
Espira G como Metamorfosis del Disco de Faraday

Carles R Paul¹, Ricard Bosh², Albert Serra³, Jose Lopez⁴

¹Departamento de Ingeniería, ESUP, Mataró. mail:paul@tecnocampus.cat

²Departamento de Ingeniería Eléctrica (ETSEIB. mail: ricard.bosch@upc.edu

³Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes.

⁴Departamento de Física (EEBE). mail:josep.lopez-lopez@upc.edu

Abstract

Se ha diseñado y construido un nuevo experimento sobre la inducción unipolar modificando topológicamente la estructura del disco de Faraday. La metamorfosis consiste en la sustitución del imán por un solenoide, con el mismo eje de rotación que el disco, y conectado en serie con un conductor radial, que sustituye al disco. A esta forma resultante se le ha denominado Espira G, por la forma parecida a la letra G que forma el dispositivo. Con este experimento se demuestra la viabilidad de una nueva máquina eléctrica que funciona como motor sin necesidad de ningún campo magnético externo. Trabajando en bajas tensiones y altas intensidades.

Keywords: Disco de Aragó, disco de Faraday, Espira G, Paradoja de Faraday

1 Introducción al disco de Faraday

En *Experimental Researches in Electricity*¹ de enero de 1832, Michael Faraday daba a conocer el que sería el generador de corriente continua más simple construido, el disco de Faraday. La idea se le ocurrió en 1831, a partir de una modificación o metamorfosis del disco de Aragó. Francesc Aragó en 1824 descubrió que un disco de cobre, en rotación sobre su eje de simetría, producía efectos magnéticos². El disco de Faraday consta de un disco de cobre o un material conductor, que puede rotar respecto de su eje de simetría y de manera que se encuentre próximo a uno de los polos de un imán cilíndrico, véase la figura 1.1. Se realiza una conexión mediante un circuito eléctrico estático, entre el eje y la periferia del disco en rotación, utilizando un contacto deslizante. Se observa que cuando el disco gira respecto el imán, aparece una corriente continua en el circuito y si se invierte el sentido de giro también se invierte el sentido de la corriente generada. Ocurre la misma inversión si se cambia la polaridad del imán.

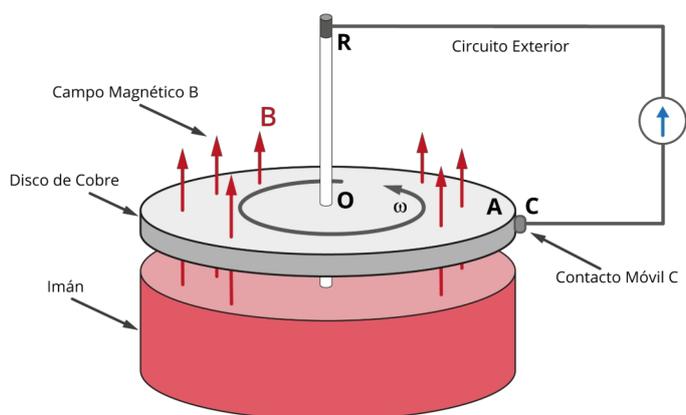


Figura 1.1: Esquema del disco de Faraday o Generador Homopolar.

Conviene subrayar que todos los componentes de este experimento giran simétricamente alrededor del eje de giro del disco. Esta rotación simétrica es un detalle fundamental sobre el movimiento de rotación relativo entre el disco de cobre y el imán cilíndrico. Esta disposición

entre el disco y el imán recibe el nombre de generador unipolar o generador homopolar, debido a que en esta configuración la inducción electromagnética se produce a través de un solo polo del imán. Se caracteriza también como caso particular de generador de corriente continua, donde no existe una conmutación o alternancia de polos magnéticos necesaria para generar electricidad.

Conforme a la geometría entre el disco de cobre y el imán, caben cuatro posibilidades de movimiento relativo entre ellos. Faraday se dio cuenta de estos cuatro movimientos relativos y diseñó la manera de realizar los distintos experimentos, los cuales hemos enumerado de la siguiente manera.

Experimento 1: El disco gira mientras el imán se mantiene en reposo.

Experimento 2: El disco se mantiene en reposo y el imán gira

Experimento 3: El disco gira solidariamente con el imán.

Experimento 4: Gira solamente el imán, sin el disco.

En la siguiente tabla 1, se muestran agrupados los resultados obtenidos por Faraday a lo largo de todos sus experimentos realizados con el movimiento relativo entre el disco y el imán. Se indica los resultados obtenidos a partir del movimiento relativo entre el disco y el imán y su consecuencia en la generación de corriente inducida, observada en el galvanómetro, según sea el tipo de movimiento relativo.

Tabla 1: Resultados de los experimentos realizados por Michael Faraday

Experimento	Disco	Imán	Corriente
1	Gira	Estático	SI
2	Estático	Gira	NO
3	Gira	Gira	SI
4	Sin Disco	Gira	SI

Veamos con detalle estos experimentos.

1) **Primer experimento:** Rotación del disco manteniendo el imán estático

En este primer experimento entre el disco de cobre y el imán, se mantiene el imán estático mientras el disco gira, según se indica en la figura 1.2. Se obtiene como resultado una corriente continua, que circula en el conductor que une el contacto móvil en el disco de cobre y el contacto en el centro del eje de rotación del disco.

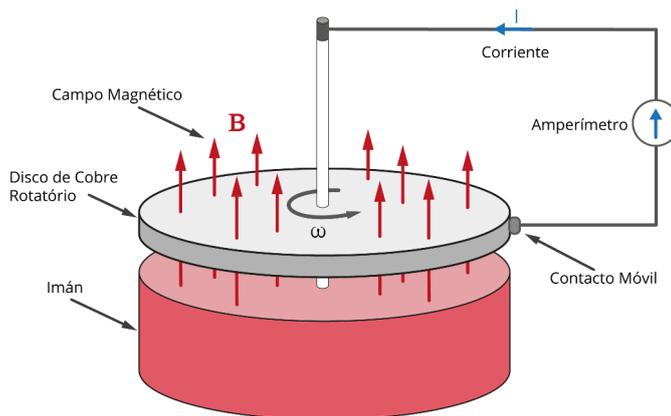


Figura 1.2: Esquema del primer experimento con el disco de Faraday

2) Segundo experimento: Rotación del imán manteniendo el disco estático

En este segundo experimento se mantiene estático el disco mientras gira el imán, según se indica en la figura 1.3. En principio, el sistema es equivalente al primer experimento, dado que también se obtiene una velocidad relativa entre el disco y el imán. Sin embargo, el resultado es totalmente negativo, no se genera corriente. Este resultado nos lleva a deducir que el segundo experimento no es equivalente al primero. Descubramos con más detalle cuál es la diferencia. Es evidente que no se puede generar corriente en esta configuración dinámica entre el disco y el imán, pues no se cumpliría el segundo principio de la termodinámica.

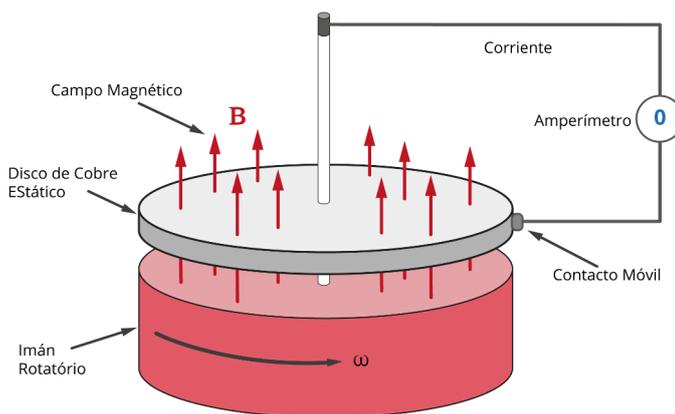


Figura 1.3: Esquema del segundo experimento con el disco de Faraday

Si imaginamos el disco de Faraday en el vacío, donde el imán pueda girar sin rozamiento alguno, el imán giraría eternamente a partir de un impulso inicial. De esta manera se generaría energía a través del circuito, en forma de corriente eléctrica, sin ninguna fuerza externa aplicada.

Fijémonos en un detalle imprescindible, en este segundo experimento los contactos eléctricos entre el disco y el circuito no son móviles, son estáticos.

Otra manera de visualizar el resultado nulo de este experimento es como intentó resolverlo Faraday. Para él, las líneas de campo magnético no giraban con el imán, es decir, las líneas de campo magnético se mantienen estacionarias cuando el imán está girando. Así pues, entonces la ley de Faraday sobre la inducción electromagnética debida a la variación de flujo no se cumple. En este caso no se producía variación en el flujo magnético y, sin embargo, aparece una corriente inducida. Esta discusión es conocida como la Paradoja de Faraday y ha generado un gran debate sobre si las líneas de campo magnético giran o no con el imán. Richard Feynman estableció que la inducción unipolar es una excepción a la ley de inducción, y así la denomina regla del flujo³. El carácter sobre la regla de flujo es ampliamente discutido en McDonald⁴.

3) Tercer experimento: Rotación simultánea del disco y el imán

En este tercer experimento el imán se mantiene unido al disco y los dos giran solidariamente, dado que no existe velocidad relativa entre el imán y el disco, no tendría que producirse ninguna generación de corriente eléctrica. Dicho de otra manera, no tendría que apreciarse ninguna variación de flujo entre el disco y el imán si las líneas de campo magnético son arrastradas por el imán. No obstante, en contra de lo esperado, se produce una corriente continua en el circuito, lo que indica de esta manera la idea de Faraday de que las líneas de campo magnético no son arrastradas por el imán.

Es necesario darse cuenta de que ahora el contacto entre el disco y el circuito eléctrico vuelve a ser un contacto móvil. Vuelve a aparecer una corriente mientras exista el movimiento de rotación en el contacto móvil.

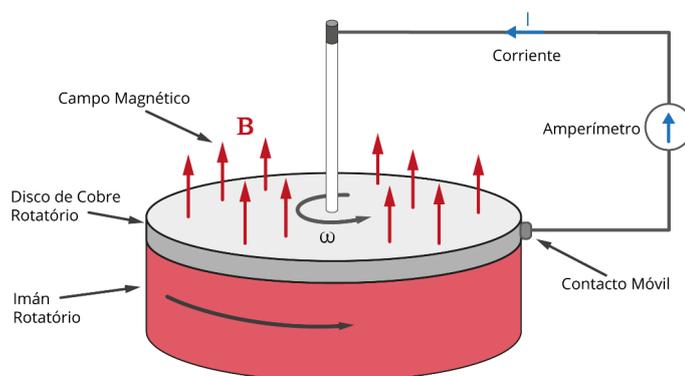


Figura 1.4: Esquema del tercer experimento con el disco de Faraday.

4) Cuarto Experimento: Rotación solamente del imán sin presencia del disco

En este último experimento se omite el disco de cobre y solamente se hace girar el imán en contacto con el circuito eléctrico. En este caso también aparece una corriente eléctrica en el circuito a través del contacto móvil.

Cabe señalar que en estos cuatro experimentos en el único que no se genera corriente eléctrica es en el que no existe contacto móvil.

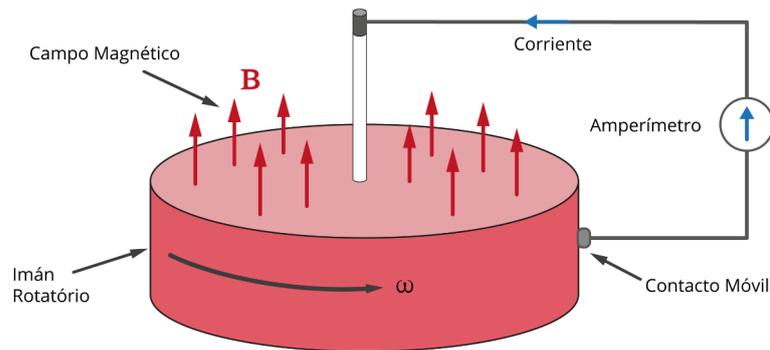


Figura 1.5: Esquema del cuarto experimento con el disco de Faraday,

2 Aplicación de la fuerza de Lorentz al Generador Homopolar

Consideremos a continuación el disco de Faraday, donde el disco de cobre está girando con una velocidad angular ω dentro de un campo magnético B uniforme, ver figura 2.1. En este caso, el sistema se comporta como un generador homopolar y se observa la creación de una corriente que puede medirse mediante un amperímetro.

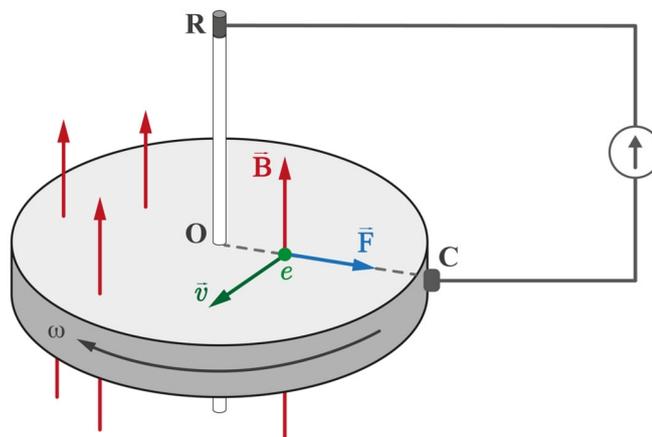


Figura 2.1: Esquema disco de Faraday o Generador Homopolar.

En el sistema de referencia del laboratorio (Σ) el imán se encuentra en reposo. Entonces, desde el sistema Σ , se observa un campo magnético homogéneo y uniforme. Ante esta condición no se produce variación del flujo magnético y en consecuencia, la ley de inducción electromagnética indica que no se produce una fuerza electromotriz. Sin embargo, los experimentos indican que sí se produce esta fuerza electromotriz. En estas condiciones, calculamos la fuerza electromotriz aplicando directamente la fuerza de Lorentz.

Según podemos comprobar en la figura 2.1, consideramos un circuito cerrado OCR, circuito que se cierra entre O y C por el movimiento de las cargas del disco conductor, sometidas a la fuerza de Lorentz. En esta situación aparece un efecto de polarización, donde según el sentido atribuido a la rotación del disco, la fuerza de Lorentz arrastra las cargas positivas hacia el centro del disco y a las negativas hacia la periferia. Teniendo en cuenta que el movimiento real es debido a los electrones y estos tienen carga negativa, el sentido de la fuerza seguirá la dirección indicada en la figura 2.1.

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} = -e\vec{v} \times \vec{B}$$

Entonces el disco polarizado actúa como un generador. Para ilustrarlo con mayor detalle, consideramos a $d\vec{l}$ como elemento diferencial de longitud del camino CO así, la fuerza electromotriz ε vendrá indicada por la siguiente expresión

$$\varepsilon = \oint_C (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

Observamos que $\vec{v} \times \vec{B}$ está dirigido a lo largo del $d\vec{l}$, siguiendo la dirección radial. Puesto que el movimiento es de rotación, la velocidad de las cargas aumenta con el radio de giro, $v = \omega r$. De esta manera podemos reescribir la integral y determinar el valor de la fuerza electromotriz.

$$\varepsilon_F = \int_0^R Bvdr = B\omega \int_0^R r dr = \frac{1}{2}B\omega R^2$$

3 Espira G o Metamorfosis del disco de Faraday

Según los experimentos realizados sobre el disco de Faraday, observamos que se induce una corriente eléctrica independientemente de si gira el imán respecto el disco o es el disco el que gira respecto el imán, solamente interviene la velocidad de rotación relativa. Lo cual no nos debería sorprender. Sin embargo, más curioso es el experimento número 4 donde se produce una corriente inducida sobre el propio imán giratorio. Podemos suponer entonces que la condición del imán no afecta a la rotación del sistema disco-imán. Por otra parte, el disco de Faraday contiene una

simetría generador-motor. Si introducimos una corriente en el circuito conseguiremos que el disco gire. Con este razonamiento en mente, podemos sustituir el imán por un solenoide situado en el eje de rotación del disco, por el cual pasara una corriente que generara el mismo campo magnético que el imán al que sustituye.

Consideremos ahora que el efecto de rotación sobre el disco se genera en un camino radial y, por tanto, es esta porción lineal del disco la que ejerce el momento de rotación. Podemos, de esta manera, sustituir el disco por un conductor radial conectado en serie con el solenoide. Simulando de esta manera la rotación conjunta del disco y el imán en el experimento de Faraday, pero formando ahora un nuevo conjunto homopolar⁵. Este nuevo conjunto de nuestra invención lo denominamos Espira G, por simplicidad, dada la forma asociada a la letra G del conjunto.

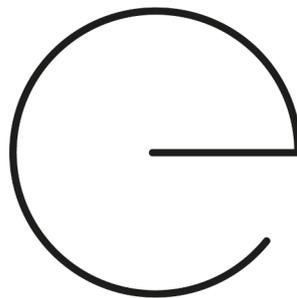


Figura 3.1: Espira G. Esquema del solenoide en serie con la parte radial.

Con el propósito de determinar el comportamiento del motor homopolar basado en la característica de la espira G, hemos diseñado y construido varios experimentos. El primero consiste en demostrar que un prototipo de motor Espira G puede girar tal como sugiere la teoría que se ha planteado anteriormente. A causa de la débil fuerza de Lorentz que se genera, surgen dos inconvenientes en este tipo de experimentación. El primero consiste en disminuir la fuerza de rozamiento entre los contactos, esto se consigue sustituyendo los contactos metálicos sólidos por contactos con mercurio. El segundo inconveniente consiste en obtener la máxima intensidad que pueda circular; así pues, la disminución en los contactos de mercurio también disminuye la resistencia, contribuyendo a conseguir la máxima intensidad posible. En estas condiciones, el circuito de la Espira G se convierte casi en un cortocircuito, permitiendo que la fuente de tensión suministre la máxima intensidad posible. Nuestro diseño y construcción de la Espira G está formado por un diámetro de 85 mm con un diámetro del conjunto de 110 mm y una altura de 95 mm. Con estas dimensiones, durante la realización experimental, conseguimos que girara con una intensidad de unos 100 A.

En la figura 3.2 se muestra el conjunto de la espira G construida para la realización de los experimentos. Un contacto de mercurio se encuentra en la parte superior, donde se unirá a la

fuente de tensión y el otro contacto en la base, donde se encuentra la bobina o espira y cuyo terminal se encuentra en contacto con el mercurio. Puesto que la corriente que circulará será elevada, el contacto metálico con el mercurio tanto en la parte superior como en la inferior tienen que ser también de mínima resistencia.

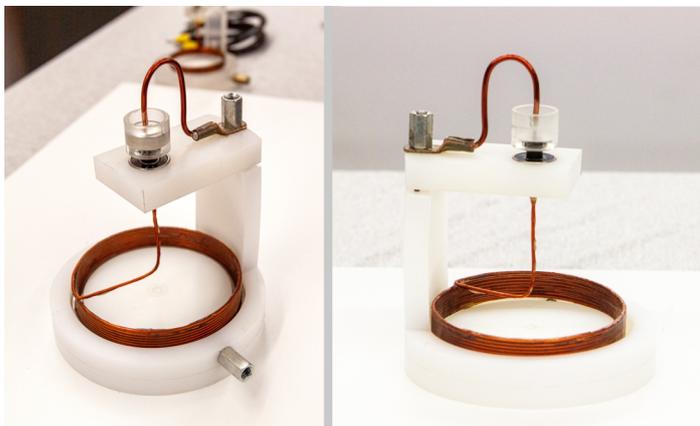


Figura 3.2: Aparato Espira G. Diámetro de la bobina: 85 mm. Diámetro del conjunto: 110 mm. Altura: 95 mm. Intensidad de rotación de unos 100 Amperios.

La unión con el mercurio en la parte superior se consigue mediante una pieza cilíndrica hueca que será la encargada de mantener el mercurio en su interior (figura 3.3). Esta se encuentra unida con el hilo de cobre de la bobina juntamente con un cojinete en su parte inferior. En la parte superior de la pieza cilíndrica se conecta el cable de la fuente de tensión. De este modo, hemos logrado eliminar el rozamiento entre los cables, aunque se encuentran conectados eléctricamente mediante el mercurio. Hay que destacar que las puntas de los cables en contacto con el mercurio tiene que estar libres de resina para mantener un contacto eléctrico entre el cobre y el mercurio.

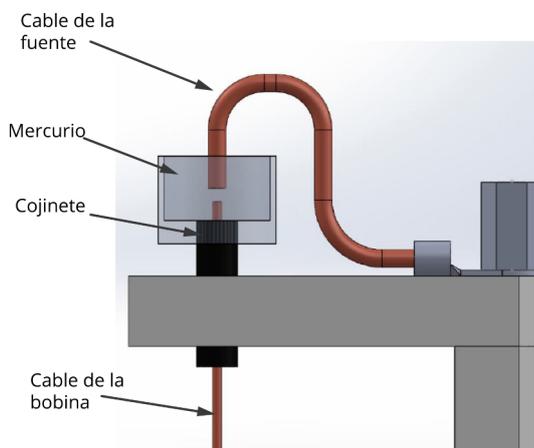


Figura 3.3: Conexión con el mercurio en la parte superior de la Espira G.

El contacto eléctrico en la parte inferior o base de la Espira G se realiza sumergiendo una punta de la bobina en el mercurio, procurando que mantenga el contacto durante la rotación de la Espira G. Como se muestra en la siguiente figura 3.4.

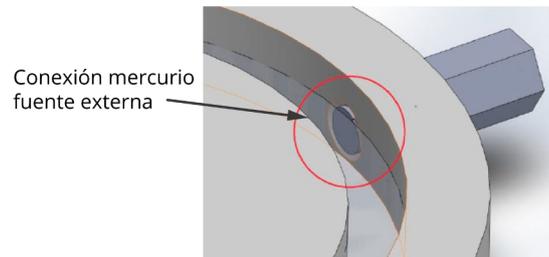


Figura 3.4: Contacto entre el anillo de mercurio, contenido en la cavidad anular, generada para la pista de contacto líquido de mercurio y borne de salida hacia la batería.

El esquema, en representación 3D, del resultado final de la estructura de la Espira G se muestra en la figura 3.5, ilustrando todos los componentes esenciales.

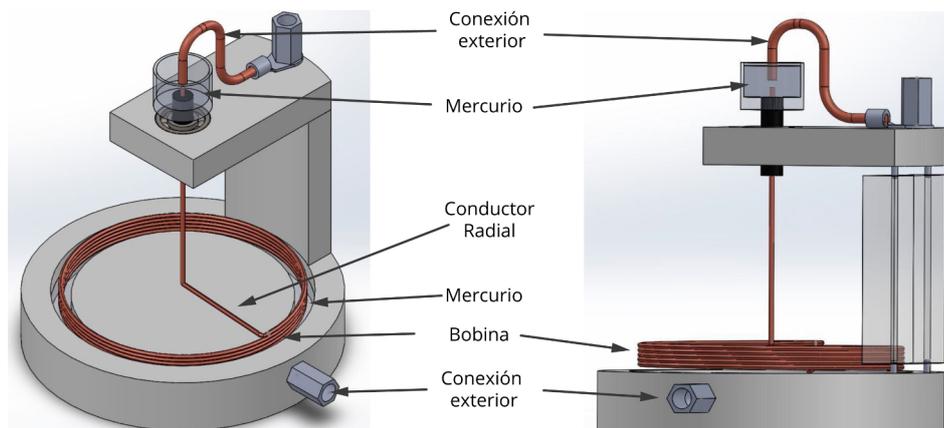


Figura 3.5: Esquema de la estructura de la Espira G. El rotor cuelga y está guiado por el contacto superior de mercurio. La parte inferior contiene un contacto periférico, sumergido en el mercurio, contenido en la cavidad anular inferior.

4 Cálculo sobre la Espira G

Dado el resultado exitoso del experimento sobre el descubrimiento e invención de la Espira G, a continuación se determina el principio que subyace en el origen del movimiento de rotación y su cálculo. Partimos de la hipótesis que la configuración de la espira G es análoga a la del disco de Faraday (figura 4.1) entonces planteamos el mismo tipo de interacción de la corriente con el campo magnético. Simplificando el cálculo, dado que solo nos interesa el principio fundamental que impulsa el movimiento de rotación.

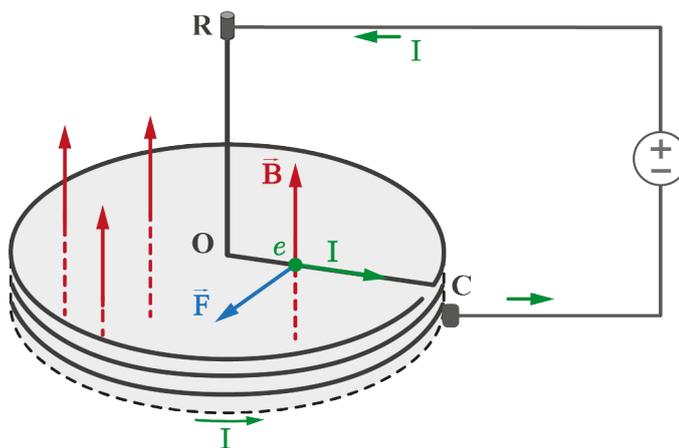


Figura 4.1: Circuito de la Espira G.

De esta manera, la fuerza F que actúa sobre el conductor radial OC viene dado por

$$F = IBR$$

y considerando que esta fuerza se aplica en el centro del conductor radial, el momento N vendrá dado por

$$N = \frac{1}{2}IBR^2$$

Con la intención de obtener una aproximación sobre el movimiento del circuito de la espira G, proseguimos realizando un cálculo aproximado considerando que la bobina tiene muy pocas espiras y su longitud será, por tanto, mucho menor que su radio.

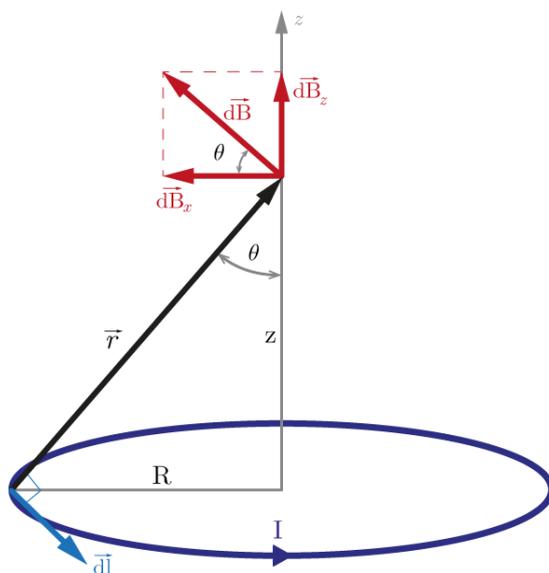


Figura 4.2: Campo magnético de una espira circular.

Determinamos el campo magnético utilizando la ley de Biot y Savart para corrientes

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

puesto que los vectores $d\vec{l}$ y \vec{r} son perpendiculares el producto vectorial se simplifica

$$d\vec{l} \times \vec{r} = r dl \sin \pi/2 = r dl$$

siendo $r = \sqrt{R^2 + z^2}$ y el módulo del campo magnético dB

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{r dl}{r^3} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl}{r^2}$$

La componente del campo magnético dB_x se anula al integrar a lo largo de todo el circuito, solamente quedará la componente dB_z ,

$$dB_z = dB \sin \theta$$

donde $\sin \theta = \frac{R}{r}$, obteniendo

$$dB_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl}{r^2} \left(\frac{R}{r} \right) = \frac{\mu_0 I R}{4\pi} \frac{dl}{r^3}$$

la integral a lo largo de todo el circuito C será de la forma

$$B_z = \frac{\mu_0 I R}{4\pi} \int_C \frac{dl}{r^3}$$

y puesto que el vector posición r no depende del camino circular C, obtenemos el módulo de la componente z del campo magnético a lo largo del eje z.

$$B_z = \frac{\mu_0 I R}{4\pi r^3} \int_C dl = \frac{\mu_0 I R}{4\pi r^3} (2\pi R) = \frac{\mu_0 I R^2}{2r^3} = \frac{1}{2} \mu_0 I \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{3/2}}$$

El valor del campo magnético en el centro de la bobina vendrá dado por $z = 0$, obteniendo el valor siguiente

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

Como aproximación consideramos este el valor como válido en el punto de aplicación de la fuerza F, donde obtenemos

$$F = IBR = I \left(\frac{\mu_0 I}{2R} \right) R = \frac{1}{2} \mu_0 I^2$$

Aplicando las condiciones dinámicas, el equilibrio de momentos entre la fuerza de Lorentz F , considerando su aplicación en el centro del conductor radial, y la fuerza F_r de rozamiento aplicada en el extremo, obtenemos la relación siguiente.

$$F \left(\frac{1}{2}R \right) - F_r(R) = 0$$

Teniendo en cuenta que la F_r es dinámica, aplicamos una fuerza de rozamiento proporcional a la velocidad tangencial, $F_r = bv = \omega bR$. Obtenemos la siguiente relación para la velocidad angular, considerando la aplicación de la fuerza F en el centro de masas del conductor radial.

$$\begin{aligned} F - 2F_r &= 0 \\ 2b\omega_G R &= \frac{1}{2}\mu_0 I^2 \\ \omega_G &= \frac{\mu_0}{4bR} I^2 \end{aligned}$$

Observamos que la velocidad angular depende del cuadrado de la intensidad, esto significa que el sentido de giro de la espira G no depende del sentido de la corriente cómo se comprueba en la experimentación. De esta manera, funciona tanto en corriente continua como en corriente alterna. Al mismo tiempo depende inversamente del radio de la espira, indicando que a menor radio mayor será la velocidad angular. Como también se comprueba en la experimentación, donde las espiras con menor radio giran más fácilmente y con mayor velocidad.

5 Conclusiones

Como resultado del conocimiento adquirido en todos los experimentos realizados sobre el disco Faraday, se han diseñado y construido un nuevo dispositivo eléctrico con movimiento de rotación. Al comprobar que la condición del imán no afecta a la rotación del disco de Faraday, se puede sustituir el imán por un solenoide, con el mismo eje de rotación que el disco, y conectado en serie con un conductor radial, que sustituye al disco. A la forma resultante se la ha denominado espira G, por la forma parecida a la letra G que forma el dispositivo.

El resultado es un nuevo tipo de conjunto de máquinas eléctricas que giran sin necesidad de un campo magnético externo. La dificultad de este tipo de máquinas reside, al igual que en el disco de Faraday, en el contacto eléctrico móvil. Este contacto necesita actuar con bajo rozamiento y a la vez adquirir las características de un muy buen contacto metálico. En un principio se ha usado el mercurio como contacto de bajo rozamiento y alta transmisión eléctrica. Sin embargo, aparte

de los problemas de toxicidad y amalgamas con otros metales como el cobre, es de complicado uso su manejo. Superados estos inconvenientes, se ha construido un dispositivo con la estructura de la espira G. Comprobando tanto teórica como experimentalmente que gira indistintamente en corriente continua como en corriente alterna.

- [1] Faraday, Michael. Experimental Researches in Electricity. Philosophical Transactions R. Soc. London. **122**, 125-162 (1832)
- [2] Arago, Francesc. *Communique verbalement les résultats de quelques expériences...* Annales de chimie et de physique. 22 novembre 1824. Pag 363
- [3] Feynman, R. Lectures in Physics. Chapter 17. The Laws of Induction. Vol II. California Institute of Technology. (1983)
- [4] McDonald, K.T. *Is Faraday's disk dynamo a flux-rule exception?* (2029)
- [5] A.Serra-Valls and C. Gago-Bousquet. *Conducting Spiral as an Acyclic or unipolar Machine*. American Journal of Physics. Vol.38 (11) pp. 1273-1276, (1970)