Motor-Generador Unipolar[1]

Diana López Nacir y Guillermo Pedro Acuña
aimarlopez@sienctis.com.ar, guillermoacu@topmail.com.ar.
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.

Se construye un motor-generador eléctrico unipolar que permite observar las consecuencias de los efectos de fuerzas mecánicas, inducción de corriente y fuerzas electromotrices para así poder estudiar la localización espacial de dichos fenómenos, con el fin de discernir cuál de las teorías existentes, una absolutista y otra relativista, se adecuan a los hechos observados.

I. Introducción:

Hacia 1832 Faraday desarrolló un generador de corriente continua muy simple, conocido posteriormente con el nombre de Disco de Faraday (fig. 1). Esencialmente consta de un disco metálico, (*D*) capaz de rotar en las proximidades del polo de un imán permanente (*M*). Cuando los extremos de un alambre conductor, que denominaremos en adelante circuito de cierre, (*CC*), se apoyan, respectivamente, sobre el eje y la periferia del disco, una corriente continua fluye a través del *CC*. Invirtiendo el sentido de la rotación, la corriente generada cambia su sentido. Otro tanto ocurre al cambiar el polo del imán próximo al disco.

Los hechos observados se explican mediante la fuerza de Lorentz, $f_L = q.(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$,donde $\vec{v}$ representa la velocidad y $\vec{B}$ el campo magnético y $\vec{E}$ el campo eléctrico y la ley de inducción de Faraday $\varepsilon = -\frac{d\phi_m}{dt}$ donde ϕ_m es flujo magnético concatenado.

Este proceso, resulta ser reversible. Es decir que si se le inyecta una corriente entre dos puntos cualesquiera del disco conductor (situados a distintos radios), sus cargas comienzan a girar, debido al torque que el campo del imán realiza sobre las mismas.

Sin embargo cuando imán y disco se sueldan uno con otro (o se utiliza un imán conductor) poniendo a ambos en rotación, se genera también una corriente, pero la explicación del fenómeno ya no resulta trivial. El concepto de campo conlleva una abstracción geométrica, olvidando muchas veces las fuentes del mismo.

Los hechos observados en ésta y otras experiencias[1,2,3] admiten dos interpretaciones, irreconciliables entre sí, que dieron lugar al establecimiento de otras escuelas en las que los científicos se repartieron a lo largo de 170 años: la *absolutista* y la *relativista*.

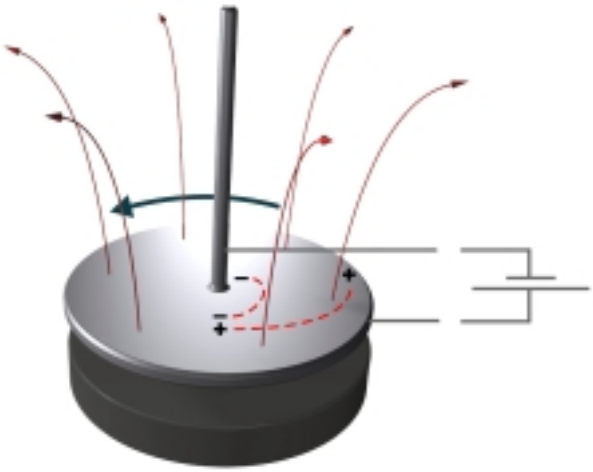

fig.1. Disco de Faraday, en rojo se detallan las líneas de campo producidas por el imán situado debajo del disco conductor, la polarización del disco y se esquematiza que éste, es equivalente a una pila orientada según muestra la figura.

En éste caso cada teoría predice un comportamiento distinto del sistema imán+conductor, de acuerdo a sus interpretaciones sobre la ubicación del elemento activo del sistema que causa el movimiento.

Según el punto de vista Absolutista el fenómeno unipolar está gobernado por la *rotación absoluta* del disco conductor por lo que resulta irrelevante una rotación del imán en lo que se refiere a la polarización del conductor y a la generación de corriente.

Debido a la simetría de revolución del campo magnético producido por el imán, un absolutista podría argumentar que si el disco permanece en reposo, entonces la rotación del imán es irrelevante debido a que $\frac{\partial B}{\partial t} = 0$ en todo punto del conductor. Por lo tanto desde este punto de vista la diferencia de potencial generada, esta localizada en la polarización del disco[1].

En cambio, desde el punto de vista Relativista éste se produce gracias al movimiento relativo entre el disco conductor y el imán. Y si éste movimiento relativo no es posible, entonces cualquier rotación del sistema se deberá a un tercer elemento que cumplirá el rol de ser el elemento activo.

De este modo ambas interpretaciones predicen una fem de igual signo, pero difieren en lo que se refiere a cual es el elemento que se polariza, desde de vista absolutista es el disco quien lo hace, en cambio desde la visión relativista es el cable de conexión. En la figura 2 se muestran las interpretaciones del fenómeno desde cada punto de vista.

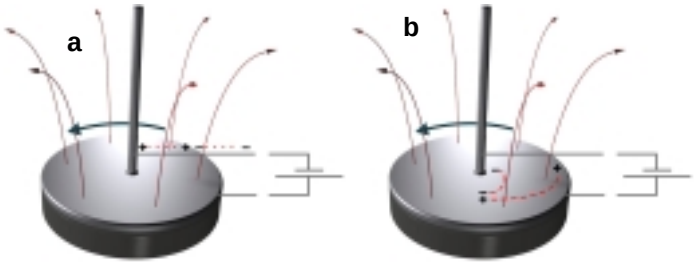

fig.2. **a**. Interpretación relativista: se polariza el cable de conexión. **b**. Interpretación absolutista: se polariza el disco. Ambas visiones predicen el mismo signo de la tensión.

De acuerdo a la ley de fuerzas de Lorentz y a la invariancia galileana de las ecuaciones de Maxwell, a velocidades pequeñas frente a la de la luz, la fuerza electromotriz inducida (ε) entre dos puntos cualesquiera, a distintos radios, de un disco conductor en rotación, inmerso en un campo magnético constante y uniforme(B) es:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot B \cdot \omega \cdot (r_{ext}^2 - r_{\text{int}}^2) \qquad (1)$$

donde r_{ext} y r_{int} son los puntos sobre los cuales se mide ε, los cuales se sitúan en un mismo rayo; a una distancia r_{ext} y r_{int}, respectivamente, del centro del disco. ω es la frecuencia angular de rotación del conductor y c la velocidad de la luz.

La dependencia lineal entre ε y ω, será contrastada en la experiencia correspondiente a la configuración generado.

La deducción de la ecuación 1 figura en el apéndice.

II. Dispositivo experimental.

Con el fin de descartar una de las interpretaciones enunciadas, se utiliza un imán cerámico con forma de anillo al que se le extrae una porción de aproximadamente 12º. El campo magnético producido por el mismo es normal a la superficie, sin embargo en la zona interior al corte el campo se invierte como se muestra en la figura 2.

Este imán es utilizado en dos secuencias de experimentos, una en la configuración motor y otra en la configuración generador.

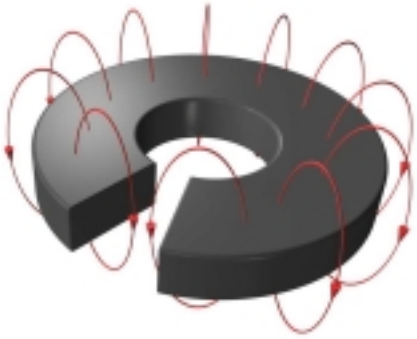

fig. 3 Campo magnético producido por imán con un corte de 12º.

Configuración motor

En esta configuración se ubica al imán sobre una base de madera, con forma de disco. La misma cuenta con dos canaletas circulares de radios mayor y menor al de los del imán. La base de madera se clava a un eje sujetado por medio de cojinetes de modo que pueda girar con poca fricción. Las canaletas se llenan con mercurio y se comunican mediante un circuito de cierre (CC) capaz de girar sobre el imán. El dispositivo se detalla en la figura 3.

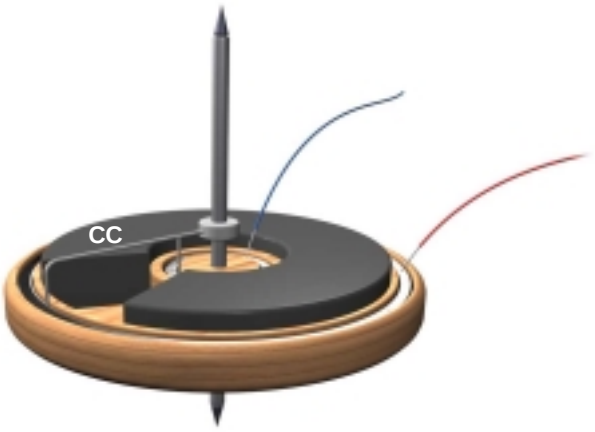

fig. 4 Dispositivo utilizado en la configuración motor

Configuración generador

Se ubica también, el imán sobre la base de madera. Sobre ésta, se ubican dos segmentos de papel de cobre de modo que recorran toda la periferia de la base. Se coloca en el centro de la base una circunferencia de papel de cobre y dos segmentos más de dicho material que unen, respectivamente, uno de los segmentos de la periferia con el centro, atravesando el imán y el otro hace lo propio, uniendo el otro extremo de la periferia con el centro, atravesando la parte cortada del imán (donde se invierte el campo magnético). La figura 4 muestra esta configuración

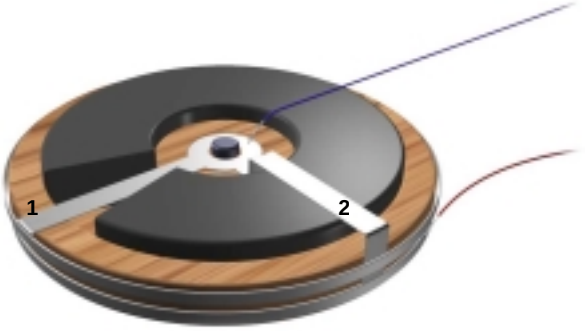

fig 5. Configuración generador. 1. segmento de cobre superior, conectado al centro del disco a través de la zona donde el campo se invierte. 2. segmento de cobre inferior conectado al centro pasando sobre el imán.

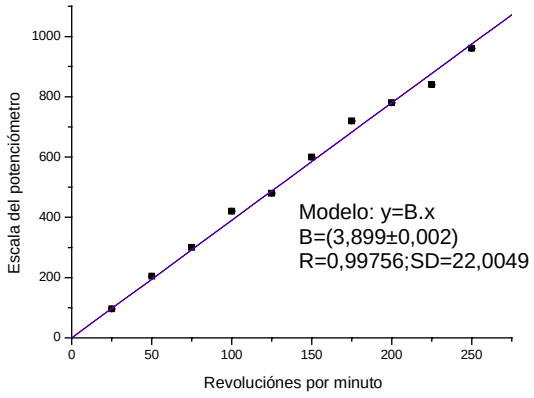

fig 6. Curva de calibración del potenciómetro.

III. Procedimiento experimental y datos obtenidos

Configuración motor

Con esta configuración se realizaron los siguientes experimentos:

a. Con la base de madera fija y el CC libre de rotar sobre el imán se inyectó una corriente continua del orden de 5 A sobre las canaletas. Se observó una rotación del mismo en sentido horario (SH).
b. Bajo las mismas condiciones que en el experimento descripto en a, pero con el CC libre de rotar sobre la asimetría (donde el campo se invierte), se inyectó una corriente de 5 A. Se observó una rotación en sentido antihorario (SAH) del CC.
c. Se unió el CC al imán, permitiendo a ambos girar, se inyectó una corriente del orden de 10 A. Se observó una rotación en SH.
d. Se unió el CC al imán en la parte en que se encuentra la asimetría, permitiendo a ambos girar, se inyectó una corriente del orden de 10 A. Se observó una rotación en SH.

En todos los casos se observó una deflexión de los cables utilizados para inyectar la corriente.

Configuración generador

Se utilizó un motor de velocidad angular regulable. Inicialmente se procedió a su calibración. La misma se realizó colocando al imán un tornillo perpendicularmente a su superficie lateral, de modo que éste, en su recorrido se acerque a una sonda Hall, generando así, un pulso por cada vuelta que realizada. Se registró, en función del tiempo, el campo magnético para distintas velocidades angulares, pudiéndose calcular así, dicha velocidad como función de los valores de la escala del motor. De ésta manera se obtuvo la curva de calibración del potenciómetro que figura a continuación.

Se ubicó sobre el motor la base de madera con el imán, se hizo girar al mismo y se registró la tensión originada entre el centro y cada uno de los segmentos de la periferia, utilizando también escobillas de filamentos de cobre. La tensión originada resultó ser del mismo signo en ambos casos. Los valores medidos se detallan en la figura 7.

Los datos obtenidos fueron ajustados con una recta de acuerdo a la ecuación 1, cuya pendiente, dado que los puntos r_{int} y r_{ext} son los mismos para todas las mediciones, nos da información sobre la intensidad relativa de los campos en las distintas zonas.

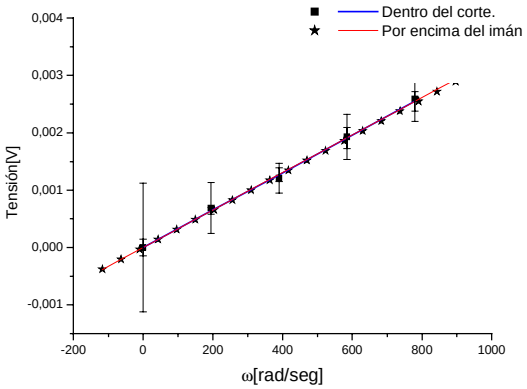

fig. 7. Tensión obtenida sobre el disco en función de la velocidad angular.
Resultados de los ajustes: Modelo: y=B.x
Dentro del corte:
B=(3,3±0,1).10^{-6} [v.seg/rad]; R=0,99999; SD=0,03035
Por encima del imán:
B=(3,3±0,3). 10^{-6} [v.seg/rad]; R=0,99741; SD=0,14927

IV. Análisis de datos.

Configuración motor

Ambos experimentos a y b pueden explicarse mediante la fuerza de Lorentz, los dos puntos de vista tendrán como elemento activo al CC, al

apuntar el campo en distintos sentidos es de esperar que roten en SH y SAH. Sin embargo la explicación del experimento c no será igual para ambos.

Desde el punto de vista absolutista, el mismo torque que hacía girar al CC, será el encargado de "arrastrar" también al imán.

Desde el punto de vista relativista, como no hay movimiento relativo entre el CC y el imán, el elemento activo será el cable utilizado para inyectar corriente, ya que entre éste y el campo generado existe una velocidad relativa. Bajo la interpretación relativista el torque generado en el CC será interno y se cancelará con la reacción generada en el imán (ya que ambos están unidos). El experimento d es el que provee un resultado definitivo entre ambos puntos de vista. Desde el punto de vista absolutista, el torque producido en el CC debería ser el responsable de la rotación por lo que esta debería ser en SAH, el punto de vista relativista predice el resultado observado, ya que según éste, el CC no cumple ninguna función activa, siendo, de nuevo el responsable, el cable utilizado para inyectar la corriente, puesto que éste sufre un torque debido a la ley de Lorentz, que origina las deflexiones observadas cuya reacción pone en movimiento al imán más el CC.

Configuración generador

Se observa en la figura 6, que en el experimento en el cuál se midió el voltaje sobre el disco, los valores de tensión medidos en la zona situada sobre el corte del imán son menores que los medidos en la región sin corte. Esto puede explicarse a partir de ambos puntos de vista, puesto que los dos predicen que, debido al corte del imán, exista en esa zona un campo más débil que en la otra y que además se generan corrientes de Foucault en el disco, debido a que las cargas sienten la disminución del campo al llegar a dicha zona. Es importante aclarar que en la región por encima del corte, a aproximadamente 5mm del imán, el campo magnético generado por éste, ya no se encontraba invertido, de acuerdo con lo observado con una sonda Hall, lo cual es consistente con el signo de la tensión medida.

Por otro lado, la experiencia en la cual se midió la tensión sobre las uniones de cobre fijas al imán, no puede ser explicada desde el punto de vista absolutista, puesto que en la zona situada dentro del corte, el campo sí se encontraba invertido, de acuerdo también, a lo observado con una sonda Hall, y por lo tanto las tensiones medidas sobre la unión de cobre situada en ésta zona debería ser, desde éste punto de vista, de signo contrario a los valores medidos en la unión situada sobre el imán.

Desde el punto de vista absolutista, son las uniones las que se polarizan debido a la rotación del imán, y debido a que el campo dentro del corte se invierte, (o es distinto, si se quiere), la polarización de la unión situada allí, debería, por lo tanto, ser opuesta a la de la unión situada sobre el imán.

Desde el punto de vista relativista, en cambio, sí pueden explicarse los resultados obtenidos, ya que de acuerdo a ésta interpretación, no es la unión de cobre la que se polariza, sino el cable con el cuál uno realiza la medición de la tensión y éste no se encuentra, en ninguno de los dos casos, en la región de campo invertido. Debido a esto último, en ambos casos se obtienen los mismos valores de tensión, como muestra la figura 7.

Finalmente, se observa en las figuras 6 y 7, el comportamiento lineal de la tensión inducida con la frecuencia angular acorde a lo predicho por la ecuación 1.

V. Conclusión

Las experiencias realizadas nos permite afirmar que el fenómeno unipolar está gobernado por el movimiento relativo entre el imán y el conductor, ya sean, según la configuración adoptada, los cables con los cuales uno realiza la medición, el disco o el CC. A partir de las mismas se concluye que no es el conductor el que se polariza cuando éste rota solidario al imán, contrario a lo que figura en varios textos,[3,4,5,6] sino el cable con el que uno toma la medición. Por lo tanto los resultados obtenidos concuerdan con el punto de vista relativista.

VI. Apéndice[7]

Cuando aún no se había desarrollado la teoría de la relatividad, se daba por entendido que todas las leyes físicas debían ser covariantes ante las transformaciones de Galileo; esto se acepta también hoy en día cuando se manejan velocidades relativas pequeñas frente a la velocidad de la luz. Si se aplica esto a la Ley de inducción de Faraday se obtiene cómo se deben transformar los campos electromagnéticos para bajas velocidades. Esto mismo puede obtenerse a partir de las transformaciones de Lorentz para dichos campos haciendo la aproximación:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \cong 1 \qquad \text{(i)}$$

donde v es la velocidad relativa de un sistema inercial al otro y c es la velocidad de la luz.

De cualquiera de las dos formas se deduce que si se tiene en un sistema inercial (S) sólo un campo magnético, entonces, en un sistema, también inercial, (S`) que se mueve respecto del anterior a una velocidad v, pequeña frente a c, se tiene un campo magnético aproximadamente igual al que se tenía y un campo eléctrico no nulo, de acuerdo a la siguiente

transformación, válida hasta el orden de (v/c) (ver esquema i):

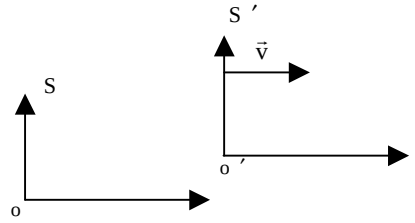

fig.i. Esquema utilizado para la transformación de los campos.

$$\vec{B}' \cong \vec{B} \qquad \text{(ii)}$$

$$\vec{E}' \cong \vec{v} \times \vec{B} \qquad \text{(iii)}$$

donde las magnitudes primadas corresponden al sistema S`.

Dado que el imán en la configuración generador posee un movimiento relativo respecto del conductor y ya que en el sistema fijo al imán sólo existe un campo magnético se pueden usar las transformaciones enunciadas para obtener el campo eléctrico en el sistema fijo al conductor. Aunque si bien, el sistema no es inercial, las velocidades son pequeñas comparadas con c y las mismas siguen valiendo.

Aplicando la Ley de fuerza de Lorentz en el sistema fijo al conductor (sistema laboratorio), se obtiene:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}' = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \qquad \text{(iv)}$$

donde q es la carga, $\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}$ es la velocidad del conductor respecto del imán, y $\vec{\omega}$ su velocidad angular.

Por lo tanto la f.e.m. que se mide en el sistema fijo al conductor, tomando la orientación de los ejes de modo que $\vec{\omega} = \omega \cdot \hat{z}$ y $\vec{B} = B \cdot \hat{z}$,es:

$$\varepsilon = \int_{r_{int}}^{r_{ext}} \vec{E}' \cdot d\vec{l} = \int_{r_{int}}^{r_{ext}} B \cdot \omega \cdot r \cdot dr$$

$$\Rightarrow \varepsilon = \frac{1}{2} \cdot B \cdot \omega \cdot (r_{ext}^2 - r_{int}^2) \qquad \text{(v)}$$

donde r_{int} y r_{ext} son los puntos sobre los cuales se mide ε, los cuales se sitúan en un mismo rayo; a una distancia r_{ext} y r_{int}, respectivamente, del centro del conductor.

VII. Referencias

[1].J.Guala-Valverde, “Spinning magnets and relativity”, Phisica Scripta.In press(2002).

[2].J.Guala-Valverde, P. Mazzoni and R.Achilles. “The Homopolar motor: a true relativist engine”, American Journal of Physics.**70**(10) 1052, 2002.

[3].D.F.Bartlett et al.,”Spining magnets and Jehle`s model of te electron”, Physical Review, **16**, 3459 (1977).

[4].F.Paz, G.La Bruna, M.Larreguy, J.Romani. ”Generador de Faraday de una sola pieza”,Univ.Favaloro.BsAs.(2001). www.fisicarecreativa.com.

[5].Gianfranco Spavieri, Miguel Rodríguez and Edgar Moreno.”Recent Developments in the Relativistic Electrodynamics Controversy”.Centro de Astrofísica Teórica, F. de Cs, Univ.de Los Andes Mérida, 5101-Venezuela.

[6].Panofsky & Phillips. “Classical Electricity and Magnetism”.ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, Inc. E.E.U.U.(1955)

[7].J.D.Jackson.”Electrodinámica Clásica”. E.D.ALHAMBRA S.A. Madrid.(1966)

Agradecimientos.

A J. Guala-Valverde por su invalorable asistencia técnica y teórica, y a Agustín Acuña por sus representaciones en 3-D.