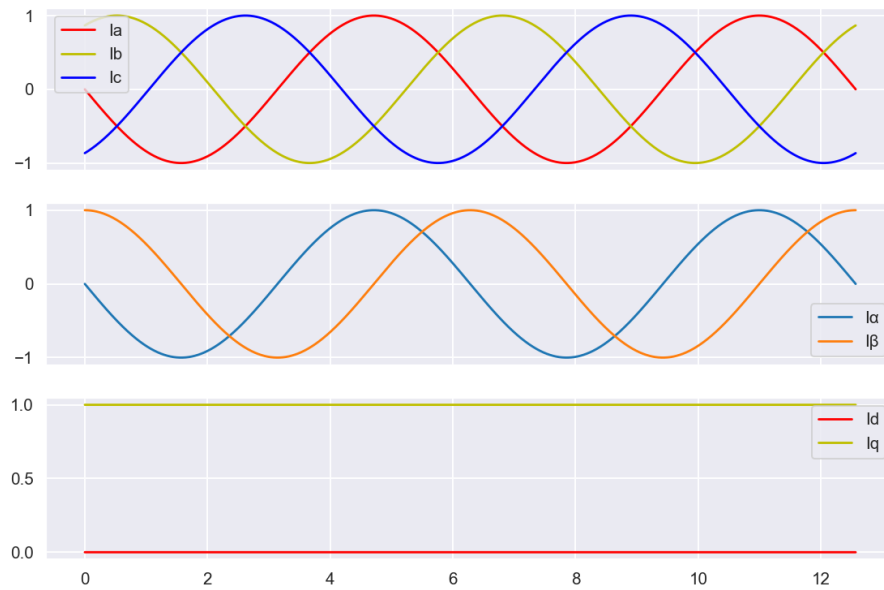


Figura 22. Formas de las corrientes tras cada transformación

El control se realizara a partir de I_d e I_q y aplicando las anteriores transformación obtener I_a , I_b y I_c aplicadas al devanado del motor. Es por ello por lo que lo primero que se realiza es barrido de los diferentes valores de β beta y obtener el Par máximo que se consigue para cada beta.

Se realiza la configuración de los parámetros de excitación de velocidad angular en las partes móviles y de corriente nominal en el estator. Para la corriente en los bobinados del estator, se define la siguiente configuración, donde la intensidad máxima es la intensidad de pico de 4,63 A. Cabe destacar que se aplicaran las transformaciones anteriores inversas para que a partir de I_d, I_q obtener I_a, I_b y I_c .

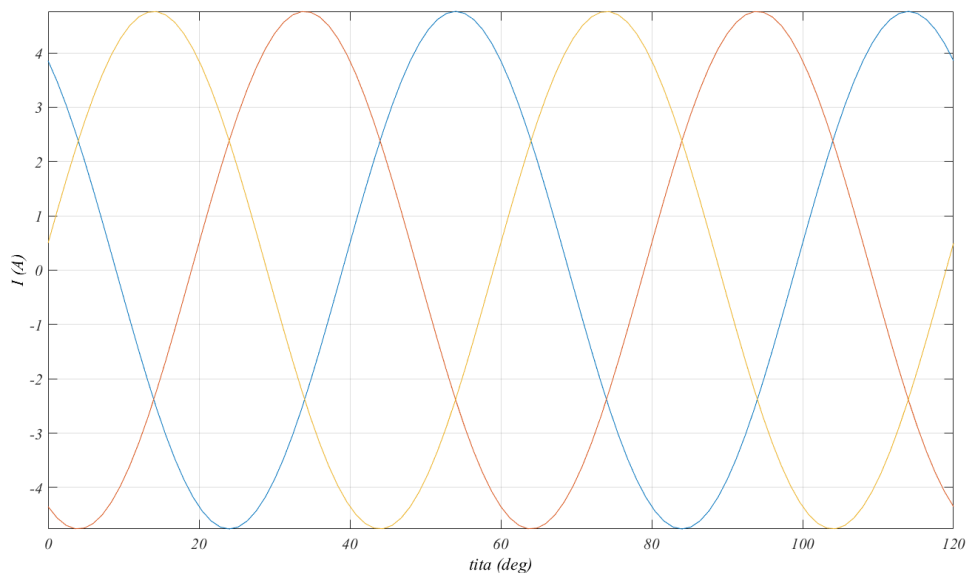


Figura 23. Corrientes I_a, I_b, I_c aplicadas al estor después de las transformaciones.

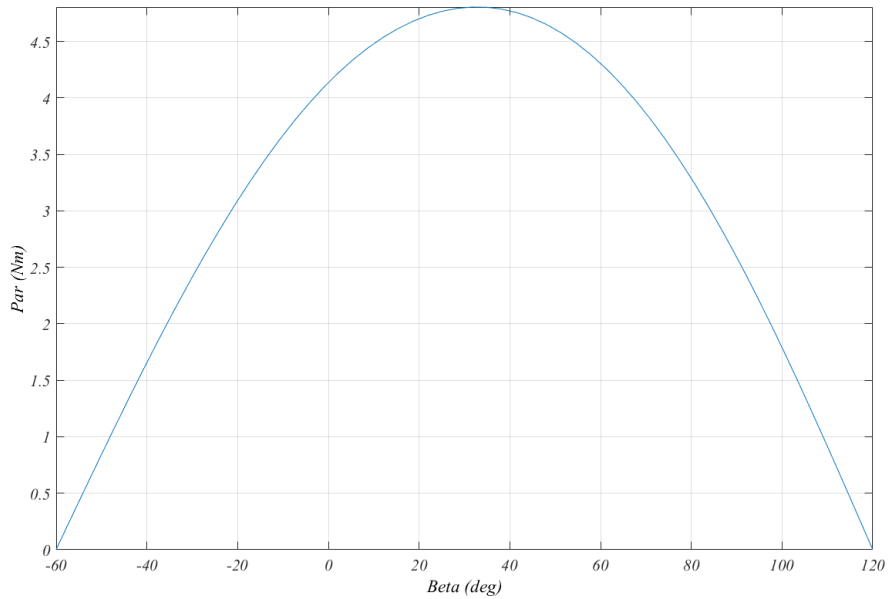


Figura 24. Torque máximo para diferentes valores de beta.

Se observa que tras simular el motor para diferentes valores de beta se obtiene el par máximo a 36 grados. También se observa que el rango de beta es de -60 grados a 120 grados, esto es debido a las configuraciones del FEMM y a la rotación inicial del modelo del motor en el proyecto de FEMM.

Al obtener la beta optima, a partir de ahora se pasa a trabajar con esa beta para obtener los mejores resultados.

Posteriormente con $\beta=36^\circ$ se realiza una simulación del torque del motor, esta se realiza para 120 grados del rotor pues no es necesario simularlo mas tiempo ya que se repetiría lo mismo.

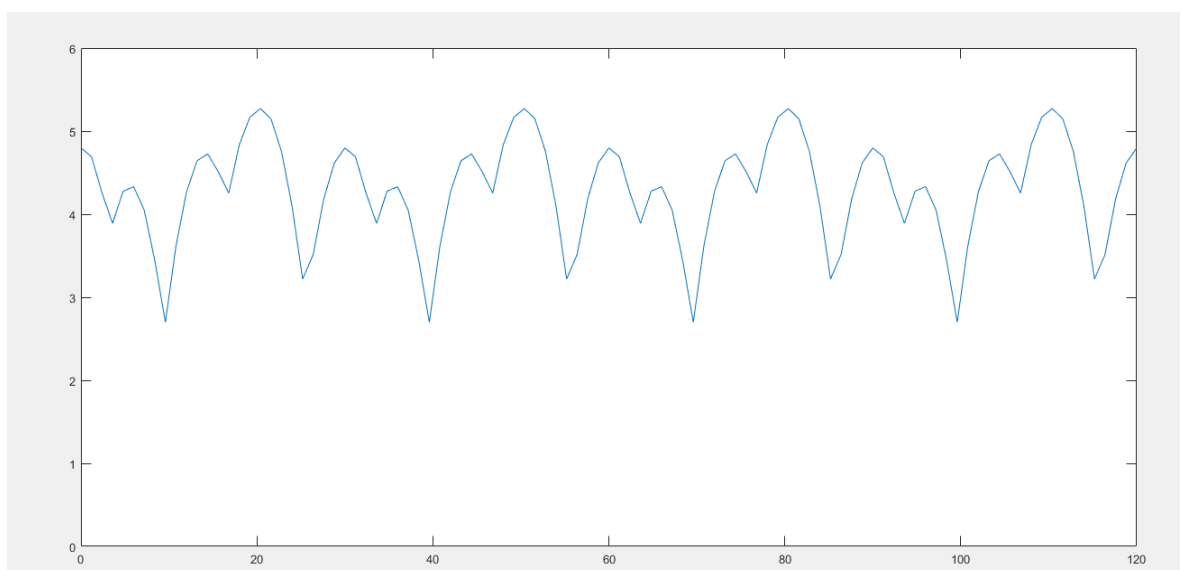


Figura 25. Par motor para $\beta = 36^\circ$.

Los datos obtenidos de la simulación son los siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Par máximo} &= 5,2724 \text{ Nm} \\ \text{Par mínimo} &= 2,69898 \text{ Nm} \\ \text{Par medio} &= 4,29537 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Tras analizar los resultados, se ha verificado que el valor teórico del par necesario para las prestaciones mecánicas deseadas se alcanza en la simulación en el punto máximo. El valor medio difiere un poco del par esperado, aunque no es una diferencia muy excesiva.

Además, se observa un inconveniente significativo relacionado con el rizado del par. El rizado del par se refiere a las fluctuaciones temporales que se presentan en relación con el valor medio del par y se expresa en forma de porcentaje. Es importante tener en cuenta estas fluctuaciones, ya que pueden provocar respuestas inestables y abruptas en el motor durante su funcionamiento. Por lo tanto, será necesario abordar la reducción del rizado del par en el diseño y optimización del motor en futuras etapas del proyecto.

$$\text{Rizado del par (\%)} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}} = \frac{5,2724 - 2,69898}{5,2724} = 0.488 = 48\% \quad (71)$$

Se ha observado que el valor del rizado de par obtenido en la simulación es demasiado alto, lo cual plantea inconvenientes en la aplicación del motor en un vehículo. Este efecto se atribuye a la naturaleza del rotor de imanes permanentes y es necesario tomar medidas para mitigarlo.

En resumen, los resultados de la simulación del ensayo de carga nominal revelan que el par generado es semejante al valor esperado según el diseño y presenta un rizado indeseable. Estos hallazgos indican la necesidad de realizar ajustes y mejoras en el diseño del motor para obtener un rendimiento óptimo y estable en futuras etapas del proyecto.

8 Resultados finales

Después de completar las simulaciones del modelo y obtener resultados consistentes en términos de sus prestaciones magnéticas y eléctricas, es el momento de calcular los resultados relacionados con las prestaciones mecánicas del motor diseñado.

En este apartado, el objetivo es evaluar su rendimiento para diferentes cargas y también se incluye una sección donde se presentan las conclusiones finales derivadas del diseño del modelo.

Al analizar las prestaciones mecánicas del motor, se podrá determinar su capacidad para cumplir con los requisitos de funcionamiento específicos y evaluar su rendimiento en términos de eficiencia y capacidad de carga. Esto permitirá obtener información crucial para la optimización del diseño y la toma de decisiones en futuras etapas del proyecto.

8.1 Cálculo de rendimiento

Con el fin de evaluar el desempeño de la máquina en relación con la carga, se llevan a cabo una serie de simulaciones de ensayos de carga. Específicamente, se realiza un análisis para determinar el rendimiento en tres variaciones de carga: 75%, 50% y 25% del valor nominal.

De acuerdo con las fórmulas siguientes, se requiere calcular las pérdidas de potencia del modelo, así como el par mecánico correspondiente a cada carga, para poder calcular el rendimiento.

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{elec}} \quad (72)$$

$$P_{mec} = T_{mec} \cdot \omega_{mec} \quad (73)$$

$$P_{elec} = P_{mec} + P_{perdidas} \quad (74)$$

Para determinar el par mecánico que proporciona el motor para diferentes cargas, se asume un ángulo beta de 36 grados, encontrado anteriormente. Con esta configuración, se obtienen los valores máximos de par en cada caso, como se detalló anteriormente. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

I _{ef}	T max (N m)	T min (N m)	T medio (N m)	Rizado (%)
I _n	5,27	2,69899	4,3003	48,7857685
75%	3,89766	2,05359	3,2257	47,31223349
50 %	2,55746	1,45386	2,1536	43,15219006
25 %	1,25622	0,714959	1,0776	43,08648167

Tabla 9. Par para diferentes corrientes

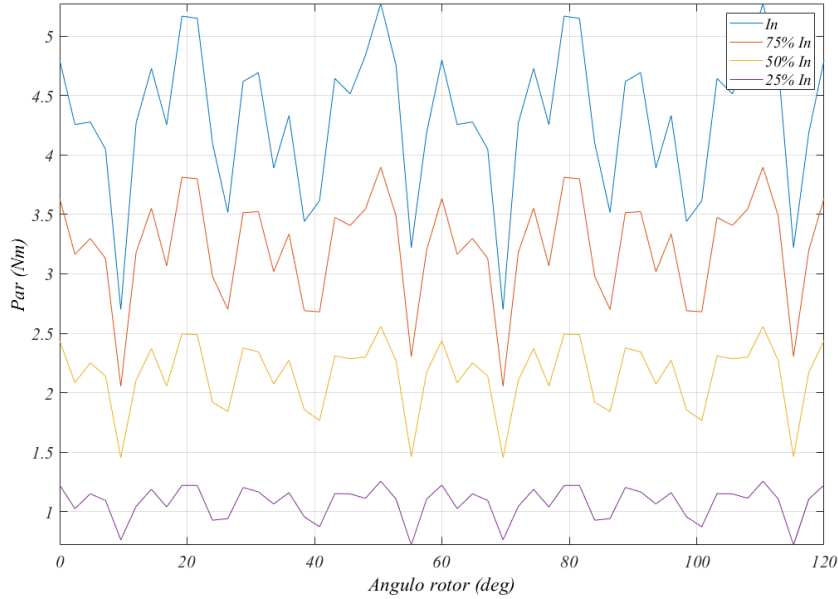


Figura 26. Par motor para diferentes corrientes

Las principales fuentes de pérdidas en una máquina síncrona de imanes permanentes son las siguientes.

$$P_{perdidas} = P_{perd,imanes} + P_{perd,Fe} + P_{perd,Cu} + P_{perd,mec} \quad (75)$$

Para la estimación del rendimiento y cálculo de las pérdidas, las pérdidas en los imanes y las pérdidas mecánicas por fricción y ventilación se desprecian.

Para calcular las pérdidas en los devanados del motor, es necesario conocer la resistencia de los devanados. La resistencia en el devanado se determina a partir de la resistividad del material conductor y las dimensiones geométricas de los conductores utilizados en el devanado.

$$P_{perd, Cu} = 3 \cdot R_{fase} \cdot I^2 \quad (76)$$

Para determinar la superficie que ocupa el cobre, se tiene en cuenta el área de ocupación de una bobina, mientras que para calcular la longitud del cobre se toma en cuenta la longitud de una espira.

La longitud del cobre tendrá en cuenta dos veces la longitud total de la máquina, para representar el lado de ida y el de vuelta. Además, se considerará 2 veces el ancho de las ranuras de ida y vuelta.

$$R_{DC(25^\circ C)} = \rho_{Cu} \cdot \frac{L_{Cu}}{S_{Cu}} \cdot 6 \frac{bobinas}{fase} = 8,7858 \text{ m}\Omega \quad (77)$$

$$\rho_{Cu}(25^\circ C) = 0,0168 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{m} \quad (78)$$

$$S_{Cu} = A_r \cdot F_r = 84,24 \cdot 0,5 = 42,12 \text{ mm}^2 \quad (79)$$

$$L_{Cu} = (2 \cdot L_{maquina} + 2 \cdot w_r) \cdot 52 = 3,6712 \text{ m} \quad (80)$$

Se procede a corregir el valor calculado de la resistencia teniendo en cuenta únicamente el ajuste a la temperatura de funcionamiento, asumiendo una temperatura de 75°C. En esta corrección no se considera el efecto pelicular debido a la frecuencia.

$$R_{DC(75^\circ C)} = R_{DC(25^\circ C)} \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0)) = R_{DC(25^\circ C)} \cdot (1 + 0,0068 \cdot (75 - 25)) \quad (81)$$

$$R_{DC(75^\circ C)} = 12,07 \text{ m}\Omega \quad (82)$$

Una vez calculada la resistencia del devanado se procede a calcular las pérdidas totales de la máquina para cada carga.

Intensidad	I ef (A)	P mec (W)	P perd Cu (mW)	P eléctrica (W)	Rendimiento (%)
In	3,27	225,163181	387,189909	249,721398	90,02616957
75%	2,4625	168,897257	219,5740453	188,0547225	89,70808026
50 %	1,635	112,762232	96,79747725	124,860699	90,24047015
25 %	0,8175	56,4230041	24,19936931	62,4303495	90,3425052

Tabla 10. Rendimientos para diferentes corrientes

8.2 Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo ha sido diseñar un motor síncrono de imanes permanentes que cumpla con las prestaciones necesarias para el correcto funcionamiento de un patinete eléctrico, considerando parámetros y requisitos basados en los modelos disponibles en el mercado.

A través de un dimensionamiento analítico inicial, se han determinado los parámetros constructivos del motor que se consideran adecuados para su integración en la estructura física del patinete seleccionado. Utilizando estas dimensiones calculadas, se ha creado un modelo de diseño en un software especializado. Tras realizar simulaciones mediante el método de elementos finitos para evaluar las prestaciones magnéticas, eléctricas y mecánicas del modelo, se puede concluir que el motor diseñado ofrece resultados válidos y razonables.

Aunque las prestaciones del motor en términos de tensión en el ensayo de vacío y par máximo en el ensayo de carga no coinciden exactamente con los valores esperados inicialmente para su funcionamiento a máxima velocidad, se considera que su aplicación es válida debido a que los valores son bastante cercanos y cumplen sin problemas con los requisitos necesarios para un funcionamiento normal. Esto se debe a que los patinetes eléctricos comerciales suelen estar sobredimensionados.

Sin embargo, en cuanto a la calidad del par del modelo diseñado, no se ha alcanzado un valor deseable para su implementación en un patinete eléctrico. El rizado del par, que se sitúa alrededor del 40%, puede ocasionar respuestas inestables y bruscas del modelo ante diferentes cargas durante el funcionamiento del vehículo. Además, esta inestabilidad frente a condiciones de carga cambiantes puede provocar variaciones en los esfuerzos mecánicos, lo cual podría deteriorar los componentes y ocasionar fallas inesperadas.

Para mejorar el dimensionamiento y optimizar el rendimiento del motor eléctrico en el patinete, será necesario reducir el rizado del par. Esto se puede lograr mediante modificaciones geométricas en el diseño inicial, siempre y cuando se mantengan las prestaciones del motor.

Es importante destacar que el modelo diseñado alcanza rendimientos teóricos muy altos tanto a plena carga como a cargas parciales, lo cual lo hace perfectamente adecuado para su aplicación en un patinete eléctrico.

Con esto, se concluye el diseño del motor síncrono de imanes permanentes, el cual se considera satisfactorio y adecuado para su uso como motor en el patinete eléctrico convencional seleccionado.

9 Referencias

- [1] J. R. Á. M. A. y. C. V. Francisco Blázquez, Máquinas Síncronas y Máquinas de Corriente Continua, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.
- [2] R. Krishnan, Electric Motor Drives, 2001.
- [3] R. Krishnan, Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives, Blacksburg, Virginia, U.S.A: Taylor and Francis Group, LLC, 2010.
- [4] W. Q. C. a. Z. Q. Zhu, «Average Torque Separation in Permanent Magnet Synchronous Machines Using Frozen Permeability,» Sheffield, 2013.
- [5] J. F. Mora, Máquinas eléctricas, Ibergarceta Publicaciones S.L, 2016.
- [6] «Finite elements method magnetics (femm),» [En línea]. Available: <http://www.femm.info/>.
- [7] P. R. W. a. D. H. Mellor, «A computationally efficient iron loss model for brushless AC machines that caters for rated flux and field weakened operation,» 2020. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5075251>. [Último acceso: 5 2023].
- [8] klazera, «information on m365 pro 2 motor and advice on rewinding needed(motor burnt, rewind, very low torque),» 2021. [En línea]. Available: https://www.reddit.com/r/ElectricScooters/comments/petgon/any_information_on_m365_pro_2_motor_and_advice_on/. [Último acceso: 2023].
- [9] The MathWorks, Inc., «FEM-Parameterized PMSM,» 2019. [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/sps/ref/femparameterizedpmsm.html>.
- [10] S. Strobl, «Space Vector Modulation (SVM),» 16 8 2022. [En línea]. Available: <https://imperix.com/doc/implementation/space-vector-modulation>.
- [11] «Frozen Permeability Benchmark,» [En línea]. Available: <https://www.femm.info/wiki/FrozenBenchmark>.
- [12] D. Gerling, Comparison of Different FE Calculation Methods for the Electromagnetic Torque of PM Machines, Wiesbaden, Germany: NAFEMS Seminar, 2015.
- [13] Universidad de Oviedo, «PEP - Power Electronic Pills,» [En línea]. Available: <http://mrico.dieecs.com/teaching>.
- [14] R. Alcocer, 2001. [En línea]. Available: <https://www.oocities.org/valcoey/rotacion2d.html>.
- [15] D. D. Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design, Lebanon, Ohio: Magna Physics Publishing, 2003.

10 Anexos

10.1 Anexo I: Estudio de patinetes del mercado

A continuación, se enumera y describe las características de los 6 patinetes eléctricos más vendidos para tener una referencia de los patinetes eléctricos del mercado.

1. kick scooter eléctrico NIU KQi2 Pro



Fuente amazon.es

Tabla de características	
Dimensiones	99 x 18.5 x 40 centímetros
Peso del producto	18,2 kg
batería	36 V/7,8 Ah (365 Wh)
Velocidad máxima	25 km/h
Autonomía	40 km
Diámetro rueda	10 pulgadas
Máxima Carga	100 kg
Pendiente máxima	15%
Potencia Motor	300 W
Precio	499,00 €

2. Smartgyro Xtreme Speedway v3.0



Fuente amazon.es

Tabla de características	
Dimensiones	125 x 118 x 22 centímetros
Peso del producto	22 kg
batería	Litio 48V / 13.000 mAh
Velocidad máxima	25 km/h
Autonomía	40 a 45 km
Diámetro rueda	10 pulgadas
Potencia Nominal	500 W
Potencia máxima	800 W
Precio	640,00 €

3. El patinete eléctrico para adultos NIU KQi3 Pro



Tabla de características	
Dimensiones	50.8 x 22.9 x 106.7 centímetros
Peso del producto	20,3 kg
batería	Litio 46.8V 10,4 Ah (486,7 Wh)
Velocidad máxima	25 km/h
Autonomía	50 km
Diámetro rueda	9.5 pulgadas (24cm)
Máxima Carga	100 kg
Pendiente máxima	20%
Potencia Nominal Motor	350 W
Precio	699,00 €

4. SMARTGYRO Ziro Silver



Tabla de características	
Dimensiones	113 x 56 x 115 centímetros
Peso del producto	15 kg
batería	Litio 36V 8,8 Ah (486,7 Wh)
Velocidad máxima	25 km/h
Autonomía	30 km
Diámetro rueda	10 pulgadas
Máxima Carga	120 kg
Pendiente máxima	15%
Potencia Nominal Motor	350 W 36V
Precio	359,00 €

5. Xiaomi Mi Electric Scooter PRO 2



Tabla de características	
Dimensiones	112 x 43 x 113 centímetros
Peso del producto	14,2 Kg
batería	Litio 36V 8,8 Ah (446 Wh)
Velocidad máxima	25 km/h
Autonomía	45 km
Diámetro rueda	8,5 pulgadas
Máxima Carga	100 kg
Pendiente máxima	20%
Potencia máxima	600 W
Precio	499,00 €

6. Cecotec Patinete eléctrico Bongo Serie A



Tabla de características	
Dimensiones	113 x 56 x 115 centímetros
Peso del producto	15 kg
batería	Litio 36V 8,8 Ah (486,7 Wh)
Velocidad máxima	25 km/h
Autonomía	30 km
Diámetro rueda	10 pulgadas
Máxima Carga	120 kg
Pendiente máxima	15%
Potencia Nominal Motor	350 W 36V
Precio	359,00 €

Analizando los patinetes más vendidos del mercado podemos tener unos valores medios que pueden servir de referencia para el diseño del trabajo.

Máxima Carga media	108 kg
Peso medio patinete	17,45 kg
Pendiente máxima media	17%
Capacidad media de la batería	454,22 Wh
Diámetro rueda motriz	10 pulgadas

Para el diseño y requerimientos se seguirá la norma UNE-EN 14619 de “Equipos de deportes sobre ruedas, patinetes, requisitos de seguridad y métodos de ensayo” que pese a no ser una norma de obligado cumplimiento es una guía para el correcto diseño de patinetes.

La velocidad está regulada, en España y Europa la velocidad de los patinetes eléctricos no debe exceder los 25 km/h. Por ello para el diseño se tomará que debe alcanzar como máximo los 25 km/h.

Para determinar las características del motor a diseñar se ha tenido en cuenta los valores encontrados que se han comentado, los valores más normalizados y las tendencias del mercado.

El diámetro de la rueda motriz que se utilizará será de 10 pulgadas porque es el diámetro más utilizado en el mercado y porque es un diámetro, que al ser más grande que otros utilizados como puede ser las ruedas de 8 o 9 pulgadas, deja más espacio para el dimensionamiento del motor.

A continuación, se muestra una tabla con los valores que el patinete objetivo, donde ira el motor, debe cumplir:

Máxima Carga	100 kg
Peso patinete	20 kg
Pendiente máxima	15 %
Diámetro rueda motriz	10 pulgadas
Velocidad máxima	25 km/h
Tensión	36 V

10.2 Anexo II: Codigos MATLAB

10.2.1 Codigo Barrido Beta

```

clear;clc;

openfemm(1);

IA=3.37*sqrt(2);
beta0=-60;
iteracions = 50;
iteracionesBeta = 50;
anguloFinal = 120;
tita0=0; %rotor angle
p=6;
dtita = (anguloFinal/60)*(360/p)/iteracions;
dbeta=180/iteracionesBeta;

Idq=[-IA*sin(beta*2*pi/360);IA*cos(beta*2*pi/360)];
grup_rotor = 2;
grup_estator = 1;
%rang=(tita0:dtita:iteracions);
i=1;j=1;
tta=[]; %angle associated with each data item
fd=[];
fq=[];

max_torque=[];

for indice_beta=0:iteracionesBeta

    opendocument('proyecto centrado0_V3_distribuido_50vueltas.FEM') %%Abre el
    archivo .FEM

    beta = beta0+dbeta*indice_beta;
    bta(j)=beta;
    Idq=[-IA*sin(beta*2*pi/360);IA*cos(beta*2*pi/360)];
    max_torque(j) = 0;
    Id(j)=Idq(1);
    Iq(j)=Idq(2);

    i=1;
    for index_fi=0:iteracions
        tita = dtita*index_fi;
        tta(j,i)=tita;

        if index_fi ~= 0
            mi_selectgroup(grup_rotor);
            mi_moverotate(0,0,dtita);
        end
        %mi_moverotate(2874.1572,1603.1032,dtita);
        mi_saveas('temp1.fem')
        %DQ to ABC

        K=transpose([sin(p*tita*2*pi/360) sin((p*tita+120)*2*pi/360)
sin((p*tita-120)*2*pi/360); cos(p*tita*2*pi/360) cos((p*tita+120)*2*pi/360)
cos((p*tita-120)*2*pi/360)]);

```

```

%ABC to DQ

Kt=(2/3)*transpose(K);

%Full solution

Iabc=K*Idq;

IABC(i,1)=Iabc(1);IABC(i,2)=Iabc(2);IABC(i,3)=Iabc(3);

mi_modifycircprop('A', 1, Iabc(1));
mi_modifycircprop('B', 1, Iabc(2));
mi_modifycircprop('C', 1, Iabc(3));

mi_analyze(); %%Calcula
mi_loadsolution(); %%Carga resultados

mo_getcircuitproperties('A');dq(1,1)=ans(3);
mo_getcircuitproperties('B');dq(2,1)=ans(3);
mo_getcircuitproperties('C');dq(3,1)=ans(3);

fwhole1=Kt*dq;

fwhole(1,i)=fwhole1(1,1);
fwhole(2,i)=fwhole1(2,1);

SeleccionBloques(p,tita);

tto(j,i) = abs(mo_blockintegral(22));

mo_groupselectblock(1);%

W(j,i)=mo_blockintegral(2);

Wc(j,i)=mo_blockintegral(17);

mo_clearblock() %%Limpia la selección de bloques

if tto(j,i) > max_torque(j)
    max_torque(j) = tto(j,i);
end
fd(j,i)=fwhole(1,i);
fq(j,i)=fwhole(2,i);

    i=i+1;
end

mo_clearblock();

```

```

    mo_close();
    mi_close();
%   M(j) = max(tto(j));
    j=j+1;
end

save all_var

save tta tta
save tto tto
save bta bta
%save M M
save max_torque max_torque
save fd fd
save fq fq
save fdabs fdabs
save fqabs fqabs
save tdq0 tdq0
save tdq01 tdq01
save tdq02 tdq02
save tdq03 tdq03
save max_torque_dq01 max_torque_dq01
save mean_torque_dq01 mean_torque_dq01
save W W
save fwhole fwhole
save Wc Wc
save Id Id
save Iq Iq
%figure(1);
%plot(tta,IABC)

figure(1);
plot(tta,tto);

%figure(3);
%plot(bta,M)

figure(2);
plot(bta,max_torque);

grid on

axis tight

xlabel('Beta (deg)', 'FontSize',16, 'Color',[0 0
0], 'FontName', 'Times', 'FontAngle', 'italic')

ylabel('int_est(A)', 'FontSize',16, 'Color',[0 0 0], 'FontName',
'Times', 'FontAngle', 'italic')

ylabel('Par (Nm)', 'FontSize',16, 'Color',[0 0 0], 'FontName',
'Times', 'FontAngle', 'italic')

set(gcf, 'Color', [1,1,1])

set(gca, 'FontName', 'times', 'FontAngle', 'italic', 'FontSize', 16)

figure(3);
plot(bta,max_torque_dq01);

```

```

grid on

axis tight

xlabel('Beta (deg)', 'FontSize',16, 'Color',[0 0
0], 'FontName', 'Times', 'FontAngle', 'italic')

ylabel('int_est(A)', 'FontSize',16, 'Color',[0 0 0], 'FontName',
'Times', 'FontAngle', 'italic')

ylabel('Par (Nm)', 'FontSize',16, 'Color',[0 0 0], 'FontName',
'Times', 'FontAngle', 'italic')

set(gcf, 'Color', [1,1,1])

set(gca, 'FontName', 'times', 'FontAngle', 'italic', 'FontSize', 16)

function SeleccionBloques(p,tita)
    posicion_iman1=[-52.7;-5];
    posicion_iman2=[-52.7;5];
    posicion_iman3=[0;0];
    posicion_iman4=[0;0];
    angulo = 360/(2*p);
    if tita ~= 0

[posicion_iman1(1),posicion_iman1(2)]=rotacion(posicion_iman1(1),posicion_iman1
(2),tita);

[posicion_iman2(1),posicion_iman2(2)]=rotacion(posicion_iman2(1),posicion_iman2
(2),tita);
        end
        mo_selectblock(posicion_iman1(1),posicion_iman1(2));
        mo_selectblock(posicion_iman2(1),posicion_iman2(2));

        for i=1:(2*p-1)

[posicion_iman3(1),posicion_iman3(2)]=rotacion(posicion_iman1(1),posicion_iman1
(2),angulo*i);

[posicion_iman4(1),posicion_iman4(2)]=rotacion(posicion_iman2(1),posicion_iman2
(2),angulo*i);
            mo_selectblock(posicion_iman3(1),posicion_iman3(2));
            mo_selectblock(posicion_iman4(1),posicion_iman4(2));
            end
            mo_selectblock(56,0);%seleccionar rotor externo
        end
function [x2,y2]=rotacion(x,y,angulo)
    angulo = (pi*angulo)/180.0;
    x2 = x*cos(angulo) - y*sin(angulo);
    y2 = x*sin(angulo) + y*cos(angulo);
end

```

10.2.2 Código Simulación en vacío

```

clear;clc;openfemm;
opendocument('proyecto centrado0_V3.FEM');
mi_saveas('temp.fem');

N=530.18;
w=2*pi*N/60;
p = 6;
iteracions = 400;
anguloFinal = 120;
grup_rotor = 2;
tfinal = 80*10^(-3);%80ms
dt = tfinal/iteracions;
dtt = (N/60)*360*dt;

for i=0:iteracions
    tiempo(i+1) = dt*i;
    tta = dtt*i;

    mi_analyse(1); mi_loadsolution();

    fa=mo_getcircuitproperties('A');
    fb=mo_getcircuitproperties('B');
    fc=mo_getcircuitproperties('C');
    flux(i+1,1)=tta;
    flux(i+1,2)=fa(3);
    flux(i+1,3)=fb(3);
    flux(i+1,4)=fc(3);
    mo_close();

    mi_selectgroup(grup_rotor)
    mi_moverotate (0,0,dtt)
    mi_saveas ('temp.fem')
end

fluxA=flux(:,2);
fluxB=flux(:,3);
fluxC=flux(:,4);
tita=flux(:,1);

EA=w*diff(fluxA)./diff(tita);
EB=w*diff(fluxB)./diff(tita);
EC=w*diff(fluxC)./diff(tita);

figure(1);
plot(tita,fluxA,tita,fluxB,tita,fluxC);
xlabel('Posició Rotor (º ele)')
ylabel('flux (Vs)')

figure(2);
tita2=tita(1:iteracions);
plot(tita2,EA,tita2,EB,tita2,EC);
xlabel('Posició Rotor (º ele)')
ylabel('FEM (V)')

```

```

figure(5);
    plot(tiempo,fluxA,tiempo,fluxB,tiempo,fluxC);
    xlabel('Tiempo (s)')
    ylabel('flux (Vs)')

save all_var

save tiempo tiempo
save tiempo2 tiempo2
save fluxA fluxA
save fluxB fluxB
save fluxC fluxC
save tita tita
save tita2 tita2
save EA_0.mat
save EB_0.mat
save EC_0.mat
save tita2_0.mat
save fluxA_0.mat
save fluxB_0.mat
save fluxC_0.mat
save tita_0.mat

X=fft(EA); %transformada discreta de fourier
X1=X(2:max(size(X)));
Bn=2*imag(X1)/max(size(EA)); %Coeficients senars de la serie
Arm=25; % Nombre de harmonics a visualitzar
h=linspace(1,Arm,13);
for j =1:max(size(h))
    H(j)=100*Bn(h(j))/Bn(1);
end
figure(3)
    stem(h,abs(H),':r', 'fill','LineWidth',2);
    grid on
    xlim([1,h(end)]);
    xticks(h)
    xticklabels(h)
    xlabel('\bfOrden Harmonico');
    ylabel('\bfAmplitud (%)')
    title('\bfEspectro de Frecuencia')

```

10.2.3 Código graficar par para diferentes betas

```

clear;clc;

open all_var.mat

figure(1);
tdq01_00 = tdq01(25,:);
tdq01_10 = tdq01(29,:);
tdq01_20 = tdq01(32,:);
tdq01_30 = tdq01(35,:);
tdq01_39 = tdq01(39,:);
tta_00 = tta(1,:);
plot(tta_00,tdq01_00,tta_00,tdq01_10,tta_00,tdq01_20,tta_00,tdq01_30,tta_00,tdq01_39);

grid on

axis tight

xlabel('Angulo rotor (deg)','FontSize',16, 'Color',[0 0 0], 'FontName','Times', 'FontAngle','italic')

ylabel('int_est(A)','FontSize',16, 'Color',[0 0 0], 'FontName','Times', 'FontAngle','italic')

ylabel('Par (Nm)','FontSize',16, 'Color',[0 0 0], 'FontName','Times', 'FontAngle','italic')

set(gcf, 'Color',[1,1,1])

set(gca, 'FontName','times', 'FontAngle','italic', 'FontSize',16)

legend('-3.6°', '10.8°', '21.6°', '32.4°', '46.8°')

figure(3);
plot(bta,max_torque_dq01);

grid on

axis tight

xlabel('Beta (deg)','FontSize',16, 'Color',[0 0 0], 'FontName','Times', 'FontAngle','italic')

ylabel('int_est(A)','FontSize',16, 'Color',[0 0 0], 'FontName','Times', 'FontAngle','italic')

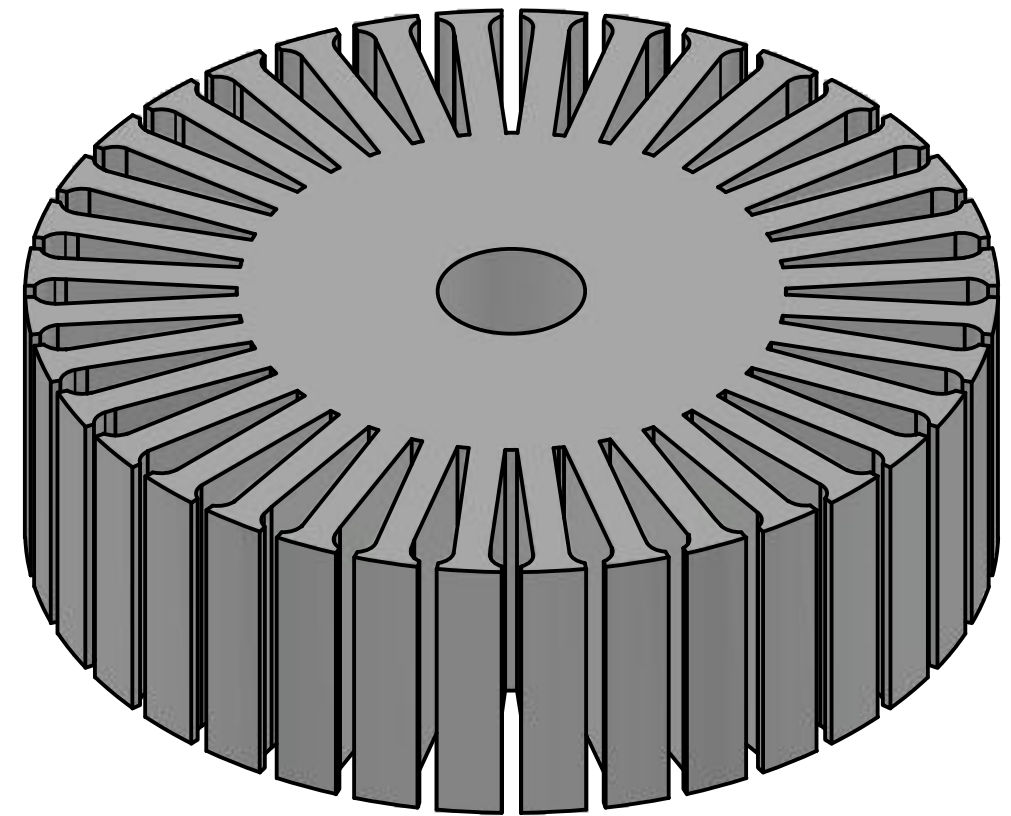
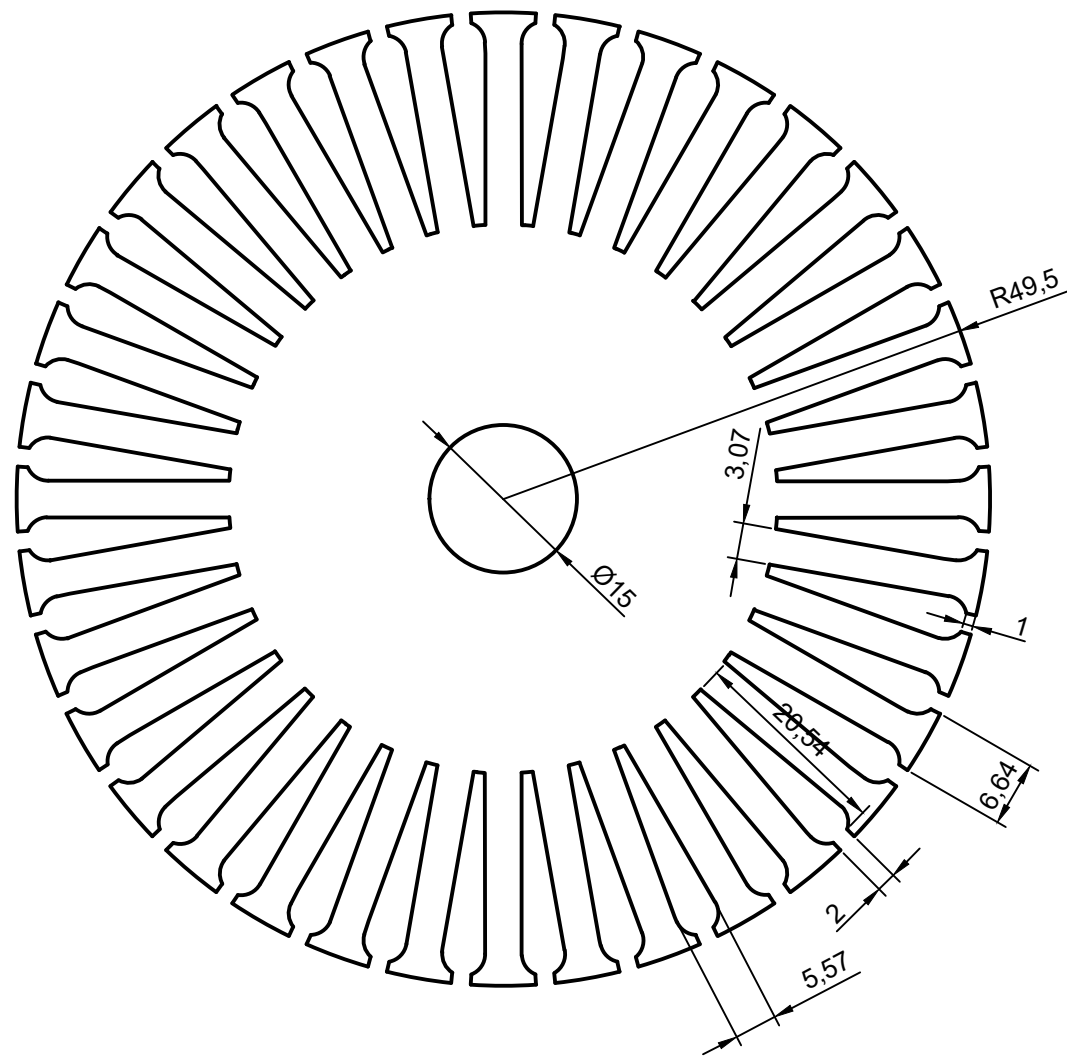
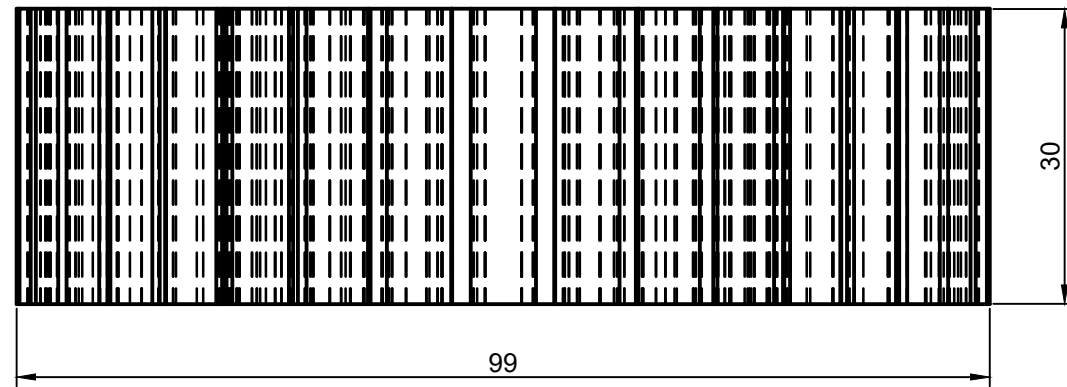
ylabel('Par (Nm)','FontSize',16, 'Color',[0 0 0], 'FontName','Times', 'FontAngle','italic')

set(gcf, 'Color',[1,1,1])

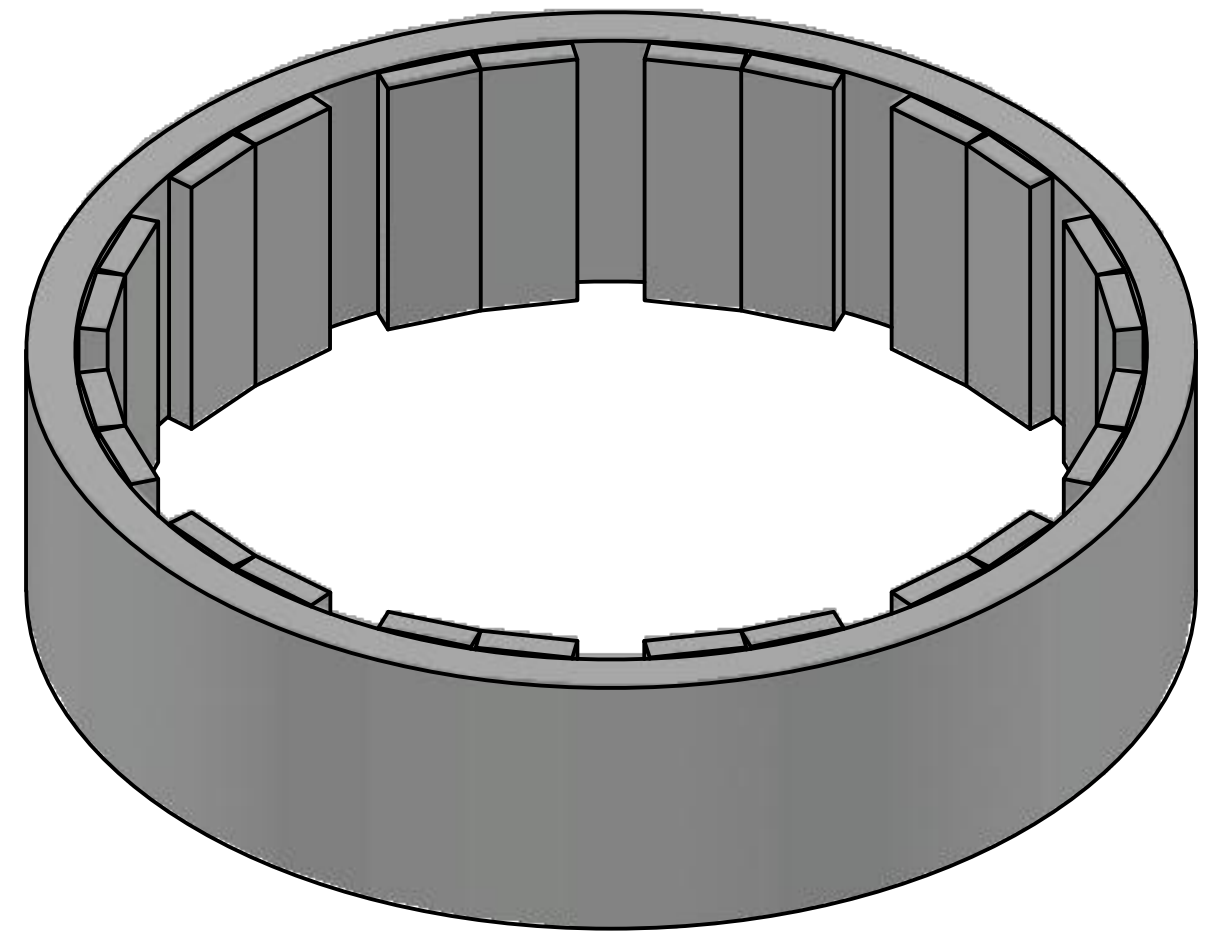
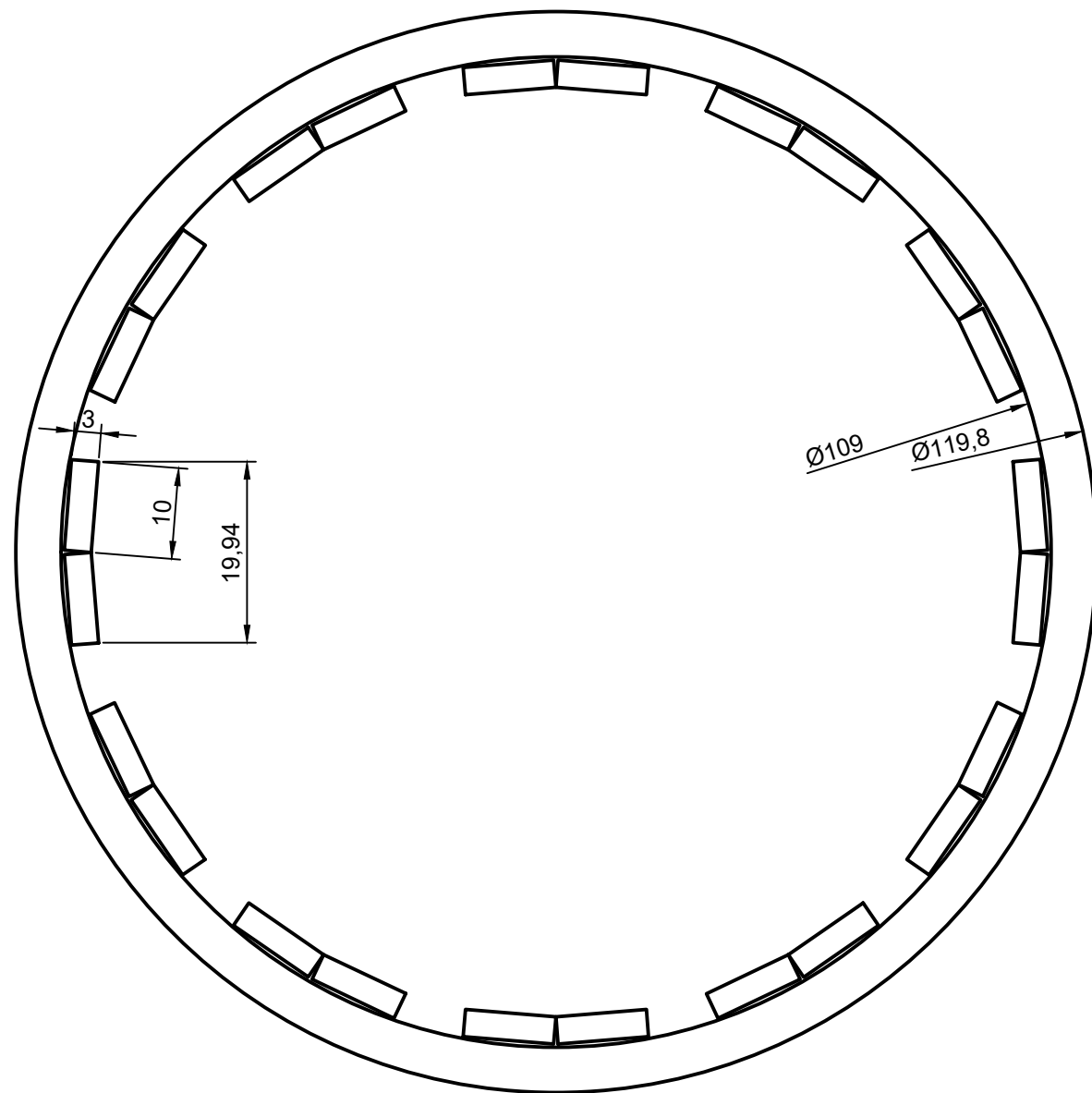
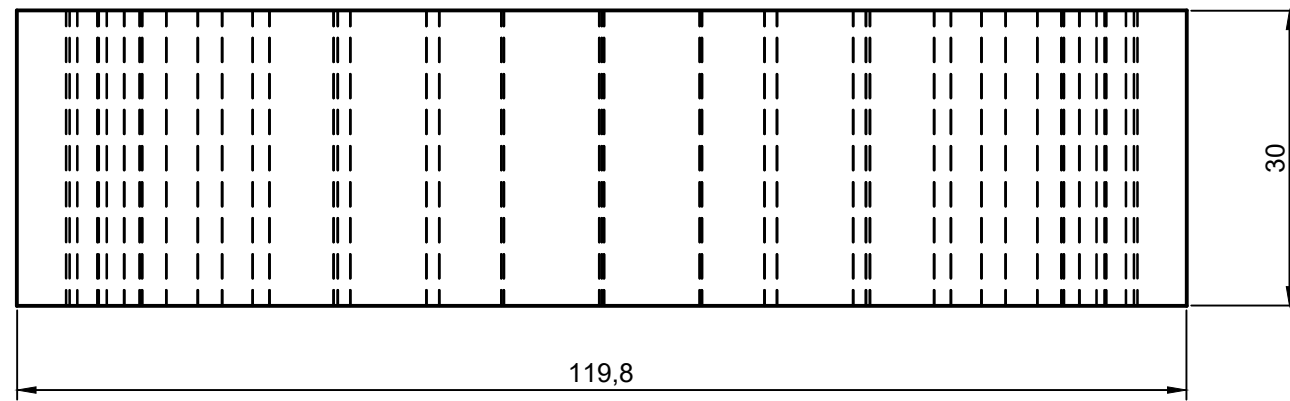
set(gca, 'FontName','times', 'FontAngle','italic', 'FontSize',16)

```

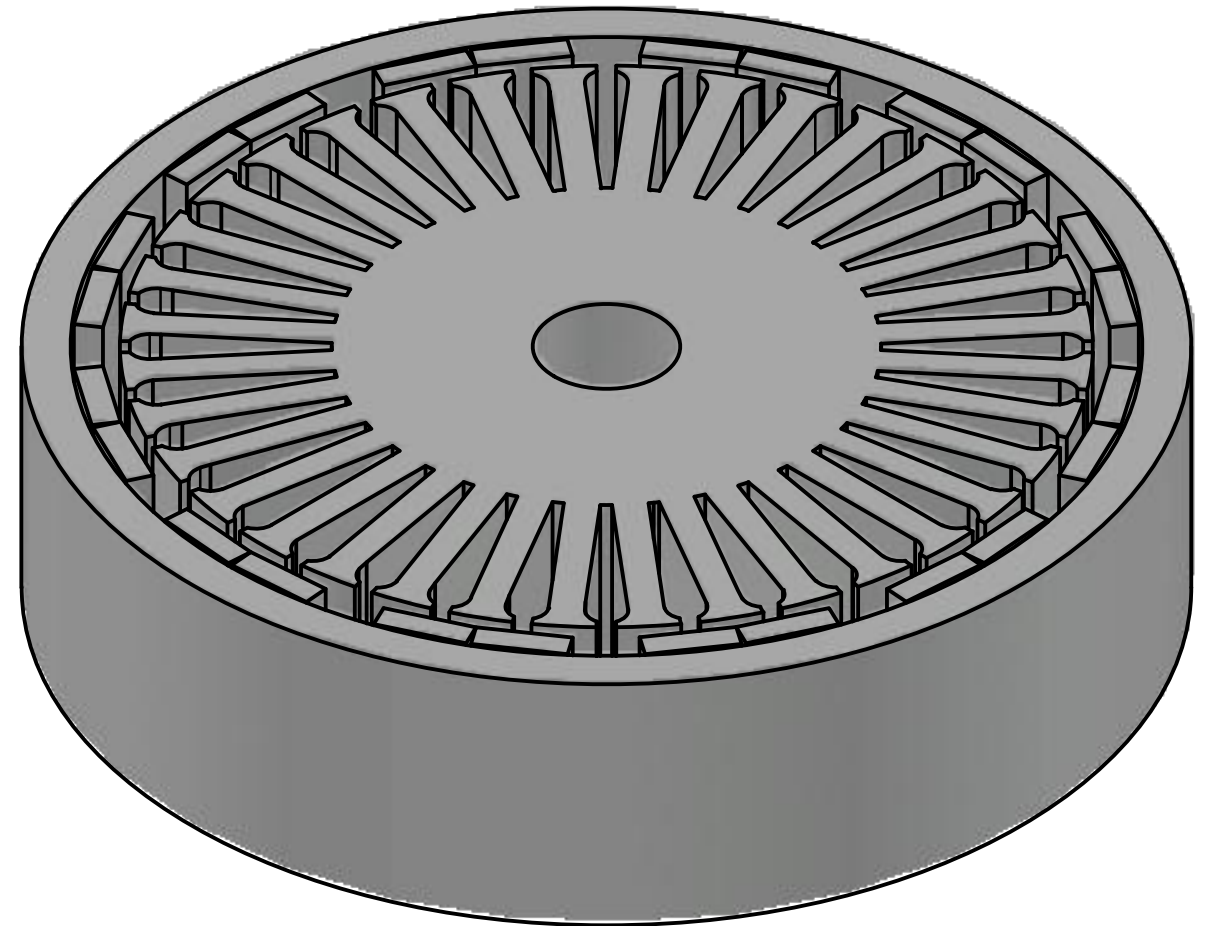
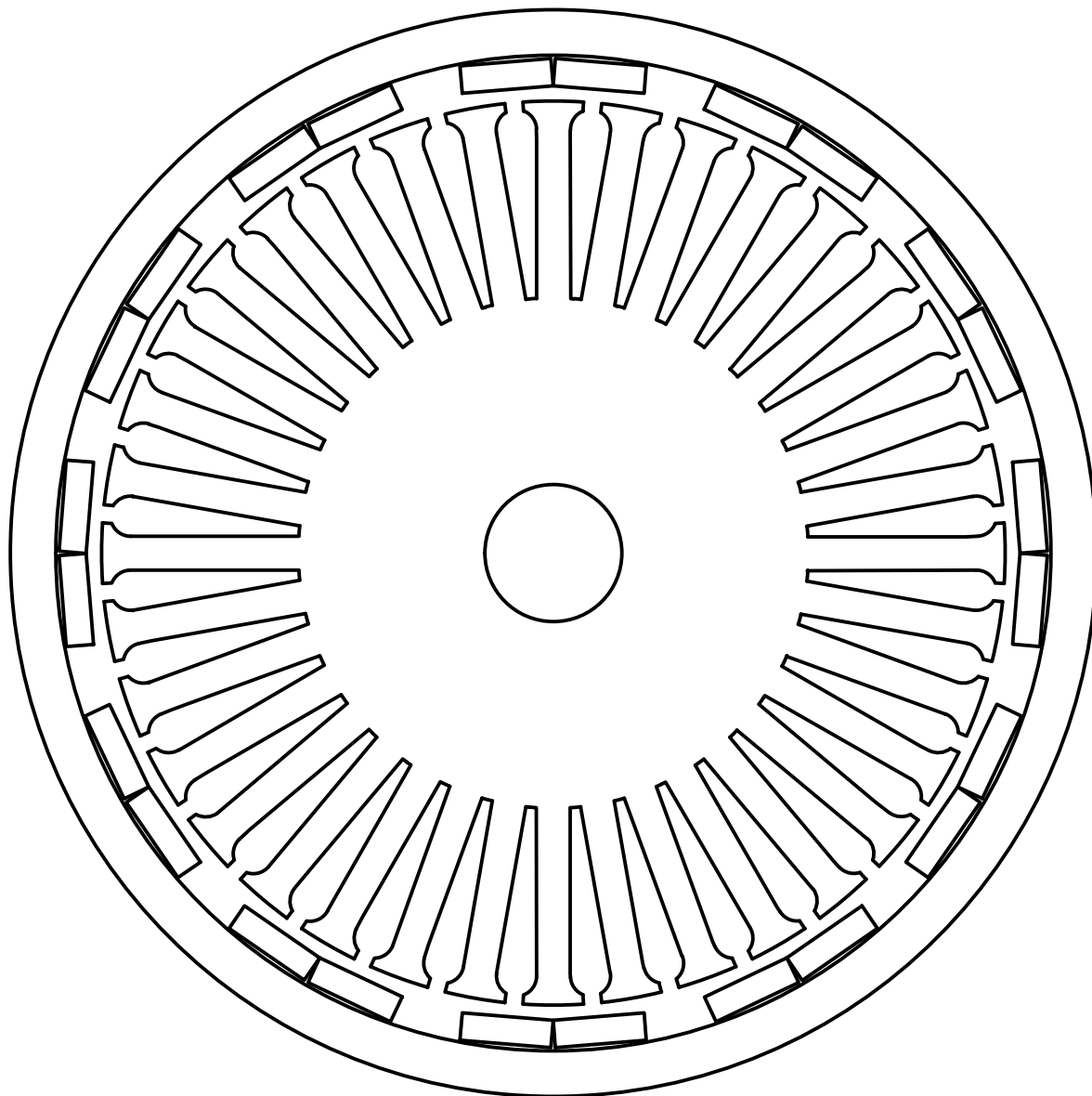
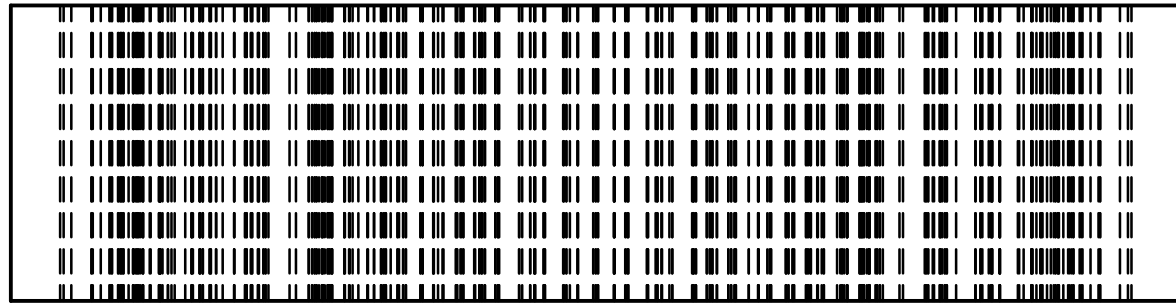

11 Planos



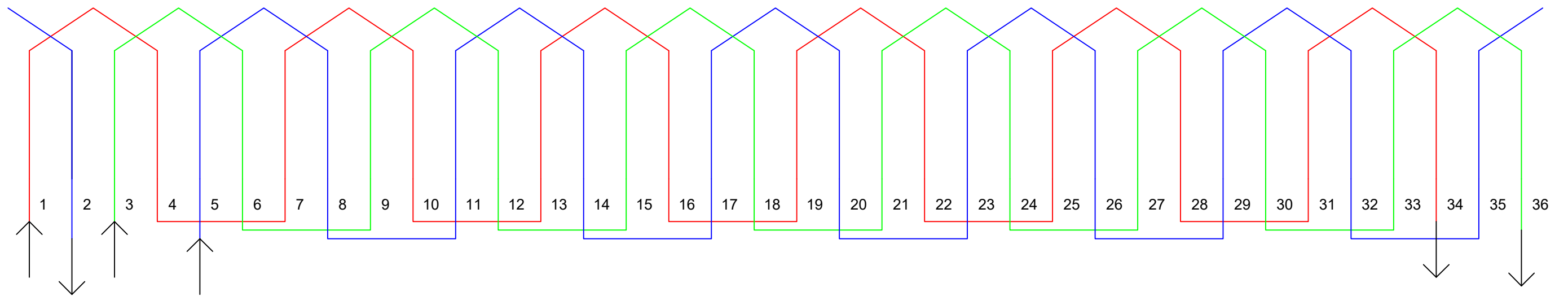
<i>Autor</i>	RAÚL CARAYOL RODRÍGUEZ	UNIVERSIDAD ROVIRA I VIRGILI	
<i>Escala</i>	1,3:1	Estator del Motor	Nº 1



<i>Autor</i>	RAÚL CARAYOL RODRÍGUEZ	UNIVERSIDAD ROVIRA I VIRGILI
<i>Escala</i>	1,3:1	Rotor externo Motor
		Nº2



<i>Autor</i>	<i>RAÚL CARAYOL RODRÍGUEZ</i>	<i>UNIVERSIDAD ROVIRA I VIRGILI</i>	
<i>Escala</i>	<i>1,3:1</i>	<i>Conjunto Motor</i>	<i>Nº3</i>



<i>Autor</i>	<i>RAÚL CARAYOL RODRÍGUEZ</i>	<i>UNIVERSIDAD ROVIRA I VIRGILI</i>	
<i>Escala</i>	<i>ND</i>		<i>Nº4</i>
		<i>Esquema Devanado</i>	