

(19)



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



(11) Número de publicación: **2 932 758**

(21) Número de solicitud: 202130790

(51) Int. Cl.:

H02K 33/16 (2006.01)

H02K 7/075 (2006.01)

(12)

SOLICITUD DE PATENTE

A1

(22) Fecha de presentación:

12.08.2021

(30) Prioridad:

20.07.2021 ES P202130689

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

25.01.2023

(71) Solicitantes:

UNIVERSIDAD DE GRANADA (100.0%)
Hospital Real. Avda. del Hospicio s/n
18071 Granada (Granada) ES

(72) Inventor/es:

RUIZ-CABELLO NÚÑEZ, Miguel David;
GONZÁLEZ GARCÍA, Salvador;
RUBIO BRETONES, Amelia;
GÓMEZ MARTÍN, Rafael;
DÍAZ ANGULO, Luis Manuel;
VARGAS TENDERO, Gonzalo y
OGAYA RUBIO, Manuel

(74) Agente/Representante:

ESCUDEO PRIETO, Nicolás

(54) Título: **PISTÓN ELECTROMAGNÉTICO, MOTOR QUE COMPRENDE DICHO PISTÓN Y PROCEDIMIENTO DE CONTROL DE DICHO MOTOR**

(57) Resumen:

Pistón electromagnético, motor que comprende dicho pistón y procedimiento de control de dicho motor.

La presente invención describe un pistón cuyo movimiento a lo largo del eje de un cilindro se produce mediante interacción electromagnética, transformando así la energía eléctrica en mecánica. Dicho pistón (5, 6) comprende un primer prisma (1) recto cuyo interior está parcialmente hueco y que está dispuesto a lo largo de un eje (3, 4) longitudinal, un segundo prisma (2) recto alojado en el hueco definido por el primer prisma (1) y alineado con el eje (3, 4) longitudinal, y una bobina (7, 8) de hilo de material conductor devanada alrededor del segundo prisma (2). También son objeto de la invención el motor que comprende estos pistones (5, 6), las máquinas o vehículos cuyo movimiento se produce por el funcionamiento de dicho motor y el procedimiento de control de dicho motor.

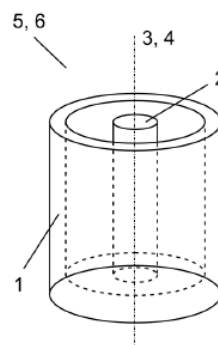


FIG. 1

DESCRIPCIÓN

PISTÓN ELECTROMAGNÉTICO, MOTOR QUE COMPRENDE DICHO PISTÓN Y PROCEDIMIENTO DE CONTROL DE DICHO MOTOR

5 CAMPO DE LA INVENCIÓN

La presente invención se encuentra, en general, en el campo de la mecánica, y más concretamente en el de las máquinas dinamoeléctricas.

10 Concretamente, se describe un pistón cuyo movimiento a lo largo del eje de un cilindro se produce mediante interacción electromagnética, transformando así energía eléctrica en mecánica.

ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

15

Los motores eléctricos llevan entre nosotros desde finales del siglo XIX por lo tanto la cantidad de ideas, prototipos y patentes que han surgido durante estos años es enorme, aunque el solicitante no ha encontrado documentos que describan el pistón objeto de la presente invención.

20

A continuación, se relacionan los documentos que el solicitante considera más cercanos a la invención, junto con una breve descripción con las diferencias básicas respecto a la presente invención:

25 En [ES2000067], "Motor alternativo electromagnético", se describe un pistón constituido por un imán permanente, y un cilindro provisto de dos electroimanes, en su parte superior y en su parte inferior, cuyos campos, al ser energizados alternativamente, actúan sobre el pistón, repeliéndolo en uno u otro sentido a lo largo del eje longitudinal del cilindro, a diferencia del pistón que se propone, en el que atracción y repulsión la
30 genera el propio pistón (o los pistones entre sí en una realización particular) no con el bloque motor.

En [MXJL06000055 A], "Cabezal electromagnético lineal para aplicaciones en motores de pistones o émbolo", se describe el uso de un núcleo con una alta permeabilidad magnética de forma que, al introducirse en el seno de las bobinas fijas del bloque motor,

cree una variación de flujo magnético contraria a su movimiento, y por tanto lo impulsa en sentido opuesto al que intentaba trasladarse, obteniendo así un movimiento lineal impulsado por las bobinas estáticas. El principio físico empleado en este modelo es diferente al que se propone en esta invención.

- 5 Por su parte, la invención descrita en [US8151745] tiene como finalidad hacer una hibridación entre la combustión que se produzca dentro del bloque, encargada de impulsar el/los pistones, y la transformación de dicho movimiento en energía eléctrica. Esta transformación se logra usando parte de los pistones como imanes permanentes, y colocando bobinas que rodeen el cilindro por cuyo interior se va a desplazar el pistón,
- 10 de tal forma que al moverse por el cilindro induce una fuerza electromotriz en las bobinas generando energía que se puede aprovechar para otras finalidades, incluida el impulso electromagnético de los pistones. Además, el sistema propuesto en la patente [US4631455], titulada "Method and apparatus for converting a conventional internal combustion engine into a high speed electric motor and generator", se centra en la
- 15 electrificación del pistón de un motor de combustión convencional y propone un sistema de accionamiento electromagnético del pistón similar a la solicitud [MXJL06000055 A], mencionada anteriormente.

- Por otra parte, en [SumitDhangar, AjinkyaKorane, DurgeshBarve, (2015), "Magnetic Piston Operated Engine", IJARSE, 4(6)] se detallan cuáles son las características y
- 20 requerimientos físicos para producir movimiento usando el pistón con un imán permanente añadido en su cara superior. El funcionamiento es similar al explicado en la solicitud [MXJL06000055 A].

- Finalmente, en [Selvakumar, T., S. Karthik, and S. Arun Kumar. "Modern Electric Engine for Future Cars". International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS). IEEE, 2018] se propone un motor híbrido, con dos modos de
- 25 operación: combustión y eléctrico. En este motor, la cámara en la que se alojan las bobinas que genera el movimiento electromagnético es compartido con la cámara de combustión, lo que requiere una configuración muy resistente para resistir ni las presiones y las altas temperaturas que genera un motor de explosión y conseguir la
- 30 estanqueidad necesaria. La presente invención también describe un conjunto que comprende un cilindro y al menos un pistón, cuya configuración es diferente, que está diseñado para confinar el campo magnético y para aumentar la eficiencia del motor, empleando materiales de alta permeabilidad y alta saturación, los cuales no tendrían que resistir ni las presiones ni las altas temperaturas por qué soportar de un motor
- 35 híbrido combustión-eléctrico como el que propone en el artículo de Selvakumar.

DESCRIPCIÓN BREVE DE LA INVENCION

La presente invención describe un pistón, referido de aquí en adelante también como “pistón de la invención”, con una configuración adaptada a partir de un pistón convencional para que en su interior se almacene una bobina de material conductor eléctrico (por ejemplo, cobre). Al alimentar la bobina (aplicando una corriente de cierta intensidad y polarización), se induce un campo magnético en el núcleo magnético de dicho pistón, generando movimientos de atracción y repulsión magnética, y el consiguiente desplazamiento del pistón a lo largo del eje longitudinal del cilindro en el que se aloja.

Ventajosamente, el pistón de la invención comprende:

- Un primer prisma recto cuyo interior está parcialmente hueco y que está dispuesto a lo largo de un eje longitudinal; estando dicho primer prisma fabricado de material de alta permeabilidad magnética y alta saturación.
- Un segundo prisma recto fabricado de material de alta permeabilidad magnética y alta saturación, estando dicho segundo prisma alojado en el hueco definido por el primer prisma y alineado con el eje longitudinal.
- Una bobina de hilo de material conductor devanada alrededor del segundo prisma (2).
- Medios de alimentación conectados a la bobina y adaptados para proporcionar una señal eléctrica a dicha bobina, donde dicha señal eléctrica controla la intensidad y la polarización de la corriente que circula en la bobina.

En realizaciones particulares del pistón de la invención, el segundo prisma es macizo.

En otras realizaciones particulares del pistón de la invención, el material de alta permeabilidad magnética y alta saturación con el que se fabrican los prismas comprende un material ferromagnético, preferentemente seleccionado del grupo formado por: hierro, acero de silicio, acero amorfo, acero al carbono y cerámica de ferrita.

En realizaciones preferentes del pistón de la invención, tanto el primer prisma como el segundo prisma son cilindros rectos. En realizaciones aún más preferentes del pistón de la invención, donde las dimensiones de los cilindros rectos están comprendidas entre los siguientes valores: el radio exterior del primer cilindro está comprendido en el intervalo [32.5, 325] mm, el radio interior del primer cilindro está comprendido en el

intervalo [30, 300] mm, la altura del primer cilindro pertenece al intervalo [55, 1450] mm, el radio exterior del segundo cilindro pertenece al intervalo [15, 150] mm y la altura del segundo cilindro está comprendida en el intervalo [30, 1200] mm.

Un segundo objeto de la invención (más adelante también referido como “conjunto cilindro-pistón de la invención”) corresponde a un dispositivo para su uso en un motor, caracterizado por que comprende uno o más pistones, como los descritos anteriormente, alineados a lo largo del eje longitudinal; un tercer prisma recto y hueco que aloja a los uno o más pistones y que está alineado con el eje longitudinal de dichos pistones, donde dicho tercer prisma dispone de unas dimensiones aptas para que los pistones puedan desplazarse en su interior a lo largo de dicho eje longitudinal; y un sistema de control configurado para controlar la alimentación eléctrica de los pistones y configurar selectivamente la intensidad y polarización de la corriente eléctrica que circula por las bobinas, donde la variación de dicha corriente eléctrica provoca movimientos de atracción y repulsión magnética entre dichos pistones.

En realizaciones preferentes del dispositivo para su uso en un motor, el tercer prisma es un cilindro.

En realizaciones preferentes del dispositivo para su uso en un motor, este comprende dos pistones como los descritos anteriormente y una biela. En dichas realizaciones, al menos uno de los pistones comprende medios de interconexión (por ejemplo, un bulón) para su conexión a dicha biela. En realizaciones aún más preferentes del dispositivo para su uso en un motor, uno de los pistones es un pistón fijo que está fijado a una de las bases del prisma de alojamiento recto y hueco que lo contiene en su interior, mientras que el segundo pistón es un pistón móvil que comprende medios de interconexión para conectarlo a la biela.

En realizaciones preferentes del dispositivo para su uso en un motor, el tercer prisma, los pistones y los segundos prismas forman un conjunto conexo y están conectados físicamente al menos por un punto de contacto. Así, dicho dispositivo está configurado como un sistema magnético cerrado, de forma que mantenga el confinamiento y el campo magnético en su interior. En realizaciones aún más preferentes, el tercer prisma que contiene los uno o más pistones comprende un material de alta permeabilidad magnética y alta saturación. Por ejemplo, dicho material es ferromagnético, concretamente uno de los siguientes: hierro, acero de silicio, acero amorfo, acero al carbono o cerámica de ferrita.

Un tercer objeto de la invención corresponde a un nuevo motor eléctrico que comprende el pistón de la invención o el dispositivo para su uso en un motor. A pesar de que estudios previos indicaban que los motores de este tipo tienen una baja eficiencia (véase el motor divulgado en [SumitDhangar, AjinkyaKorane, DurgeshBarve], mencionado
5 anteriormente en la sección de antecedentes), los autores de la presente invención han ideado un motor cuya principal característica es la gran fuerza que es capaz de desarrollar y el par motor al transformar el movimiento de lineal a rotativo, de forma que dicho motor puede ser utilizado en general, en cualquier sector: automoción, industria, maquinaria pesada, sector naval, etc.

- 10 En algunas realizaciones preferentes del motor de la invención, los medios de alimentación comprenden una fuente de corriente continua conectada a la bobina del pistón fijo y una fuente de corriente alterna conectada a la bobina del pistón móvil. Además, el motor comprende un bloque motor, que comprende a los pistones, y está adaptado para mantener la posición relativa entre el tercer prisma y el eje del cigüeñal.
- 15 El cigüeñal está conectado a la biela, esta última encargada de transformar el movimiento lineal de los pistones en un movimiento de rotación en el cigüeñal. El motor también comprende un volante de inercia conectado al cigüeñal, estando adaptado dicho cigüeñal para transmitir el movimiento de rotación a un volante de inercia.

Un cuarto objeto de la invención comprende un procedimiento para controlar el
20 movimiento de dos pistones comprendidos en un dispositivo para su uso en un motor, que comprende estos pasos:

- Mediante los medios de alimentación, aplicar una corriente eléctrica a las bobinas de cada pistón.
- Mediante el sistema de control, aplicar una señal eléctrica para controlar la intensidad
25 y la polarización de la corriente eléctrica suministrada a dichas bobinas en función de la distancia de separación y la dirección de movimiento relativo entre dichos pistones, y así inducir interacciones magnéticas entre los pistones para controlar el movimiento de dichos pistones.

En realizaciones preferentes del procedimiento de la invención, el funcionamiento del
30 sistema de control comprende la realización de los siguientes pasos:

- Definir una pluralidad de valores umbrales 1 a 4 en función de la eficiencia y geometría del dispositivo.

- Medir la distancia de separación de los pistones y la dirección del movimiento relativo entre dichos pistones.

- Según la dirección del movimiento relativo entre los pistones (según si los pistones (5, 6) se están acercando o alejando entre sí), escoger alternativamente uno de los siguientes cursos de acción:

a) Si los pistones se están alejando entre sí:

- Si la distancia de separación de los pistones alcanza un valor umbral 1, se envía mediante el sistema de control una señal eléctrica a cada pistón de forma que la intensidad que circule por sus bobinas provoque la repulsión magnética entre dichos pistones.

- Si la separación de los pistones alcanza un valor umbral 2, se envía mediante el sistema de control una orden de desconexión de la señal eléctrica de alimentación de las bobinas.

b) Si los pistones se están acercando entre sí:

- Si la distancia de separación de los pistones alcanza un valor umbral 3, se envía mediante el sistema de control una señal eléctrica a cada pistón de forma que la intensidad que circule por sus bobinas provoque la atracción magnética entre dichos pistones.

- Si la separación de los pistones alcanza un valor umbral 4, se envía mediante el sistema de control una orden de desconexión de la señal eléctrica de alimentación de las bobinas.

Un quinto objeto de la invención corresponde a una máquina o vehículo accionado total o parcialmente por el motor de la invención. En comparación con otros motores eléctricos rotativos, los modelos teóricos y simulaciones estiman que este nuevo modelo de motor eléctrico es capaz de desarrollar más fuerza en su movimiento lineal, y, por lo tanto, más par de torsión en un movimiento rotativo que los motores eléctricos actuales. Por tanto, el motor obtenido con el pistón de la presente invención puede ser usado como maquinaria industrial para levantar y/o mover cargas, también para mover vehículos de grandes dimensiones como por ejemplo tractores, monstertrucks, vehículos militares, embarcaciones de gran tamaño o aeronaves que usen motores de pistones en general.

A modo de ejemplo, las embarcaciones de transporte y carga, y cruceros de gran envergadura, actualmente, no usan motores eléctricos para moverse, emitiendo una cantidad ingente de moléculas contaminantes a la atmósfera. Uno de los principales problemas por los que no se produce la electrificación, es porque serían necesarias baterías muy pesadas y costosas para almacenar toda la energía necesaria, pero reducir el consumo energético derivado de la movilidad de la embarcación puede favorecer que sea viable electrificar estas embarcaciones. El motor que se describe en esta invención, al desarrollar más par motor, puede mover una mayor cantidad de agua a través de las hélices y producir una mayor fuerza de empuje. Mejorando el empuje se reduce el consumo de las baterías, mejorando así la viabilidad.

Este argumento también es válido para helicópteros o aeronaves que son propulsadas por combustibles fósiles y conviene que sean capaces de usar otro tipo de motores para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

En el aspecto mecánico, el modelo propuesto elimina complejidades de los motores mecánicos de combustión de pistones como por ejemplo la necesidad de caja de cambios, válvulas, así como sus elementos derivados, y, sobre todo, no requiere que el sistema pistón - cilindro sea estanco.

Cabe destacar una ventaja comercial muy relevante respecto a motores que se describen, que comprenden el pistón de la invención, y es que se favorece el proceso de electrificación. Esto se debe a que, al ser también un motor de pistones, y al permitir conservar el mecanismo de biela-cigüeñal típico de los motores de combustión interna, se puede aprovechar gran parte de los mecanismos posteriores al bloque motor que permiten la transmisión del movimiento hacia las ruedas, hélices o cualquier elemento motriz. Este hecho supone un ahorro de muchos costes en los procesos de fabricación ya que se pueden adaptar parte de los procesos industriales a este nuevo tipo de motor eléctrico en vez de crearlos desde cero.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

Con el objeto de completar la descripción y de ayudar a una mejor comprensión de las características del invento, se presenta un juego de figuras en donde con carácter ilustrativo y no limitativo se representan diversos aspectos de la presente invención.

La Figura 1 ilustra un esquema del pistón de la invención, que comprende: representa un prisma (1) recto parcialmente hueco, un prisma (2) recto macizo actuando como

núcleo magnético. El primer prisma (1) tiene un eje (3) longitudinal, y el segundo prisma (2) también tiene un segundo eje (4) longitudinal. Ambos ejes (3, 4) coinciden, de modo que los prismas (1, 2) están alineados.

- 5 La Figura 2 representa una sección lateral de una realización preferente del motor de la invención.

La Figura 3 muestra un ejemplo de pistón (5, 6), conformado por prismas (1, 2, 2') y bobinas (7, 8).

La Figura 4 ilustra un corte del modelo tridimensional del motor electromagnético.

- 10 En la Figura 5, panel izquierdo, se observan las líneas del campo magnético generado por las bobinas (7, 8); mientras que en el panel derecho se muestra un mapa escalar que representa la magnitud del campo magnético. Se adjunta una escala de colores para estimar el valor del campo en cada punto. La interacción magnética de ambos pistones (5, 6) es una fuerza repulsiva aplicada sobre el pistón (6) móvil (inferior).

- 15 La Figura 6 muestra la fuerza de repulsión entre pistones (5, 6) simulada para una fuerza magnetomotriz de $\mathcal{F} = 100$ [Av].

La Figura 7 ilustra la fuerza repulsiva generada por las bobinas (7, 8) para una fuerza magnetomotriz de $\mathcal{F} = 22000$ [Av].

- 20 La Figura 8 (panel izquierdo) representa las líneas de campo magnético generadas por las bobinas (7, 8) cuando la corriente circula en el mismo sentido en ambos pistones (5, 6). El panel derecho corresponde al mapa escalar que representa el campo magnético cuando estamos en el caso atractivo entre pistones. Se ha aplicado una fuerza magnetomotriz de $\mathcal{F} = 100$ [Av].

- 25 La Figura 9 muestra las líneas de campo magnético en el caso atractivo a una distancia de 50 mm entre los núcleos magnéticos.

La Figura 10 representa la fuerza de atracción experimentada por el pistón (6) móvil en varios puntos del recorrido para una fuerza magnetomotriz de $\mathcal{F} = 100$ [Av].

La Figura 11 ilustra el circuito magnético equivalente del motor de la invención, en el caso de hipótesis geométrica.

- 30 La Figura 12 corresponde al circuito simplificado en el caso repulsivo entre pistones (5, 6).

La Figura 13 representa una simplificación del circuito para la reluctancia equivalente.

La Figura 14 muestra una comparación entre la fuerza teórica obtenida a partir del método geométrico y la fuerza simulada para el caso de repulsión con una fuerza magnetomotriz de $\mathcal{F} = 100$ [Av].

- 5 La Figura 15 representa el circuito planteado para el modelo de variable simulada en el caso atractivo entre pistones (5, 6).

La Figura 16 corresponde al circuito magnético para el método de la variable simulada de la Figura 15 analizado por mallas.

- La Figura 17 ilustra una comparación entre la fuerza teórica del método de la variable y
10 la fuerza simuladas para el caso de repulsión con una fuerza magnetomotriz de $\mathcal{F} = 100$ [Av].

Referencias numéricas utilizadas en los dibujos:

(1)	Primer prisma, parcialmente hueco
(2)	Segundo prisma (núcleo magnético)
(3)	Eje longitudinal del primer prisma
(4)	Eje longitudinal del segundo prisma
(5)	Pistón fijo
(6)	Pistón móvil
(7)	Bobina del pistón fijo
(8)	Bobina del pistón móvil
(9)	Tercer prisma
(10)	Entrehierro
(11)	Biela
(12)	Cigüeñal
(12')	Eje del cigüeñal
(13)	Volante de inercia
(14)	Cable de alimentación de la bobina del pistón fijo
(14')	Cable de alimentación de la bobina del pistón móvil

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

Se expone, a continuación, una descripción detallada de la invención referida a diferentes realizaciones preferentes de la misma, basada en las Figuras 1-17 del presente documento.

Definiciones

- 5 A lo largo de la descripción y las reivindicaciones la palabra "comprende" y sus variantes no pretenden excluir otras características técnicas, aditivos, componentes o pasos. Para los expertos en la materia, otros objetos, ventajas y características de la invención se desprenderán en parte de la descripción y en parte de la práctica de la invención.
- 10 Además, en el ámbito de la presente invención, se entenderá la abreviatura "AV" o "Av", indistintamente, como "Amperio por vuelta", que será la unidad en la que se medirá la fuerza magnetomotriz.

- En el contexto de la presente invención, cuando se hace referencia a "intensidad" o
- 15 "intensidad de la corriente eléctrica" se entenderá que se refiere al módulo del vector intensidad eléctrica. Además, el término "polarización" de la corriente eléctrica se referirá a la dirección y sentido de dicho vector intensidad.

- El término "prisma" (1, 2, 2', 9) se referirá a un cuerpo geométrico formado por dos caras
- 20 planas poligonales, paralelas e iguales (bases), y tantos paralelogramos a modo de caras laterales como lados tiene cada base. En el ámbito de esta invención, el término "prisma recto" engloba, en una realización particular, y preferente, al cilindro, considerando que un cilindro es un prisma en el que el número de lados tiende a infinito, con el objetivo de no perder generalidad en la geometría. En los prismas (1, 2, 2', 9) se
- 25 definirá un eje (3) longitudinal como un eje perpendicular a las bases de dichos prismas (1, 2, 2', 9).

- A lo largo de la especificación de la presente invención, se entenderá que un material tiene alta saturación cuando su campo magnético B satura a un valor $B_{sat} \geq 0.5$ T. Por
- 30 otro lado, el material tendrá alta permeabilidad cuando su permeabilidad magnética relativa (μ_r) sea muy superior a 1, y más preferentemente, cuando su permeabilidad magnética relativa verifique $\mu_r \geq 2000$.

Pistón de la invención

En un primer aspecto, la invención describe un pistón (5, 6), en adelante “pistón de la invención”.

En su concepción más general (véase Figura 1), el pistón de la invención comprende:

- 5 - Un primer prisma (1) recto, cuyo interior está parcialmente hueco.
- Un segundo prisma (2) (también referido como núcleo de aquí en adelante) recto, preferiblemente macizo, cuya base tiene unas dimensiones inferiores a las dimensiones interiores del primer prisma, y que está alojado en el hueco interior definido por el primer prisma, de forma sus ejes (3, 4) longitudinales coinciden. Los prismas (1, 2) deben ser
- 10 rectos para que se puedan desplazar a lo largo de los ejes (3, 4) longitudinales.
- Una bobina (7, 8) de hilo de material conductor devanada alrededor del segundo prisma (2).

Esta estructura de pistón de la invención puede emplearse tanto en un pistón (5) fijo

15 como en un pistón (6) móvil, como se detallará más adelante.

En una realización preferente del pistón de la invención, la bobina (7, 8) de hilo de material conductor comprende una bobina de hilo de cobre esmaltado.

20 En una realización particular, el segundo prisma (2) está unido al primer prisma (1), y una bobina (7, 8) de hilo de cobre esmaltado va devanada alrededor de dicho segundo prisma (2).

En una realización preferente, los prismas (1, 2, 2') que comprende el pistón (5, 6) de la invención están fabricados en un material de alta permeabilidad y alta saturación,

25 preferentemente, con un material ferromagnético como hierro, acero de silicio, acero amorfo, acero al carbono o cerámica de ferrita. En otras realizaciones se pueden emplear otros materiales de propiedades magnéticas equivalentes, los cuales se considerarán de alta saturación cuando su campo magnético B sature a un valor $B_{sat} \geq 0.5 \text{ T}$ y alta permeabilidad magnética cuando su permeabilidad magnética cumpla: $\mu_r \geq$

30 2000.

En una realización preferente, en la que los prismas (1, 2) rectos son cilindros, el pistón (5, 6) de la invención se caracteriza por que las dimensiones de los cilindros están comprendidas entre los siguientes valores:

R1 = Radio exterior del primer cilindro, correspondiente al pistón fijo (5), comprendido en el intervalo [32.5, 325] [mm].

r1 = Radio interior del primer cilindro comprendido en el intervalo [30, 300] [mm].

H1 = Altura del primer cilindro, comprendida en el intervalo [55, 1450] [mm].

- 5 R2 = Radio exterior del segundo cilindro, correspondiente al pistón móvil (6), comprendido en el intervalo [15, 150] [mm].

H2 = Altura del segundo cilindro, comprendida en el intervalo [30, 1200] [mm].

Conjunto Cilindro-Pistón de la invención

- 10 También es objeto de la presente invención un dispositivo que comprende un tercer prisma (9) (preferentemente un cilindro) para su uso en un motor en el que se aloja al menos un pistón de la invención, el adelante “conjunto cilindro-pistón de la invención”. Dicho tercer prisma (9) es al menos parcialmente hueco y está adaptado para alojar los pistones (5, 6) de la invención. El hueco del tercer prisma (9) es elongado a lo largo del
- 15 eje (3, 4) longitudinal de los pistones (5, 6) alojados en el mismo. Dicho hueco dispone de unas dimensiones aptas para que se desplacen, a lo largo de dicho eje (3, 4) longitudinal (definido como la dirección perpendicular a las bases de dicho prisma de alojamiento), dos pistones (5, 6) de la invención, al menos uno de los cuales comprende medios de interconexión para conectarlo a una biela (11); y medios de alimentación de
- 20 los pistones (5, 6). Los ejes (3, 4) longitudinales del prisma de alojamiento y de los prismas (1, 2) de los pistones (5, 6) son coincidentes. Los medios de alimentación están configurados para hacer que a través de los pistones (5, 6) circulen corrientes en el mismo o diferente sentido, provocando así movimientos de atracción y repulsión entre dichos pistones (5, 6).
- 25 Una realización preferente del conjunto cilindro-pistón de la invención comprende un pistón (5) móvil y un pistón (6) fijo que está fijado a una de las bases del tercer prisma (9) recto hueco que aloja a dichos pistones (5, 6) contiene en su interior. El conjunto cilindro-pistón comprende unas bobinas (7, 8) que se devanan sobre el segundo prisma (2) y que están alimentadas por una señal de corriente eléctrica de intensidad y
- 30 polarización determinadas. Preferiblemente, el pistón (6) móvil comprende medios de interconexión (por ejemplo, un bulón) para conectarlo a una biela (11).

En una realización preferente, el conjunto cilindro-pistón de la invención está configurado como un sistema magnético cerrado, comprendiendo los medios necesarios para mantener el confinamiento y el campo magnético. Estos medios comprenden tanto la selección adecuada de materiales (preferiblemente materiales ferromagnéticos) y una configuración geométrica adecuada (el tercer prisma (9) y pistones (5, 6) deben formar un conjunto conexo, es decir, tienen que estar físicamente en contacto por algún punto.

En una realización preferente del conjunto cilindro-pistón de la invención, el tercer prisma (9) también está fabricado en un material que exhibe alta permeabilidad magnética y alta saturación, preferiblemente un material ferromagnético y aún más preferiblemente, uno escogido de entre los siguientes: hierro, acero de silicio, acero amorfo, acero al carbono o cerámica de ferrita. El material o materiales que componen el tercer prisma (9) pueden ser diferentes de los que componen los prismas (1, 2).

Motor de la invención

También es objeto de la presente invención un motor, en adelante “motor de la invención” que comprende menos un pistón (5, 6) de la invención, o al menos un conjunto cilindro-pistón de la invención. Preferentemente, el motor comprende dos pistones (5, 6) de la invención, y aún más preferentemente, el motor comprende un conjunto cilindro-pistón de la invención en el que se alojan dos pistones (5, 6) de la invención. Tal y como se observa en la Figura 2, una realización particular de dicho motor comprende los siguientes elementos: un pistón (5) fijo, un pistón (6) móvil, bobinas (7, 8) o devanados, un tercer prisma (9) (preferentemente un cilindro), una biela (11), un cigüeñal (12) que se mueve en torno a un eje (12’), un volante (13) de inercia y cables (14, 14’) de alimentación. Cada uno de los pistones (5, 6) comprende una bobina (7, 8).

25

Procedimiento de control de la invención

Otro objeto de la invención es un procedimiento, en adelante “procedimiento de control de la invención”, para controlar el movimiento de dos pistones (5, 6) en el interior un conjunto cilindro-pistón de la invención, que comprende la utilización de un sistema de control para la conexión y desconexión de los medios de alimentación que suministran corriente eléctrica a las bobinas (7, 8) de cada pistón (5, 6). Así se produce un cambio de polaridad en función de la separación entre los pistones y su dirección de movimiento.

30

En una realización particular del procedimiento de control de la invención, este comprende: definir una pluralidad de valores umbrales; y medir la separación de los pistones (5, 6) de la invención y la dirección de su movimiento.

Los valores umbrales están predeterminados en función del dispositivo; y son
 5 parámetros fijos que se determinan para optimizar la eficiencia del motor y otros parámetros de funcionamiento (su ciclo de trabajo, la potencia calorífica disipada por el dispositivo, vida útil deseada, etc.). Los valores umbrales dependerán del diseño y dimensiones del conjunto cilindro-pistón, así como de la carrera (distancia que recorre el pistón (5, 6) dentro del cilindro). Para ello se puede utilizar procedimientos mediante
 10 simulación (empleando técnicas de aprendizaje automático), o ensayos reales en banco de trabajo.

Sistema de control de la invención para determinar el sentido de las corrientes

Otro objeto de la invención es un sistema, en adelante "sistema de control de la
 15 invención" para determinar la polarización (sentido) de las corrientes que circulan por las bobinas (7, 8) en función de la posición de los pistones (5, 6) comprendidos en un mismo conjunto cilindro-pistón de la invención que comprende: medios, eléctricos o mecánicos, para ejecutar el procedimiento de control de la invención y un sistema de control (activación) de las bobinas (7, 8) configurados para activar o desactivar las
 20 bobinas (7, 8) en función de la posición de los pistones (5, 6), la dirección de movimiento de los pistones (5, 6) y la distancia entre dichos pistones (5, 6); y medios de alimentación de las bobinas (7, 8). El término "activar" o "desactivar" las bobinas hace referencia a que circule o no corriente eléctrica en las mismas. Con "dirección de movimiento" se hace referencia a si los pistones (5, 6) se están acercando o alejando entre sí.

25 Una realización particular del sistema de control de la invención comprende uno o más interruptores o conmutadores magnéticos, y/o uno o más sensores de infrarrojos. En otras realizaciones, el sistema de control de la invención comprende además un ordenador de control u otro dispositivo electrónico (microprocesador, etc.) capaz de ejecutar una serie de instrucciones lógicas. Por ejemplo, el ordenador de control permite
 30 activar o desactivar los medios de alimentación eléctrica de las bobinas (7, 8), o modificar la intensidad y polarización de las corrientes que circulan por dichas bobinas (7, 8) en función de la distancia entre pistones (5, 6) medida con los interruptores magnéticos o los sensores de infrarrojos. El ordenador de control, por tanto, comprende

medios de comunicación (cableada o inalámbricamente) para comunicarse con estos interruptores magnéticos, sensores de infrarrojos o dispositivos análogos.

Máquinas de la invención

- 5 La invención también tiene por objeto una máquina, por ejemplo, una máquina industrial o un vehículo, accionada total o parcialmente por el motor de la invención, que además comprenden un sistema de control de la invención para controlar el funcionamiento de dicho motor.

10 REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION

Los siguientes ejemplos y dibujos se proporcionan a modo de ilustración, y no se pretende que sean limitativos de la presente invención. Además, la presente invención cubre todas las posibles combinaciones de realizaciones particulares y preferidas aquí indicadas.

15

Ejemplo de motor de la invención

- En un primer ejemplo, se describe un motor de un solo tercer prisma o cilindro (Figura 2). En el interior del cilindro (también mencionado como recubrimiento), hay dos pistones
20 (5, 6) de la invención, uno fijo y otro móvil. La interacción entre ellos es la que genera el movimiento, asemejándose a la interacción de dos imanes.

- En este motor se ha adaptado la forma del pistón (5, 6) convencional para que en su interior almacene una bobina (7) de hilo de material conductor, por ejemplo, cobre. Cada
25 pistón comprende una bobina (7, 8). Dichas bobinas (7, 8) están alimentadas por medios de alimentación que comprenden fuentes de alimentación eléctrica: en el caso del pistón (5) fijo, se emplea una fuente (regulable o no mediante el sistema control) de corriente continua, mientras que en el caso del pistón (6) móvil se utiliza una fuente (regulable o no) de corriente alterna para su alimentación. En otras realizaciones, las bobinas pueden
30 alimentarse independientemente con cualquier tipo de fuente continua o alterna.

Al alimentar las bobinas (7, 8), se induce un campo magnético en los segundos prismas (2) o núcleos magnéticos, de tal forma que todo el conjunto puede ser tratado por la teoría de los circuitos magnéticos. Se emplea una fuente de corriente alterna en el pistón

(6) móvil para poder cambiar la polaridad del campo inducido, de forma que haya atracción y repulsión de forma controlada.

En cuanto a la parte mecánica, se han empleado elementos usuales de un motor de
5 combustión interna convencional. La invención comprende un tercer prisma (9)
(preferiblemente un cilindro), también referido como recubrimiento o armazón, que
contiene a los pistones (5, 6). Además, el motor de la invención comprende una biela
(11) que transforma el movimiento lineal de los pistones (5, 6) en un movimiento de
rotación en el cigüeñal (12) respecto a un eje (12') de dicho cigüeñal. El cigüeñal (12)
10 está diseñado para combinar el par generado por diversos terceros prismas (cilindros)
y transmitir el movimiento de rotación a un volante (13) de inercia. Por último, el motor
de la invención también comprende un volante (13) de inercia se encarga de amortiguar
las vibraciones generadas por el motor y acumular energía cinética, y así amortiguar los
impulsos de potencia generados por los pistones (5, 6) del motor. Las bobinas (7, 8)
15 están conectadas a sendos cables (14, 14') de alimentación a través de los cuales se
envían señales eléctricas. Dichas señales eléctricas, generadas por el sistema de
control, controlan la activación o desactivación de dichas bobinas (7, 8), así como la
corriente y polarización que circula por ellas. Por ejemplo, los medios de control
comprenden interruptores o conmutadores analógicos o digitales, o bien sensores
20 infrarrojos. Los medios de control (activación) están adaptados para regular la corriente
proporcionada por los medios de alimentación eléctrica, mediante el envío de
instrucciones para aplicar ciertas corrientes o detener la alimentación eléctrica de las
bobinas (7, 8).

25 **Ejemplo de pistón de la invención**

El pistón (5, 6) de la invención está conformado por dos piezas metálicas una en forma
de disco y otra con forma de cilindro alargado que se encargarán de soportar la bobina
(7), tal y como se muestra en la Figura 3.

30

Todos los elementos conforman el pistón (5, 6), que es el encargado de transmitir el
movimiento producido por la interacción electromagnética al cigüeñal (12), provocando
así un movimiento circular que puede ser aprovechado por el volante (13) de inercia.

35

Ejemplo del conjunto cilindro-pistón de la invención

El bloque motor, recubrimiento o armazón, se refiere al armazón que contiene a los pistones (5, 6). La existencia del bloque motor en el motor de la invención contribuye a un camino magnético cerrado para favorecer el confinamiento del campo magnético y su propagación en las regiones de espacio que interesen, y así optimizar la fuerza de interacción entre los pistones (5, 6).

La interacción electromagnética se produce entre dos pistones (5, 6) situados uno encima de otro de tal forma que las partes superiores de los núcleos estén enfrentadas entre sí (véase la Figura 4). La unión de las piezas anteriores da como resultado el conjunto cilindro-pistón ubicado en el motor electromagnético sobre el que se realizarán las simulaciones que se detallan más adelante.

Simulación electromagnética y cálculo de fuerza (CAE)

Para llevar a cabo las simulaciones de interacción magnética en el motor de la invención se ha empleado el programa Ansys. El objetivo de estas simulaciones es obtener resultados simulados que consideraremos como “reales” a la hora de compararlos con los resultados obtenidos teóricamente.

Simulación 1: Interacción repulsiva con $\mathcal{F} = 100$ [Av]

En esta primera simulación se plantea el escenario en que la interacción entre los pistones (5, 6) del motor de la invención es repulsiva, eso quiere decir que el sentido en el que circulan las corrientes por cada una de sus bobinas (7, 8) es opuesto. Esto implicará que el campo magnético inducido en cada uno de los segundos prismas (2, 2') o núcleos magnéticos de uno y otro pistón (5, 6) serán también opuestos.

Los parámetros iniciales de esta simulación son:

- Distancia entre pistones (mx): se varía en el rango [0, 100] mm con un incremento de mm.
- Fuerza electromotriz de la bobina del pistón (6) móvil: 100 [Av] (valor fijo).
- Fuerza electromotriz de la bobina del pistón (5) fijo: 100 [Av] (valor fijo).

Las variables que se analizan en la simulación son: el campo magnético generado por las bobinas (7), el flujo magnético producido por las bobinas (7) y la fuerza que sufre el pistón móvil (6).

Para el caso del campo magnético, las simulaciones (véase la Figura 5) muestran que el campo magnético B resultante es completamente simétrico, así que bastará con analizar uno de los pistones (5, 6) para entender la fenomenología de esta simulación.

5 El campo generado por cada bobina (7, 8) es homogéneo en el interior del segundo prisma (2, 2') y al salir de este, se bifurca en dos sentidos hacia el tercer prisma (9) que funciona como recubrimiento y alojamiento de los pistones (5, 6). Esto ocurre porque las líneas de campo no pueden cortarse. Las líneas de campo recorren el recubrimiento y llegan hasta la base de cada pistón (5, 6) cerrando así el circuito magnético.

10

Analizando los valores del campo en cada punto se observan cosas interesantes. Como era previsible, el campo en el interior del segundo prisma (núcleo) será mayor que en el resto del motor. Además, aparecen en las esquinas del núcleo y en el centro superior del mismo, zonas donde el campo no es homogéneo, esto se debe al efecto borde ya que el campo se curva de forma brusca en esos puntos. En el resto de los puntos analizados, el campo magnético es bastante inferior. Cabe destacar que el valor en el tercer prisma (9) es bastante menor que en otros puntos ya que el entrehierro (10) hace que el flujo magnético se reduzca mucho en este punto, y además, el campo magnético tiene que bifurcarse, lo que se traduce en una menor magnitud del mismo.

20

Para calcular el flujo magnético se emplea el programa de simulación Ansys para dibujar una superficie en el interior del segundo prisma (2, 2'), como la que se muestra en la Figura 5B, donde la operación realizada para obtener el flujo magnético Φ es:

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S},$$

25 donde \vec{B} es el campo magnético B y $d\vec{S}$ es un diferencial de superficie normal a cada punto del campo magnético B.

El flujo magnético Φ obtenido es constante a lo largo de todo el circuito magnético, ya que el flujo que pasa por la superficie que atraviesa el segundo prisma (2) es el mismo que el flujo que atraviesa el tercer prisma (9) que sirve de recubrimiento.

30

Por último, se ha analizado la fuerza que sufre el pistón (6) móvil por la interacción

magnética entre los dos pistones (5, 6). El cálculo de esta fuerza repulsiva, para 100 [Av], se ha obtenido como función de la distancia entre pistones (5, 6) tal y como se muestra en la Figura 6. Aunque la fuerza está en mili newtons [mN] y puede parecer una fuerza insignificante, hay que tener en cuenta que los valores del número de vueltas de las bobinas (N) y la corriente (I) también son muy pequeños. Se han elegido estos valores para trabajar en el régimen lineal del ciclo de histéresis, ya que en esta zona la permeabilidad relativa (μ_r) del material se puede considerar como constante. Esto es útil a la hora de hacer cálculos teóricos y compararlos con los resultados simulados. Hay que mencionar también que cuanto mayor es la distancia entre los imanes la fuerza que sufre el pistón irá decreciendo.

Simulación 2: Interacción repulsiva con $\mathcal{F} = 22000$ [Av]

En esta simulación se ha considerado el caso máximo de corriente que se puede aplicar al circuito magnético para ver cuanta sería la fuerza máxima que se puede desarrollar dada la geometría del diseño. Para ello se ha considerado que se está aplicando una fuerza magnetomotriz de $\mathcal{F}=22000$ [Av], que sería el equivalente a hacer pasar una corriente de 25 [A] por una bobina (7) de 880 vueltas. Esto es un valor enorme y ni siquiera podría estar en funcionamiento por más de unos segundos por la gran cantidad de calor que el sistema tendría que disipar, pero servirá para establecer una cota superior.

El valor del campo magnético calculado será de $B= 2.14$ [T] en el interior del núcleo magnético. Tal y como se muestra en la Figura 7, la máxima fuerza generada $F_{\max}= 1094.69$ [N], un valor bastante más notable que el generado en la anterior simulación y que resulta más que suficiente para generar un movimiento de vaivén que mueva un vehículo. El valor del campo magnético B se encuentra en la región de saturación del material para su ciclo de histéresis, eso quiere decir que podemos movernos a través de esa curva hasta buscar el valor máximo del campo magnético B antes de entrar en saturación. De esta manera, aplicando menos corriente podríamos obtener un valor del campo magnético B muy parecido.

También cabe mencionar que esta es la fuerza que sería capaz de desarrollar un único pistón (5, 6). Normalmente, los motores de combustión interna tradicionales tienen cuatro pistones funcionando de manera sincronizada. Por tanto, si queremos desarrollar el mismo valor de la fuerza, podríamos conseguirlo con cuatro pistones (5, 6) y aplicando una cuarta parte de la intensidad.

Simulación 3: Interacción atractiva con $\mathcal{F} = 22000$ [Av]

La otra interacción que se puede encontrar entre los pistones (5, 6) es cuando las corrientes que circulan por las bobinas (7, 8) lo hacen en el mismo sentido. En ese caso los campos magnéticos inducidos en los segundos prismas (2, 2') de cada una de las bobinas (7, 8) no se enfrentan entre sí, sino que se refuerzan el uno al otro, como se muestra en los ejemplos de las Figuras 8 y 9.

Se ha empleado una distancia mínima entre pistones (5, 6) en la simulación de la Figura 8 porque es cuando mejor se aprecia el efecto atractivo y la suma de las contribuciones de ambos segundos prismas (2, 2') o núcleos magnéticos. Como se puede observar el campo magnético es más homogéneo que cuando lo comparamos con el caso repulsivo.

A pesar de que el entrehierro (10) tiene una reluctancia mucho más alta que el tercer prisma (9) o que los segundos prismas (2, 2'), el flujo tiene la intensidad suficiente para pasar a través de él sin cambiar en exceso su trayectoria. Es cierto que justo en el entrehierro (10) se puede observar una tendencia del campo a evitar tomar el camino más corto, ya que busca el camino que menos energía le cueste atravesar, por eso vemos ese efecto de curvatura en el centro.

Otra característica que cabe mencionar es que, si nos fijamos en la curva de fuerza magnética que experimenta el pistón (6) móvil (el inferior de acuerdo con la Figura 9), los valores en cada punto del recorrido son aproximadamente el doble que en el caso repulsivo. Esto confirma lo expuesto anteriormente ambos segundos prismas (2, 2') contribuyen en la generación de flujo.

La Figura 10 representa la fuerza de atracción experimentada por el pistón (6) móvil en varios puntos del recorrido para una fuerza magnetomotriz de $\mathcal{F} = 100$ [Av].

Obtención de resultados teóricos y comparativa con los resultados simulados

Vamos a plantear dos formas distintas de obtener las variables fundamentales del motor, en concreto el flujo magnético y la fuerza que experimenta el pistón (6) móvil o pistón inferior representado en las Figuras. En la primera de ellas se obtendrá estas variables a partir de las reluctancias del circuito magnético, que dependen solo de la geometría del motor. La segunda será a partir de una variable simulada, es decir, tomar una variable de la simulación y considerarla como teórica.

Modelo 1: Cálculos teóricos a partir de hipótesis geométricas

El motor de la invención puede describirse como un circuito magnético equivalente. Esto es posible ya que todos los elementos que componen el motor son susceptibles al flujo magnético, por tener una permeabilidad magnética relativa (μ_r) mayor que cero. En el caso del entrehierro (10) consideraremos que su permeabilidad relativa es similar a la del aire, $\mu_r \approx 1$.

Como se puede representar el motor de la invención como un circuito magnético, se puede analizar según las leyes circuitales, por lo tanto, conociendo las reluctancias (\mathcal{R}) que componen el circuito, podemos conocer con mucha exactitud el resto de las variables. Los objetivos que se pretenden alcanzar con este modelo son los siguientes:

- Definir un circuito equivalente para el motor.
- Calcular las reluctancias que componen el circuito a partir de la geometría del motor.
- Estudiar la reluctancia del entrehierro (10) según varía la distancia entre los pistones.
- Usando leyes circuitales, resolver el circuito, para el caso repulsivo.
- Comparar los resultados obtenidos con los simulados.

Tal y como comentábamos en la simulación atractiva el flujo que obtendremos es el doble que, para el caso repulsivo, y que esto se debe a que es la suma de la contribución de los dos pistones. Tomando esa hipótesis como cierta, únicamente vamos a analizar uno de los pistones, sabiendo que el valor final será la mitad del total.

Viendo las líneas de campo en el entrehierro (10) en el caso repulsivo (véase nuevamente la FIG. 5),

podemos considerar que el espacio se divide en cuatro cilindros (cilindro superior, inferior, derecho e izquierdo) perpendiculares entre sí que son atravesados por las líneas de campo. La visualización es abstracta, pero a nivel circuital es sencillo. El circuito magnético equivalente del motor que se plantea mediante la hipótesis geométrica puede observarse en la Figura 11, en donde las resistencias equivalen a reluctancias de un circuito magnético, y las fuentes de tensión (V_1 , V_2) a fuerzas magnetomotrices de cada una de las bobinas (7, 8): V_1 se corresponde a la bobina inferior (la del pistón (6) móvil) y V_2 a la bobina superior (la del pistón (5) fijo). Las reluctancias de dicho circuito corresponden a los siguientes elementos: \mathcal{R}_1 (segundo

prisma (2) del pistón (5) fijo o pistón superior), \mathcal{R}_2 (entrehierro (10) del cilindro superior), \mathcal{R}_3 (entrehierro (10) del cilindro izquierdo), \mathcal{R}_4 (entrehierro (10) del cilindro derecho), \mathcal{R}_5 (entrehierro (10) del cilindro inferior), \mathcal{R}_6 (segundo prisma (2') magnético del pistón (6) móvil o pistón inferior), y recubrimiento ($\mathcal{R}_7, \mathcal{R}_8, \mathcal{R}_9$ y \mathcal{R}_{10}).

- 5 Como podemos observar el circuito es realmente complejo, y vemos que intervienen los dos pistones (5, 6) en él, si bien solo analizaremos uno de ellos. Afortunadamente, podemos simplificar mucho este circuito si tenemos en cuenta la siguiente consideración: $\mu_{r, \text{aire}} = 1$ y $\mu_{r, \text{hierro}} = 1250$, por lo que se comprueba que la permeabilidad magnética relativa del hierro es mucho mayor que la del aire. Si tenemos en cuenta que
- 10 la permeabilidad magnética relativa y la reluctancia son magnitudes inversamente proporcionales, podemos concluir que $\mathcal{R}_{\text{aire}} \gg \mathcal{R}_{\text{hierro}}$.

Aplicando las consideraciones anteriores, se puede simplificar el circuito magnético tal y como se muestra en la Figura 12, de forma que el problema anterior se reduce al cálculo de las cuatro reluctancias de dicha Figura que representan respectivamente: el

15 entrehierro (10) del cilindro inferior (\mathcal{R}_1), el entrehierro (10) del cilindro izquierdo (\mathcal{R}_2), el entrehierro (10) del cilindro derecho (\mathcal{R}_3) y el entrehierro (10) del cilindro izquierdo (\mathcal{R}_4). Dado que solo nos quedan reluctancias en el entrehierro (10) eso quiere decir que sus valores dependen fundamentalmente de la distancia entre los pistones (5, 6).

El cálculo de cada una de las reluctancias se muestra a continuación.

20 Cálculo de la reluctancia cilíndrica inferior del entrehierro \mathcal{R}_1

La reluctancia se calcula como:

$$\mathcal{R} = \frac{mx}{\mu_r \mu_0 A},$$

- donde mx es la distancia entre pistones, $\mu_{r \text{ aire}} = 1$, la permeabilidad magnética del vacío $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{N}{A^2} \right]$ y el área A es un área circular de radio r , y por tanto, su
- 25 superficie es $A = \pi r^2$.

Tabla 1: Cálculo de la Reluctancia 1.

mx [m]	Radio r [m]	Superficie [m ²]	$\mathcal{R}_1 \left[\frac{Av}{Wb} \right]$
0.001	0.015	$7.07 \cdot 10^{-4}$	$5.63 \cdot 10^5$
0.01	0.015	$7.07 \cdot 10^{-4}$	$5.63 \cdot 10^6$
0.02	0.015	$7.07 \cdot 10^{-4}$	$1.13 \cdot 10^7$
0.03	0.015	$7.07 \cdot 10^{-4}$	$1.69 \cdot 10^7$
0.04	0.015	$7.07 \cdot 10^{-4}$	$2.25 \cdot 10^7$
0.05	0.015	$7.07 \cdot 10^{-4}$	$2.81 \cdot 10^7$
0.06	0.015	$7.07 \cdot 10^{-4}$	$3.38 \cdot 10^7$

0.07	0.015	$7.07 \cdot 10^{-4}$	$3.94 \cdot 10^7$
0.08	0.015	$7.07 \cdot 10^{-4}$	$4.50 \cdot 10^7$
0.09	0.015	$7.07 \cdot 10^{-4}$	$5.07 \cdot 10^7$
0.10	0.015	$7.07 \cdot 10^{-4}$	$5.63 \cdot 10^7$

Cálculo de la reluctancia cilíndrica superior del entrehierro \mathcal{R}_2

Como la geometría de esta reluctancia es igual a la anterior, podemos decir que:

5
$$\mathcal{R}_1 = \mathcal{R}_2$$

Cálculo de la reluctancia cilíndrica derecha del entrehierro \mathcal{R}_3

La reluctancia se calcula de manera con la misma fórmula empleada en el cálculo de \mathcal{R}_1 , pero el radio de este cilindro dependerá de mx de la siguiente forma: $r = mx/2$.

10 Tabla 2: Cálculo de la Reluctancia 3.

mx [m]	Radio r [m]	Superficie [m ²]	$\mathcal{R}_3 \left[\frac{\text{Av}}{\text{Wb}} \right]$
0.001	0.0005	$7.85 \cdot 10^{-7}$	$1.77 \cdot 10^{10}$
0.01	0.005	$7.85 \cdot 10^{-5}$	$1.77 \cdot 10^8$
0.02	0.01	$3.14 \cdot 10^{-4}$	$4.43 \cdot 10^7$
0.03	0.015	$7.07 \cdot 10^{-4}$	$1.97 \cdot 10^7$
0.04	0.02	$1.26 \cdot 10^{-3}$	$1.11 \cdot 10^7$
0.05	0.025	$1.96 \cdot 10^{-3}$	$7.09 \cdot 10^6$
0.06	0.03	$2.83 \cdot 10^{-3}$	$4.93 \cdot 10^6$
0.07	0.035	$3.85 \cdot 10^{-3}$	$3.62 \cdot 10^6$
0.08	0.04	$5.03 \cdot 10^{-3}$	$2.77 \cdot 10^6$
0.09	0.045	$6.36 \cdot 10^{-3}$	$2.19 \cdot 10^6$
0.10	0.05	$7.85 \cdot 10^{-3}$	$1.77 \cdot 10^6$

Cálculo de la reluctancia cilíndrica derecha del entrehierro \mathcal{R}_4

Como la geometría de esta reluctancia es igual a la anterior, podemos decir que:

15
$$\mathcal{R}_3 = \mathcal{R}_4$$

Cálculo de la reluctancia equivalente \mathcal{R}_T

20 Las reluctancias \mathcal{R}_2 , \mathcal{R}_3 y \mathcal{R}_4 están en paralelo, por lo tanto, podemos calcular la reluctancia equivalente \mathcal{R}_T como:

$$\mathcal{R}_T = \mathcal{R}_1 + \frac{1}{\frac{1}{\mathcal{R}_2} + \frac{1}{\mathcal{R}_3} + \frac{1}{\mathcal{R}_4}}$$

El cálculo de estas reluctancias se resume en la Tabla 3.

Tabla 3: Cálculo de la Reluctancia equivalente.

$\mathcal{R}_1 \left[\frac{\text{Av}}{\text{Wb}} \right]$	$\mathcal{R}_2 \left[\frac{\text{Av}}{\text{Wb}} \right]$	$\mathcal{R}_3 \left[\frac{\text{Av}}{\text{Wb}} \right]$	$\mathcal{R}_4 \left[\frac{\text{Av}}{\text{Wb}} \right]$	$\mathcal{R}_T \left[\frac{\text{Av}}{\text{Wb}} \right]$
$5.63 \cdot 10^5$	$5.63 \cdot 10^5$	$1.77 \cdot 10^{10}$	$1.77 \cdot 10^{10}$	$1.13 \cdot 10^6$
$5.63 \cdot 10^6$	$5.63 \cdot 10^6$	$1.77 \cdot 10^8$	$1.77 \cdot 10^8$	$1.09 \cdot 10^7$
$1.13 \cdot 10^7$	$1.13 \cdot 10^7$	$4.43 \cdot 10^7$	$4.43 \cdot 10^7$	$1.87 \cdot 10^7$
$1.69 \cdot 10^7$	$1.69 \cdot 10^7$	$1.97 \cdot 10^7$	$1.97 \cdot 10^7$	$2.31 \cdot 10^7$
$2.25 \cdot 10^7$	$2.25 \cdot 10^7$	$1.11 \cdot 10^7$	$1.11 \cdot 10^7$	$2.70 \cdot 10^7$
$2.81 \cdot 10^7$	$2.81 \cdot 10^7$	$7.09 \cdot 10^6$	$7.09 \cdot 10^6$	$3.13 \cdot 10^7$
$3.38 \cdot 10^7$	$3.38 \cdot 10^7$	$4.93 \cdot 10^6$	$4.93 \cdot 10^6$	$3.61 \cdot 10^7$
$3.94 \cdot 10^7$	$3.94 \cdot 10^7$	$3.62 \cdot 10^6$	$3.62 \cdot 10^6$	$4.11 \cdot 10^7$
$4.50 \cdot 10^7$	$4.50 \cdot 10^7$	$2.77 \cdot 10^6$	$2.77 \cdot 10^6$	$4.64 \cdot 10^7$
$5.07 \cdot 10^7$	$5.07 \cdot 10^7$	$2.19 \cdot 10^6$	$2.19 \cdot 10^6$	$5.17 \cdot 10^7$
$5.63 \cdot 10^7$	$5.63 \cdot 10^7$	$1.77 \cdot 10^6$	$1.77 \cdot 10^6$	$5.72 \cdot 10^7$

- 5 Si nos fijamos en el circuito de la Figura 12, las reluctancias \mathcal{R}_2 , \mathcal{R}_3 y \mathcal{R}_4 se encuentran en paralelo, y todas ellas a su vez están en serie con la reluctancia \mathcal{R}_1 , según la siguiente relación:

$$\mathcal{R}_T = \mathcal{R}_1 + \frac{1}{\frac{1}{\mathcal{R}_2} + \frac{1}{\mathcal{R}_3} + \frac{1}{\mathcal{R}_4}}$$

- Y el circuito quedará simplificado (véase Figura 13), de forma que calcular el flujo magnético ya es completamente trivial, dado que imponemos que la fuerza magnetomotriz se obtiene con la fórmula de la fuerza magnetomotriz $\mathcal{F}=NI$, siendo N el número de vueltas de la bobina e I la intensidad de la corriente eléctrica que circula por la misma. En el caso simulado, $I = 1 \text{ [A]}$ y $N = 100 \text{ [vueltas]}$, por lo que $\mathcal{F}= 100 \text{ [Av]}$. El flujo magnético Φ lo podemos obtener a partir de la ley de Hopkinson:

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_T}$$

- 15 Este flujo podemos considerarlo el flujo total Φ_T (Tabla 4).

Tabla 4: Cálculo del flujo magnético total generado en el circuito magnético equivalente.

$\mathcal{F}[\text{Av}]$	$\mathcal{R}_T \left[\frac{\text{Av}}{\text{Wb}} \right]$	$\Phi_T[\text{Wb}]$
100	$1.13 \cdot 10^6$	$8.88 \cdot 10^{-5}$
100	$1.09 \cdot 10^7$	$9.16 \cdot 10^{-6}$

100	$1.87 \cdot 10^7$	$5.34 \cdot 10^{-6}$
100	$2.31 \cdot 10^7$	$4.33 \cdot 10^{-6}$
100	$2.70 \cdot 10^7$	$3.71 \cdot 10^{-6}$
100	$3.13 \cdot 10^7$	$3.20 \cdot 10^{-6}$
100	$3.61 \cdot 10^7$	$2.77 \cdot 10^{-6}$
100	$4.11 \cdot 10^7$	$2.43 \cdot 10^{-6}$
100	$4.64 \cdot 10^7$	$2.16 \cdot 10^{-6}$
100	$5.17 \cdot 10^7$	$1.93 \cdot 10^{-6}$
100	$5.72 \cdot 10^7$	$1.75 \cdot 10^{-6}$

Una vez obtenido el flujo magnético podemos calcular el resto de las variables del sistema, como la autoinducción (L), la energía magnética (W_m) y por último la fuerza magnética (F_m), todas estas variables se calculan para un recorrido, que representa una distancia entre pistones (mx) determinada:

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}{mx} = \frac{N^2}{\mathcal{R}_T} = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_T} \frac{N}{I} = \Phi \frac{N}{I} \quad (1)$$

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}{mx} I^2 = \frac{1}{2} \Phi NI = \frac{1}{2} LI^2 \quad (2)$$

$$F_m = \frac{1}{2} \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}{mx^2} I^2 = \frac{1}{2} \frac{\Phi NI}{mx} = \frac{W_m}{mx} \quad (3)$$

- 5 Estas fórmulas solo son válidas cuando la intensidad I es constante.

Cálculo de la fuerza magnética del circuito equivalente F_m .

La fuerza magnética se obtiene mediante el siguiente cálculo:

$$F_m = \frac{1}{2} \frac{\Phi \mathcal{F}}{mx}$$

- 10 Aplicando la ecuación anterior, en la Tabla 5 se obtiene la fuerza magnética obtenida en el circuito del motor.

Tabla 5: Cálculo de la fuerza magnética generada en el circuito equivalente

mx [m]	\mathcal{F} [Av]	Φ_T [Wb]	F_m [N]
0.001	100	$8.88 \cdot 10^{-5}$	$4.44 \cdot 10^0$
0.01	100	$9.16 \cdot 10^{-6}$	$4.58 \cdot 10^{-2}$
0.02	100	$5.34 \cdot 10^{-6}$	$1.34 \cdot 10^{-2}$
0.03	100	$4.33 \cdot 10^{-6}$	$7.21 \cdot 10^{-3}$
0.04	100	$3.71 \cdot 10^{-6}$	$4.64 \cdot 10^{-3}$
0.05	100	$3.20 \cdot 10^{-6}$	$3.20 \cdot 10^{-3}$

0.06	100	$2.77 \cdot 10^{-6}$	$2.31 \cdot 10^{-3}$
0.07	100	$2.43 \cdot 10^{-6}$	$1.74 \cdot 10^{-3}$
0.08	100	$2.16 \cdot 10^{-6}$	$1.35 \cdot 10^{-3}$
0.09	100	$1.93 \cdot 10^{-6}$	$1.07 \cdot 10^{-3}$
0.10	100	$1.75 \cdot 10^{-6}$	$8.75 \cdot 10^{-4}$

En general podemos observar que teniendo el flujo podemos obtener la fuerza magnética que se ejerce sobre el pistón (6) móvil. Pero esta no es la energía total que
5 experimentalá el pistón (6), ya que la fuerza total será el doble de la energía magnética:

$$F = F_m + F_{m'} = 2 \cdot \frac{W_m}{mx}$$

Aunque esta sería la fuerza producida por un solo pistón (6), pero como habíamos establecido en la hipótesis inicial, la interacción es entre los dos pistones (5, 6) y sus fuerzas tendrán el mismo módulo.

$$F_T = 2 \cdot F$$

Ya tenemos todos los elementos necesarios para hacer la comparación entre la fuerza
10 teórica (F_T), obtenida por el método de las distintas hipótesis geométricas, y la fuerza simulada (F_S), la cual se muestra en la Tabla 6, junto con los errores relativos.

Tabla 6: Comparación entre la fuerza teórica y la fuerza simulada en el caso de la hipótesis geométrica.

F_T [N]	F_S [N]	Error relativo
$1.78 \cdot 10^1$	$4.83 \cdot 10^{-2}$	99,73%
$1.89 \cdot 10^{-1}$	$3.93 \cdot 10^{-2}$	79,16%
$6.24 \cdot 10^{-2}$	$3.31 \cdot 10^{-2}$	46,95%
$3.80 \cdot 10^{-2}$	$2.71 \cdot 10^{-2}$	28,70%
$2.60 \cdot 10^{-2}$	$2.10 \cdot 10^{-2}$	19,24%
$1.85 \cdot 10^{-2}$	$1.55 \cdot 10^{-2}$	15,91%
$1.35 \cdot 10^{-2}$	$1.15 \cdot 10^{-2}$	15,25%

$1.03 \cdot 10^{-2}$	$7.83 \cdot 10^{-3}$	23,77%
$8.01 \cdot 10^{-3}$	$5.05 \cdot 10^{-3}$	36,93%
$6.40 \cdot 10^{-3}$	$3.41 \cdot 10^{-3}$	46,66%
$5.22 \cdot 10^{-3}$	$2.13 \cdot 10^{-3}$	59,24%

Como se observa también en los resultados mostrados en la Figura 14, donde se comparan la fuerza magnética teórica y la simulada, el error relativo se incrementa conforme más nos alejamos de la mediana, que corresponde a un recorrido de $m_x = 50$ [mm], o lo que es lo mismo, cuando el pistón (6) móvil se encuentra en el punto medio del recorrido. Cuando los pistones (5, 6) están prácticamente pegados, el error relativo aumenta porque estamos haciendo tender la distancia m_x prácticamente a cero.

Modelo 2: Cálculos teóricos con una variable simulada

Este método sigue una metodología distinta al anterior y las hipótesis planteadas cambian totalmente. En la hipótesis geométrica, los pistones (5, 6) se consideraban como dos elementos independientes, y que solo había que tenerlos en cuenta cuando calculábamos la contribución total a la fuerza magnética. Por el contrario, en el modelo de variable simulada, se asume que los pistones interactúan entre sí e influyen en el circuito magnético. Planteamos un nuevo circuito magnético (tal y como se ilustra en la Figura 15), en el que nuevamente las resistencias equivalen a reluctancias de un circuito magnético, y las fuentes de tensión a fuerzas magnetomotrices.

En el circuito de la Figura 15 se agrupan todas las reluctancias que intervienen en el camino magnético de cada pistón (5, 6), siendo \mathcal{R}_I el conjunto de reluctancias asociadas al pistón (6) móvil y \mathcal{R}_S el conjunto de reluctancias asociadas al pistón (5) fijo. Además, introducimos una nueva reluctancia \mathcal{R}_M denominada reluctancia mutua para tener en cuenta fenómenos asociados a la inductancia mutua. En el apartado anterior no hacía falta introducirla porque estaría intrínsecamente calculada si obtenemos los flujos que circulan por cada rama.

Este método no solo cambia en la presentación de un nuevo circuito sino en qué hipótesis planteamos para el estudio del mismo. Como calcular con exactitud las reluctancias del sistema acabó siendo complejo, lo que hacemos es obtener la información a partir de otra variable circuital, en concreto del flujo magnético.

El flujo es una variable que se puede obtener con facilidad cuando simulamos el funcionamiento de nuestro motor, por ello, en este método vamos a considerar que los valores del flujo magnético en el interior del núcleo de los pistones (5, 6) son valores obtenidos teóricamente. Tomando este valor vamos a resolver el circuito planteado y finalmente calcularemos la fuerza magnética que es capaz de desarrollar.

A continuación, se muestran en la Tabla 7 los valores de los flujos magnéticos obtenidos mediante simulación, en el caso repulsivo cuando $\mathcal{F} = 100$ [Av]. Estos flujos son las variables simuladas que consideramos teóricamente válidas.

Tabla 7: Flujos magnéticos simulados en los núcleos de los pistones (5, 6) en función para cada punto del recorrido.

m_x [m]	Φ_I [Wb]	Φ_S [Wb]
0.001	$6.58 \cdot 10^{-5}$	$6.58 \cdot 10^{-5}$
0.01	$6.51 \cdot 10^{-5}$	$6.53 \cdot 10^{-5}$
0.02	$6.52 \cdot 10^{-5}$	$6.48 \cdot 10^{-5}$
0.03	$6.43 \cdot 10^{-5}$	$6.40 \cdot 10^{-5}$
0.04	$6.30 \cdot 10^{-5}$	$6.29 \cdot 10^{-5}$
0.05	$6.16 \cdot 10^{-5}$	$6.12 \cdot 10^{-5}$
0.06	$5.99 \cdot 10^{-5}$	$5.94 \cdot 10^{-5}$
0.07	$5.71 \cdot 10^{-5}$	$5.67 \cdot 10^{-5}$
0.08	$5.37 \cdot 10^{-5}$	$5.34 \cdot 10^{-5}$
0.09	$4.95 \cdot 10^{-5}$	$4.95 \cdot 10^{-5}$
0.10	$4.45 \cdot 10^{-5}$	$4.45 \cdot 10^{-5}$

Las ecuaciones de malla para este circuito serán:

$$\begin{aligned}
 \text{Malla 1} \quad & -\mathcal{F} + \mathcal{R}_I \Phi_1 + \mathcal{R}_M(\Phi_1 - \Phi_2) = 0 \\
 \text{Malla 2} \quad & -\mathcal{F} + \mathcal{R}_S \Phi_2 + \mathcal{R}_M(\Phi_2 - \Phi_1) = 0 \quad \rightarrow \\
 \text{Malla 1} \quad & \mathcal{R}_M(\Phi_1 - \Phi_2) = \mathcal{F} - \mathcal{R}_I \Phi_1 \\
 \text{Malla 2} \quad & \mathcal{R}_M(\Phi_2 - \Phi_1) = \mathcal{F} - \mathcal{R}_S \Phi_2
 \end{aligned}$$

Si añadimos las siguientes ecuaciones de ligadura obtenemos que:

$$\begin{aligned}
 \Phi_1 &= \Phi_I \\
 \Phi_2 &= \Phi_S \\
 \Phi_I &\approx \Phi_S
 \end{aligned}$$

Por lo tanto, el término $(\Phi_1 - \Phi_2)$ se anula, dando como resultado las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \text{Malla 1} \quad \mathcal{F} &= \mathcal{R}_I \Phi_1 \\ \text{Malla 2} \quad \mathcal{F} &= \mathcal{R}_S \Phi_2 \end{aligned}$$

- 5 Eso quiere decir que en el caso repulsivo no tendremos inductancia mutua y el flujo que atraviesa esa reluctancia es nulo. Esto coincide con la hipótesis formulada en el apartado anterior de que cada pistón tenía su circuito magnético asociado y que eran independientes el uno del otro.

Recordamos que todo lo mencionado anteriormente es para el caso repulsivo y que todo este análisis cambiará para el caso atractivo.

- 10 Podríamos calcular el valor de cada reluctancia, pero ese dato no es relevante para obtener nuestro objetivo, que es obtener la fuerza magnética. Según las ecuaciones:

$$dW_m = \mathcal{F}d\Phi ; W_m = \frac{1}{2}\mathcal{F}\Phi ; f = + \left[\frac{\partial W_m}{\partial x} \right]_{I=\text{cte}}$$

podemos calcular la fuerza, asumiendo I como constante ($I=\text{cte}$), como:

$$F = \frac{1}{2}\mathcal{F} \left[\frac{d\Phi(x)}{dx} \right]_{I=\text{cte}}$$

- 15 Esto quiere decir que si somos capaces de expresar el flujo como una función de la posición podremos calcular la fuerza, todo ello asumiendo I constante. Para ello lo que haremos será hacer una regresión polinómica de la función Φ_I , obteniendo el siguiente polinomio, $\Phi(x) = -0.0164x^3 - 0.0002x^2 - 3 \cdot 10^{-5}x + 7 \cdot 10^{-5}$, cuya derivada es: $\frac{d\Phi(x)}{dx} = -0.0492x^2 - 0.0004x - 3 \cdot 10^{-5}$. Calcularemos la fuerza generada por el pistón (6) móvil a partir de esta derivada y de los puntos seleccionados en el recorrido (mx), tal
- 20 y como se recoge en la Tabla 8.

Tabla 8: Fuerza generada por el pistón (6) móvil para ciertos valores del recorrido mx .

mx [m]	F_I [N]
0.001	$1.50 \cdot 10^{-3}$
0.01	$1.94 \cdot 10^{-3}$
0.02	$2.89 \cdot 10^{-3}$
0.03	$4.33 \cdot 10^{-3}$
0.04	$6.26 \cdot 10^{-3}$

0.05	$8.69 \cdot 10^{-3}$
0.06	$1.11 \cdot 10^{-2}$
0.07	$1.50 \cdot 10^{-2}$
0.08	$1.89 \cdot 10^{-2}$
0.09	$2.33 \cdot 10^{-2}$
0.10	$2.82 \cdot 10^{-2}$

Se puede repetir el proceso para el pistón (5) fijo (pistón superior), su curva de regresión está determinada por el polinomio: $\Phi(x) = -0.015x^3 - 0.0002x^2 - 4 \cdot 10^{-5}x + 7 \cdot 10^{-5}$,

cuya derivada es: $\frac{d\Phi(x)}{dx} = -0.045x^2 - 0.0004x - 4 \cdot 10^{-5}$. Calcularemos la fuerza a

5 partir de esta derivada y de los puntos seleccionados en el recorrido, tal y como se resume en la Tabla 9.

Tabla 9: Fuerza generada por el pistón (5) fijo para ciertos valores del recorrido mx.

mx [m]	F_S [N]
0.001	$2.00 \cdot 10^{-3}$
0.01	$2.43 \cdot 10^{-3}$
0.02	$3.31 \cdot 10^{-3}$
0.03	$4.65 \cdot 10^{-3}$
0.04	$6.45 \cdot 10^{-3}$
0.05	$8.70 \cdot 10^{-3}$
0.06	$1.14 \cdot 10^{-2}$
0.07	$1.45 \cdot 10^{-2}$
0.08	$1.81 \cdot 10^{-2}$
0.09	$2.22 \cdot 10^{-2}$
0.10	$2.68 \cdot 10^{-2}$

De forma que la fuerza total F_T que se ejerce será la suma de dos fuerzas: la fuerza F_I generada por el pistón móvil (6) o pistón inferior, y la fuerza F_S generada por el pistón (5) fijo o superior, y por lo tanto, $F_T = F_I + F_S$.

Ya que tenemos el valor de la fuerza total F_T , estamos en disposición de hacer la comparación entre la fuerza teórica y la fuerza simulada (Figura 17). De la misma forma que antes podemos ver el error relativo en la siguiente Tabla 10.

Tabla 10: Fuerza total obtenida por el método de la variable simulada.

F_I [N]	F_S [N]	F_T [N]
$1.50 \cdot 10^{-3}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	$3.50 \cdot 10^{-3}$
$1.94 \cdot 10^{-3}$	$2.43 \cdot 10^{-3}$	$4.38 \cdot 10^{-3}$
$2.89 \cdot 10^{-3}$	$3.31 \cdot 10^{-3}$	$6.20 \cdot 10^{-3}$
$4.33 \cdot 10^{-3}$	$4.65 \cdot 10^{-3}$	$8.98 \cdot 10^{-3}$

$6.26 \cdot 10^{-3}$	$6.45 \cdot 10^{-3}$	$1.27 \cdot 10^{-2}$
$8.69 \cdot 10^{-3}$	$8.70 \cdot 10^{-3}$	$1.73 \cdot 10^{-2}$
$1.11 \cdot 10^{-2}$	$1.14 \cdot 10^{-2}$	$2.23 \cdot 10^{-2}$
$1.50 \cdot 10^{-2}$	$1.45 \cdot 10^{-2}$	$2.96 \cdot 10^{-2}$
$1.89 \cdot 10^{-2}$	$1.81 \cdot 10^{-2}$	$3.71 \cdot 10^{-2}$
$2.33 \cdot 10^{-2}$	$2.22 \cdot 10^{-2}$	$4.56 \cdot 10^{-2}$
$2.82 \cdot 10^{-2}$	$2.68 \cdot 10^{-2}$	$5.50 \cdot 10^{-2}$

Como podemos observar el error relativo es más bajo conforme nos alejamos de la posición en la que los pistones están más pegados (mx tendiendo a 0), complicando los cálculos para algunas variables que dependen de la posición.

- 5 El error relativo es mucho más bajo que el calculado por el anterior modelo de hipótesis geométricas, aportando así más solidez a la hora de hacer futuras iteraciones del proyecto. Pero lo realmente importante es que los órdenes de magnitud son iguales entre la fuerza teórica y la simulada, probando así que este modelo es útil y viable.

10 Tabla 11: Comparación entre la fuerza teórica y la fuerza simulada en el caso de la variable simulada.

$F_T [N]$	$F_S [N]$	Error relativo
$5.50 \cdot 10^{-2}$	$4.83 \cdot 10^{-2}$	13,87 %
$4.56 \cdot 10^{-2}$	$3.93 \cdot 10^{-2}$	16,03 %
$3.71 \cdot 10^{-2}$	$3.31 \cdot 10^{-2}$	12,08 %
$2.96 \cdot 10^{-2}$	$2.71 \cdot 10^{-2}$	9,23 %
$2.23 \cdot 10^{-2}$	$2.10 \cdot 10^{-2}$	6,19 %
$1.73 \cdot 10^{-2}$	$1.55 \cdot 10^{-2}$	11,61 %
$1.27 \cdot 10^{-2}$	$1.15 \cdot 10^{-2}$	10,43 %
$8.98 \cdot 10^{-3}$	$7.83 \cdot 10^{-3}$	14,69 %
$6.20 \cdot 10^{-3}$	$5.05 \cdot 10^{-3}$	22,77 %
$4.38 \cdot 10^{-3}$	$3.41 \cdot 10^{-3}$	28,45 %
$3.50 \cdot 10^{-3}$	$2.13 \cdot 10^{-3}$	64,32 %

Conclusiones

- 20 El objetivo de este documento ha sido demostrar que un modelo de motor eléctrico basado en un sistema de electroimanes, actuando como pistones (5, 6), es viable en una primera aproximación teórica. Este objetivo se ha cumplido satisfactoriamente tal y como muestran los resultados, al proporcionar valores de intensidad, y por lo tanto, de potencia, usuales en la industria es posible desarrollar mucha fuerza de torsión. Esta es la principal ventaja competitiva y demuestra su polivalencia para muchos sectores: industrial, agrónomo, aeronáutico, automovilismo, etc.

El proceso de diseño por ordenador (CAD), y simulación de la invención, no solo ha dado forma y validez a las hipótesis de partida, sino que ha ahorrado costes de iteración en la construcción (CAM) del prototipo final. Los resultados obtenidos para la comparación de los modelos teóricos y simulaciones y la simulación del camino magnético demuestran que el funcionamiento del motor es posible.

5

REIVINDICACIONES

1.- Pistón (5, 6) para motor **caracterizado por que** comprende:

5 - un primer prisma (1) recto cuyo interior está parcialmente hueco y que está dispuesto a lo largo de un eje (3, 4) longitudinal; estando dicho primer prisma (1) fabricado de material de alta permeabilidad magnética y alta saturación;

- un segundo prisma (2) recto fabricado de material de alta permeabilidad magnética y alta saturación, estando dicho segundo prisma (2) alojado en el hueco definido por el primer prisma (1) y alineado con el eje (3, 4) longitudinal;

10 - una bobina (7, 8) de hilo de material conductor devanada alrededor del segundo prisma (2); y

- medios de alimentación conectados a la bobina (7, 8) y adaptados para proporcionar una señal eléctrica a dicha bobina (7, 8), donde dicha señal eléctrica controla la intensidad y la polarización de la corriente que circula en la bobina (7, 8).

15

2.- Pistón (5, 6) para motor, según la reivindicación anterior, **caracterizado por que** el material de alta permeabilidad magnética y alta saturación con el que se fabrican los prismas (1, 2) comprende un material ferromagnético, preferentemente seleccionado del grupo formado por: hierro, acero de silicio, acero amorfo, acero al carbono y cerámica de ferrita.

20

3.- Pistón (5, 6) para motor, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que los prismas (1, 2) rectos son cilindros rectos.

25 4.- Pistón (5, 6) para motor, según reivindicación anterior, donde las dimensiones de los cilindros están comprendidas entre los siguientes valores: el radio exterior del primer cilindro está comprendido en el intervalo [32.5, 325] mm, el radio interior del primer cilindro está comprendido en el intervalo [30, 300] mm, la altura del primer cilindro pertenece al intervalo [55, 1450] mm, el radio exterior del segundo cilindro pertenece al intervalo [15, 150] mm y la altura del segundo cilindro está comprendida en el intervalo [30, 1200] mm.

30

5.- Dispositivo para su uso en un motor, **caracterizado por que** comprende:

- uno o más pistones (5, 6) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, alineados a lo largo del eje longitudinal (3, 4);

- un tercer prisma (9) recto y hueco que aloja a los pistones (5, 6) y que está alineado con el eje (3, 4) longitudinal de dichos pistones (5, 6), donde dicho tercer prisma (9) dispone de unas dimensiones aptas para que los pistones (5, 6) puedan desplazarse en su interior a lo largo de dicho eje (3, 4) longitudinal; y

- sistema de control configurados para controlar la alimentación eléctrica de los pistones (5, 6) y configurar selectivamente la intensidad y polarización de la corriente eléctrica que circula por las bobinas (7, 8), donde la variación de dicha corriente eléctrica provoca movimientos de atracción y repulsión magnética entre dichos pistones (5, 6).

6.- Dispositivo para su uso en un motor, según la reivindicación anterior, que comprende dos pistones (5, 6) según cualquiera de las reivindicaciones 1-4; que comprende una biela (11) y donde al menos uno de los pistones (5, 6) comprende medios de interconexión para su conexión a dicha biela (11).

7.- Dispositivo para su uso en un motor según la reivindicación anterior, **caracterizado por que** uno de los pistones es un pistón (5) fijo que está fijado a una de las bases del tercer prisma (9) recto y hueco que lo contiene en su interior, mientras que el segundo pistón es un pistón (6) móvil que comprende medios de interconexión para conectarlo a la biela (11).

8.- Dispositivo para su uso en un motor según cualquiera de las reivindicaciones 5-7, donde el tercer prisma (9) y los pistones (5, 6) forman un conjunto conexo y están conectados físicamente al menos por un punto de contacto, estando dicho dispositivo configurado como un sistema magnético cerrado, de forma que mantenga el confinamiento y el campo magnético en su interior.

9.- Dispositivo para su uso en un motor según cualquiera de las reivindicaciones 5-8, donde el tercer prisma (9) comprende un material de alta permeabilidad magnética y

alta saturación, preferentemente al menos un material ferromagnético seleccionado del conjunto formado por: hierro, acero de silicio, acero amorfo, acero al carbono o cerámica de ferrita.

- 5 10.- Motor que comprende al menos un pistón (5, 6) según cualquiera de las reivindicaciones 1- 4 o un dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 5-9.

11.- Motor según la reivindicación anterior que comprende:

- 10 - el dispositivo de las reivindicaciones 7-9, donde los medios de alimentación comprenden una o varias fuentes de corriente continua o alterna conectadas a las bobinas (7, 8);
- un bloque motor, que comprende a los pistones (5, 6), y está adaptado para mantener la posición relativa entre el tercer prisma (9) y el eje (12') del cigüeñal (12);
- 15 - un cigüeñal (12) conectado a la biela (11), estando adaptada dicha biela (11) para transformar el movimiento lineal de los pistones (5, 6) en un movimiento de rotación en el cigüeñal (12); y
- un volante de inercia (13) conectado al cigüeñal (12), estando adaptado dicho cigüeñal (12) para transmitir el movimiento de rotación a dicho volante de inercia (13).

- 20 12.- Procedimiento para controlar el movimiento de dos pistones (5, 6) comprendidos en un dispositivo según reivindicaciones 7-9, que comprende:

- mediante los medios de alimentación, aplicar una corriente eléctrica a las bobinas (7, 8) de cada pistón (5, 6); y
- 25 - mediante el sistema de control, aplicar una señal eléctrica para controlar la intensidad y la polarización de la corriente eléctrica suministrada a dichas bobinas (7, 8) en función de la distancia de separación y la dirección de movimiento relativo entre dichos pistones (5, 6), y así inducir interacciones magnéticas entre los pistones para controlar el movimiento de dichos pistones (5, 6).

13.- Procedimiento según reivindicación anterior, donde el funcionamiento del sistema de control comprende la realización de los siguientes pasos:

- definir una pluralidad de valores umbrales 1 a 4 en función de la eficiencia y geometría del dispositivo;

5 - medir la distancia de separación de los pistones (5, 6) y la dirección del movimiento relativo entre dichos pistones (5, 6);

- según la dirección del movimiento relativo entre los pistones (5, 6), escoger alternativamente uno de los siguientes cursos de acción:

a) si los pistones (5, 6) se están alejando entre sí:

10 - si la distancia de separación de los pistones (5, 6) alcanza un valor umbral 1, se envía mediante el sistema de control una señal eléctrica a cada pistón (5, 6) de forma que la intensidad que circule por sus bobinas (7, 8) provoque la repulsión magnética entre dichos pistones (5, 6);

15 - si la separación de los pistones (5, 6) alcanza un valor umbral 2, se envía mediante el sistema de control una orden de desconexión de la señal eléctrica de alimentación de las bobinas (7, 8);

b) si los pistones (5, 6) se están acercando entre sí:

20 - si la distancia de separación de los pistones (5, 6) alcanza un valor umbral 3, se envía mediante el sistema de control una señal eléctrica a cada pistón (5, 6) de forma que la intensidad que circule por sus bobinas (7, 8) provoque la atracción magnética entre dichos pistones (5, 6);

 - si la separación de los pistones (5, 6) alcanza un valor umbral 4, se envía mediante el sistema de control una orden de desconexión de la señal eléctrica de alimentación de las bobinas (7, 8).

25

14.- Máquina o vehículo que son accionados total o parcialmente por el motor según las reivindicaciones 10-11.

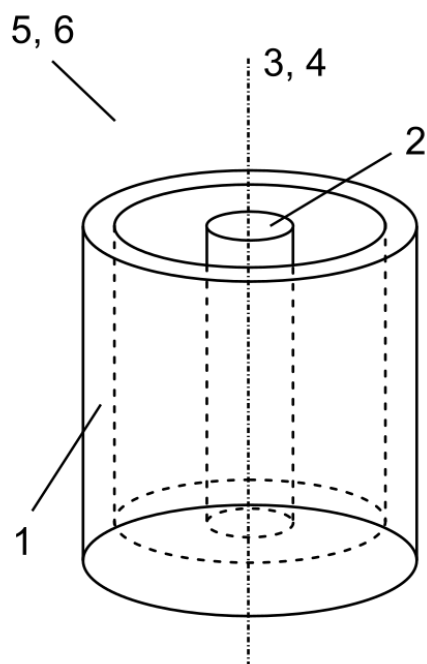


FIG. 1

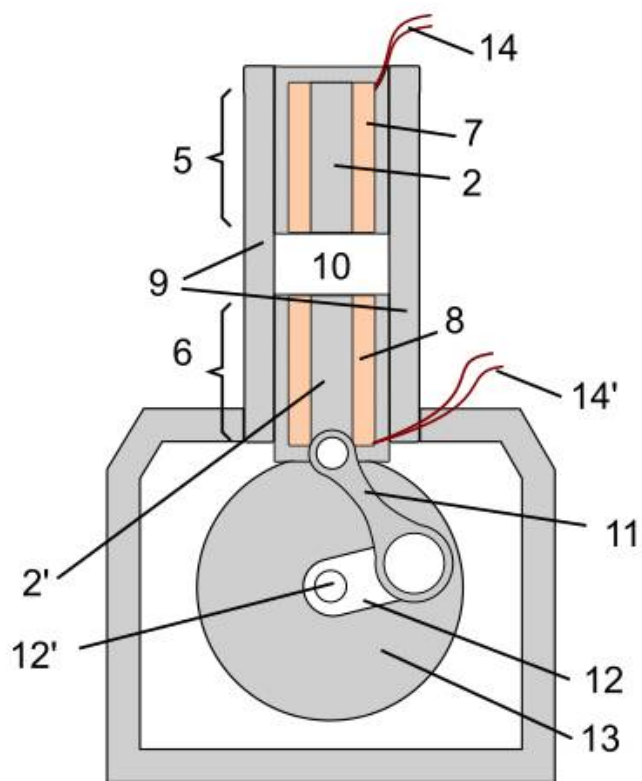


FIG. 2

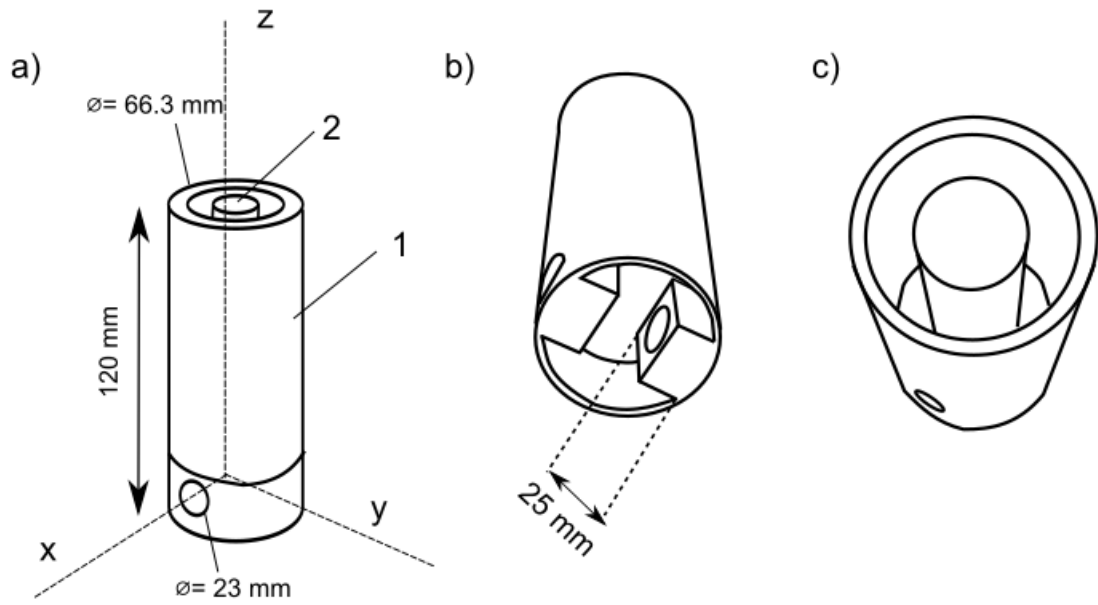


FIG. 3

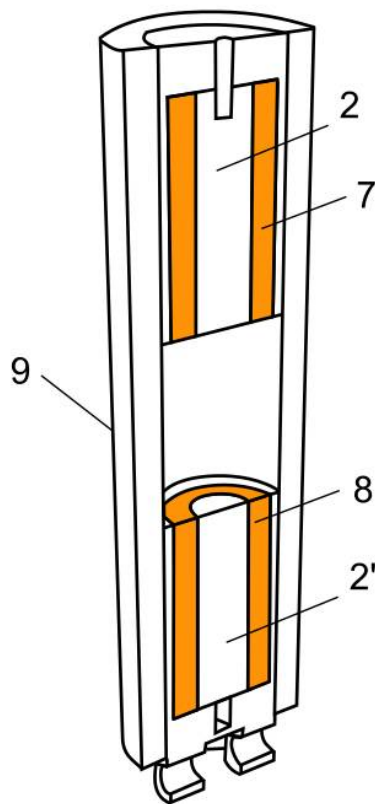


FIG. 4

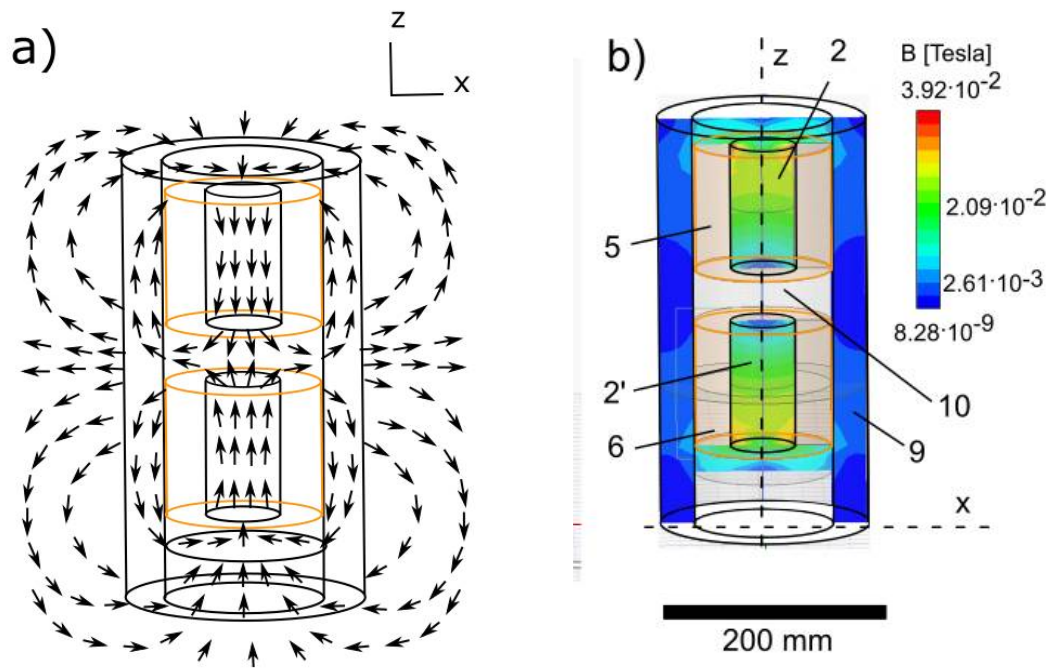


FIG. 5

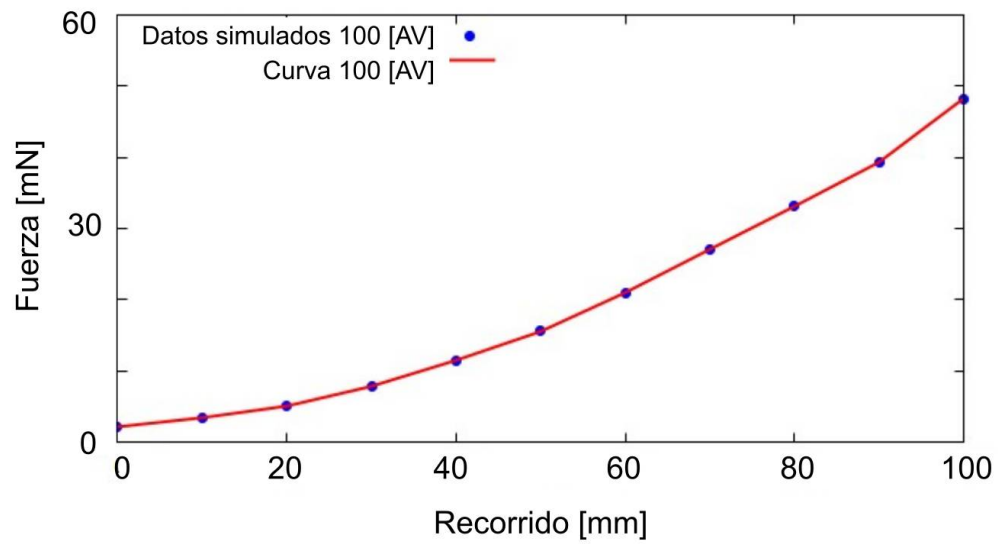


FIG. 6

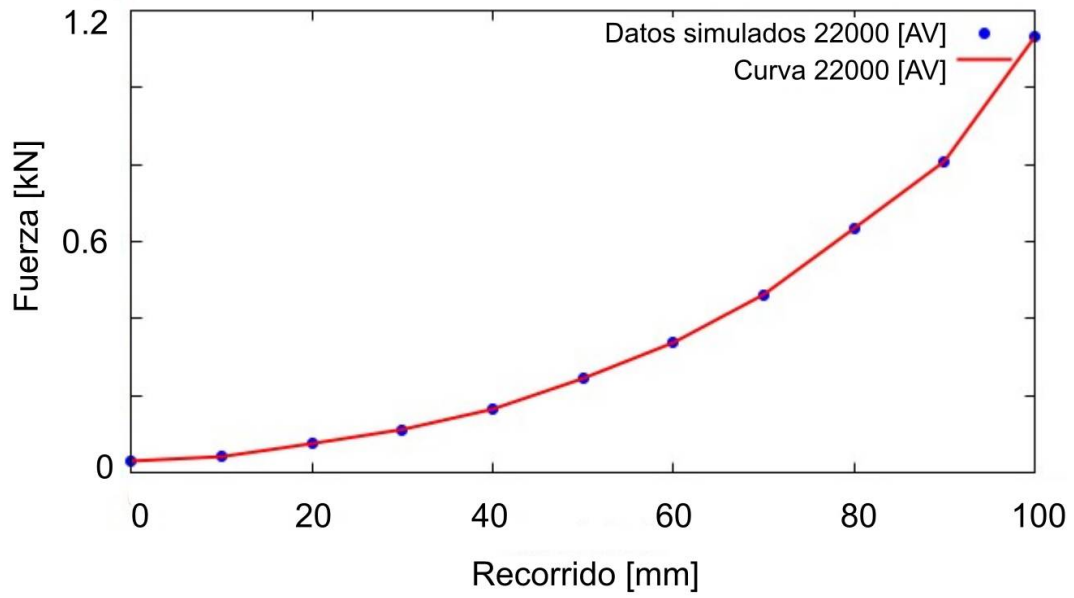


FIG. 7

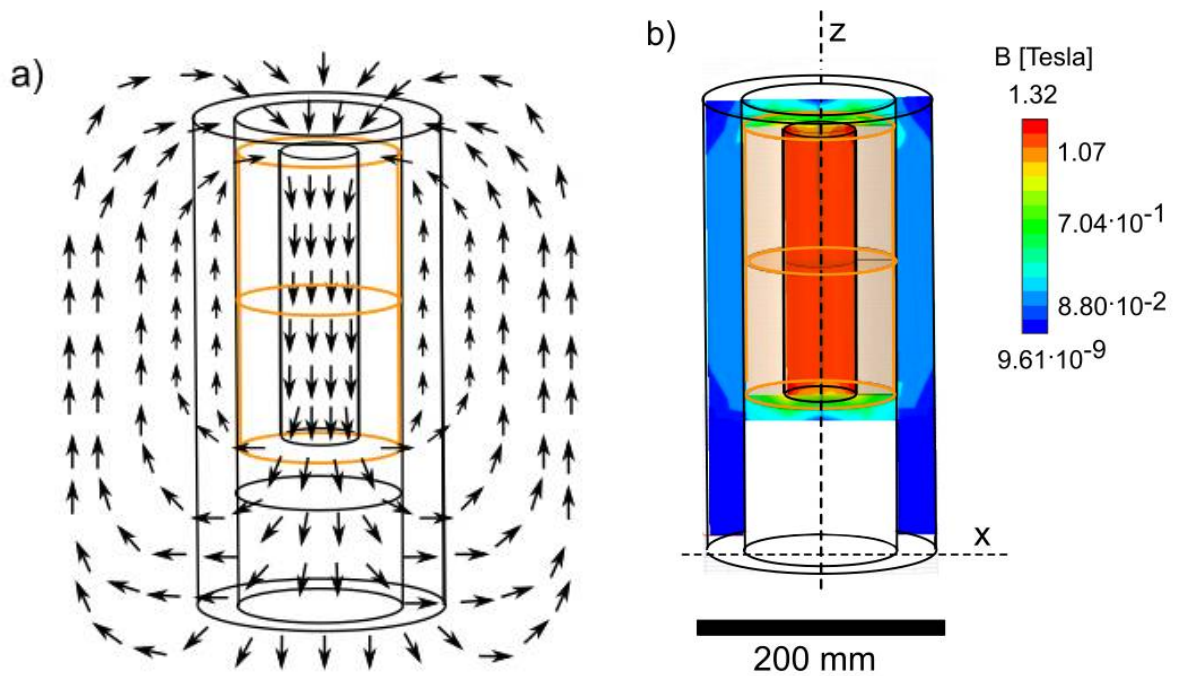


FIG. 8

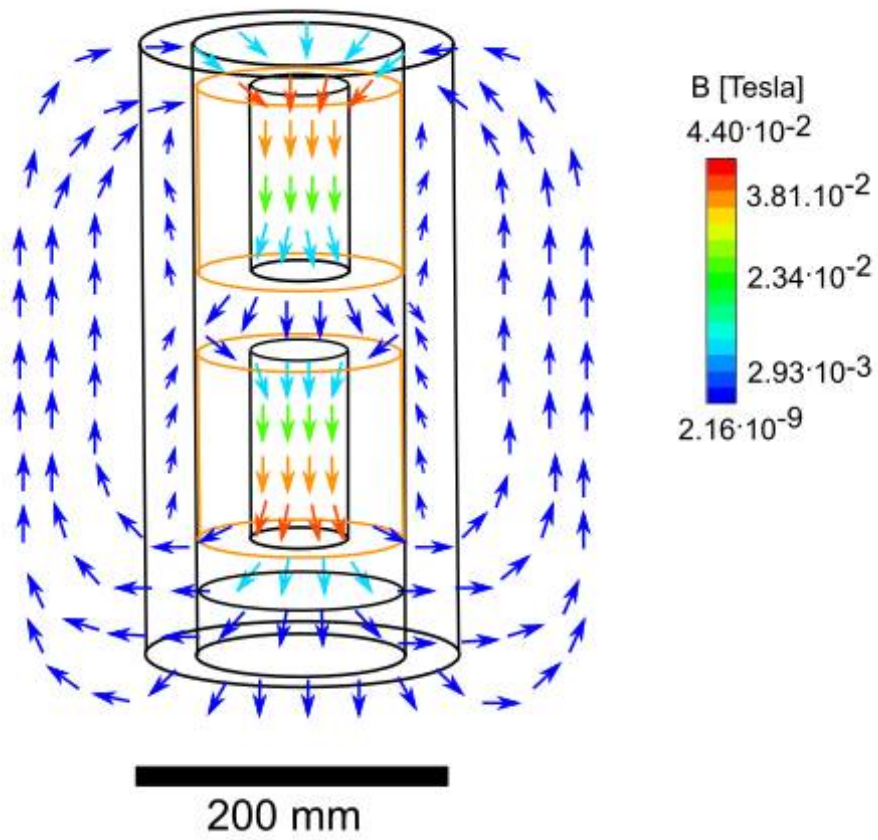


FIG. 9

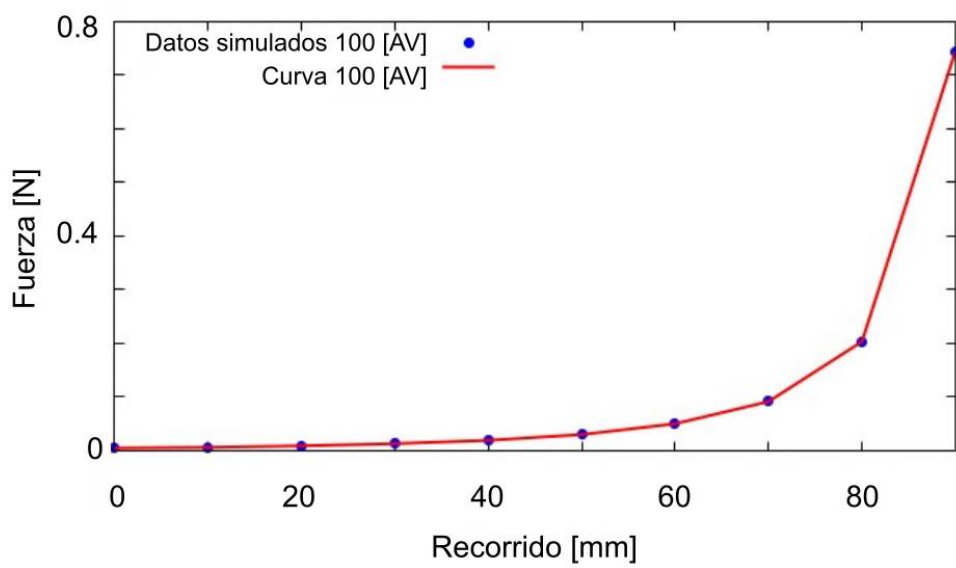


FIG. 10

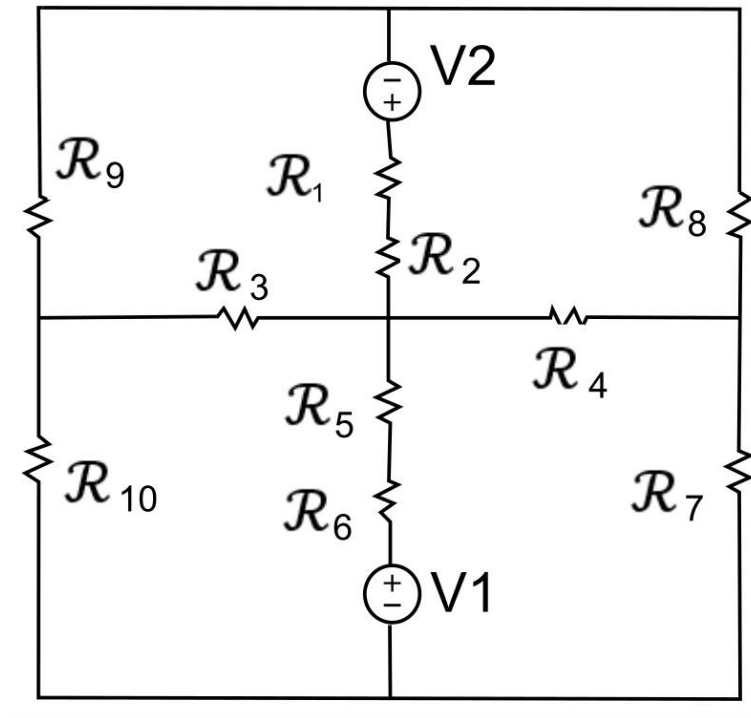


FIG. 11

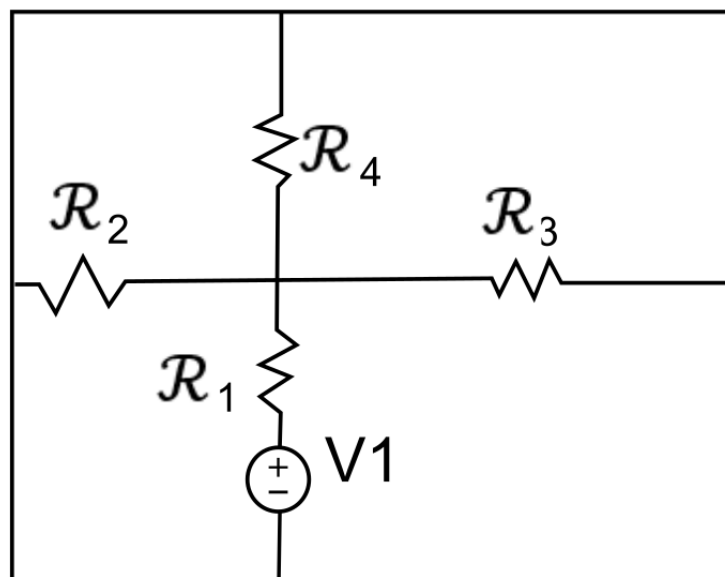


FIG. 12

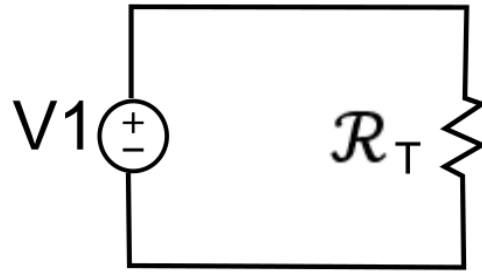


FIG. 13

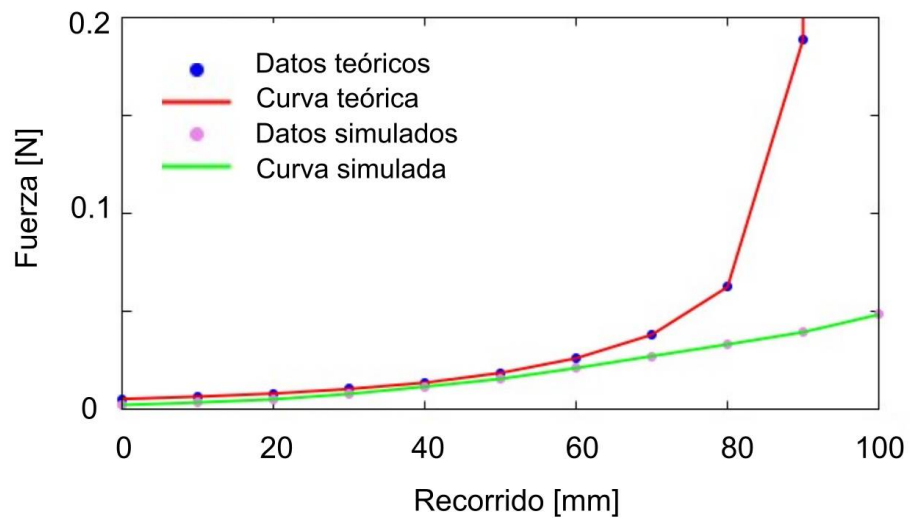


FIG. 14

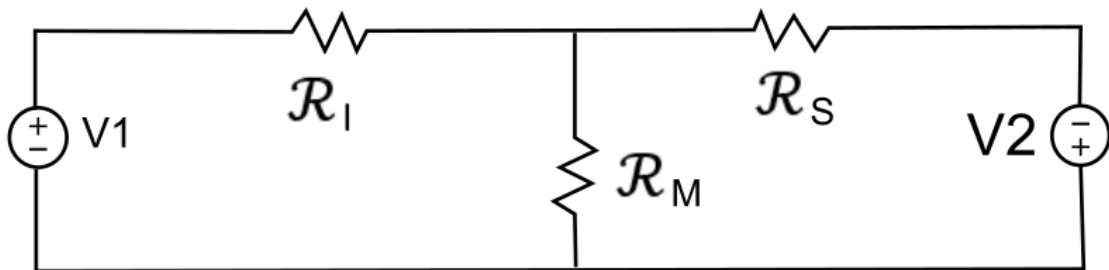


FIG. 15

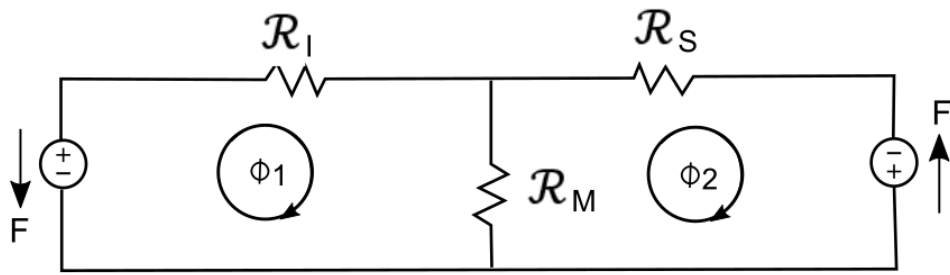


FIG. 16

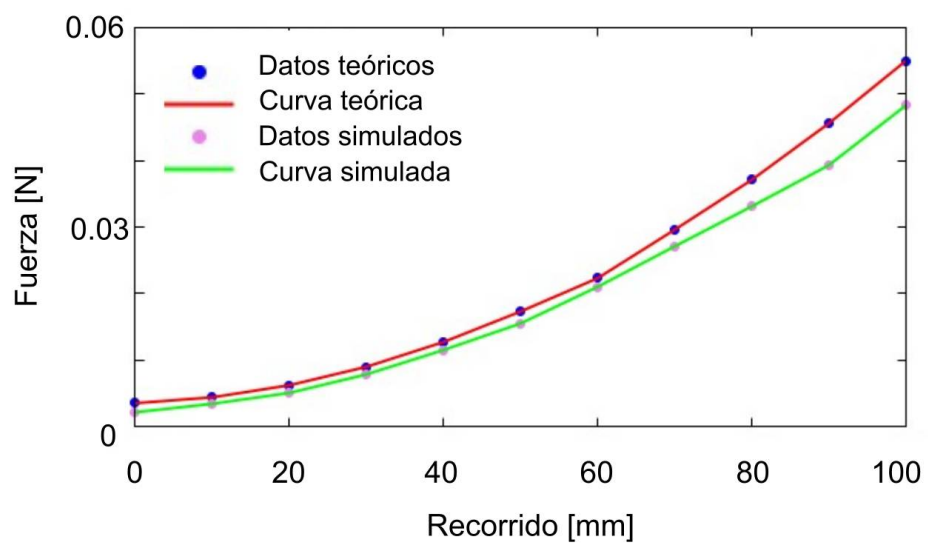


FIG. 17



- ②① N.º solicitud: 202130790
②② Fecha de presentación de la solicitud: 12.08.2021
③② Fecha de prioridad: **20-07-2021**

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤① Int. Cl.: **H02K33/16** (2006.01)
H02K7/075 (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X	US 6049146 A (TAKARA MUNEAKI) 11/04/2000, columna 1, línea 1 - columna 18, línea 17; figuras 1 - 25.	1-14
X	US 2012007448 A1 (GOSVENER KENDALL C) 12/01/2012, párrafos [1 - 62]; figuras 1 - 16.	1-5,8-10,12,14
A	JP S5734762 A (SOTODATE HIROSHI) 25/02/1982, Todo el documento; figuras 1-16.	1-14
A	US 2015247548 A1 (BATTLOGG STEFAN et al.) 03/09/2015, párrafos [81 - 134]; figuras 1 - 7.	1-14
A	US 2012098357 A1 (HUNSTABLE FRED E) 26/04/2012, párrafos [21 - 128]; figuras 1 - 7.	1-14

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

☒ para todas las reivindicaciones

☐ para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe
17.03.2022

Examinador
O. Fernández Iglesias

Página
1/2

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

H02K

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC