

# ELECTRODINÁMICA

## RECIENTES EXPERIMENTOS, NUEVAS CONCEPCIONES

Jorge Guala-Valverde

Con la colaboración de Pedro Mazzoni y Roberto Blas

Fundación Julio Palacios. Neuquén, Argentina

[fundacionjuliopalacios@usa.net](mailto:fundacionjuliopalacios@usa.net)

### Sumario

Reportamos aquí los resultados de recientes experimentos de electrodinámica. Los mismos ilustran el significado del principio de relatividad, restituyendo el alcance que Einstein le dio en su célebre artículo del año 1905 [1].

Tras reseñar una síntesis de la física de la inducción homopolar, recientemente develada, se explora el comportamiento de sistemas magnéticamente blindados. Tanto las fuerzas electromotrices como las ponderomotrices son inmunes a los blindajes magnéticos. Las expresiones de fuerza de Lorentz y de Laplace deben aplicarse con considerable cuidado al análisis de la inducción electromagnética.

**Keywords:** motional induction, homopolar devices, non local actions, Lorentz force.

## I INTRODUCCIÓN

Las celdas galvánicas, artificios que permiten operar la conversión de energía química en energía eléctrica, constituyeron las únicas fuentes de corriente eléctrica hasta el advenimiento de los generadores de inducción electromecánica. Tras los descubrimientos de Faraday y de Henry, la Humanidad aprendió a convertir energía mecánica en energía eléctrica, y viceversa. La clave de tal transformación se encuentra en el movimiento de alambres conductores de electricidad en regiones del espacio permeadas por campos magnéticos.

Como es de todos conocido, las reacciones electroquímicas que tienen su asiento en las celdas galvánicas dan lugar a la generación de corrientes continuas (CC). Contrariamente, la inmensa mayoría de los generadores comerciales, que por cientos de millones funcionan en todo el mundo, producen corrientes alternadas. Estos generadores, denominados genéricamente *alternadores*, convierten energía mecánica en energía eléctrica mediante bobinados conductores que giran dentro de recintos en los que existe un campo magnético.

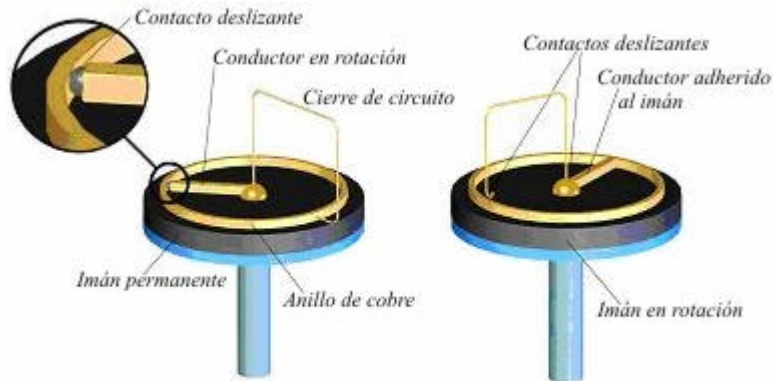
La peculiaridad más notable de estas máquinas es que cada trozo de conductor está sometido a un campo magnético  $\vec{B}$  que varía en el transcurso del tiempo, expresión que en lenguaje matemático se traduce como  $\partial \vec{B} / \partial t \neq 0$ . Maxwell fue capaz de sintetizar los resultados de los experimentos que Faraday realizó sobre este tipo de inducción electromagnética, en la expresión  $rot \vec{E} = - \partial \vec{B} / \partial t$ , una de las célebres ecuaciones de Maxwell. En la misma,  $\vec{E}$  representa el campo eléctrico inducido en un punto del espacio en el cual el campo magnético experimenta una variación temporal dada por  $\partial \vec{B} / \partial t \neq 0$ .

Existe otra forma de convertir energía mecánica en energía eléctrica, produciendo esta vez CC. Se trata de la *inducción electromagnética homopolar*, también denominada *unipolar*, y fue el mismo Faraday quien la descubrió hacia 1832. Las máquinas homopolares constan, esencialmente, de un conductor capaz de rotar sobre uno de los polos de un imán permanente uniforme (disco de Faraday). A diferencia de lo que ocurre en los alternadores, el campo magnético sobre cada trozo del conductor se mantiene invariable en el transcurso del tiempo ( $\partial \vec{B} / \partial t = 0$ ).

A pesar de la sencillez intrínseca de los dispositivos homopolares, la física de la inducción homopolar fue desconocida o malinterpretada desde los tiempos de Faraday hasta nuestros días. Recién en el año 2001 pudo develarse, mediante experimentos cruciales, la naturaleza *relativista* del fenómeno [2]. Estos resultados experimentales y algunas de sus

consecuencias fueron ampliamente diseminados en la literatura internacional. [3-15]. Haremos ahora una breve reseña de las conclusiones notables de tales experimentos.

La figura 1 (izquierda) muestra el esquema básico de un generador homopolar. Un conductor radial gira con la velocidad angular  $\omega_0$  (rad/seg) sobre uno de los polos de un imán permanente. Tanto el imán como el alambre conductor que posibilita el cierre de un circuito eléctrico (denominado *cierre de circuito*, en adelante) permanecen fijos (estacionarios) en el laboratorio. Esta configuración corresponde al *primer generador de Faraday*.



**Figura 1**  
Elementos esenciales de un generador homopolar, en dos configuraciones equivalentes

El conductor radial, **en movimiento con relación al imán**, se convierte en una fuente de fuerza electromotriz (fem). El cierre de circuito, **en reposo con relación al imán**, permite la circulación de corriente continua a través del circuito cerrado conformado por los conductores señalados. Un anillo circular de cobre posibilita la continuidad eléctrica entre los conductores. Insertando un voltímetro de alta impedancia en el cierre de circuito se medirá la tensión  $e$  (voltios). En lo que a generación concierne, el conductor radial en rotación constituye la pieza *activa* de la máquina, en tanto que el cierre de circuito solo juega un rol *pasivo* [2-15].

Una configuración eléctricamente equivalente tiene lugar cuando, permaneciendo el cierre de circuito estacionario, rotan juntos imán y conductor radial con la velocidad angular  $\omega_0$ . Este dispositivo, que se ilustra en la figura 1, derecha, constituye el segundo generador de Faraday. El cierre de circuito, **en movimiento con relación al imán**, se convierte ahora en pieza activa de la máquina, pues en él tiene lugar el fenómeno inductivo. El conductor radial, **en reposo con relación a imán**, sólo juega un papel pasivo (proveer un camino para el flujo de corriente). La fem provista por el cierre de circuito es, naturalmente, la misma e que la correspondiente al primer generador.

La tercera configuración equivalente es aquella en la que, permaneciendo imán y conductor radial estacionarios en el laboratorio, el cierre de circuito es puesto en rotación con la velocidad angular  $-\omega_0$ .

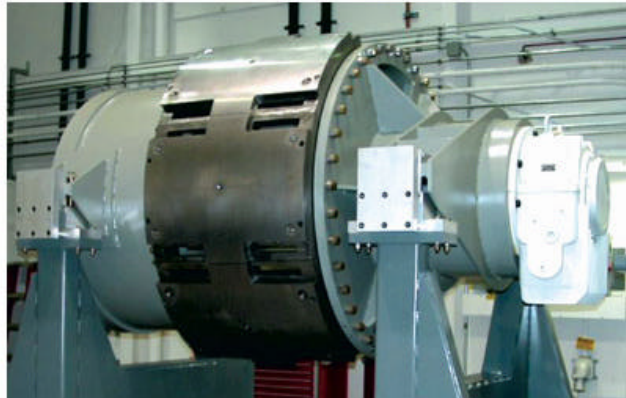
Como se advierte, la generación de corriente está regida siempre por el movimiento relativo entre el imán y alguno de los conductores, tal como lo adelantó Einstein en 1905:

*“Es sabido que la electrodinámica de Maxwell (como usualmente es interpretada) conduce a **asimetrías** que no parecen ser inherentes al fenómeno en sí. Considérense, por ejemplo, las acciones recíprocas entre un imán y un conductor. El fenómeno aquí observable depende tan solo del **movimiento relativo** entre ambos, en tanto que la interpretación habitual marca una nítida distinción según sea el imán o el conductor el que se mueve”* [1, traducción libre].

Resulta curioso advertir que durante la totalidad del pasado siglo no se reconoció la naturaleza relativista del fenómeno en cuestión. Como ejemplos, basta revisar clásicos de la literatura especializada sobre la materia [16,17]. Se creía, pues, que el fenómeno inductivo

debía su origen a la rotación *absoluta* del conductor, con total independencia del estado de movimiento del imán. Esta física errónea, defendida por el Nobel Richard Feynman, obliga a introducir en la descripción del fenómeno un elemento *completamente* extraño al mismo, cual es un sistema de referencia anclado a la materia distante del Universo [18, 19].

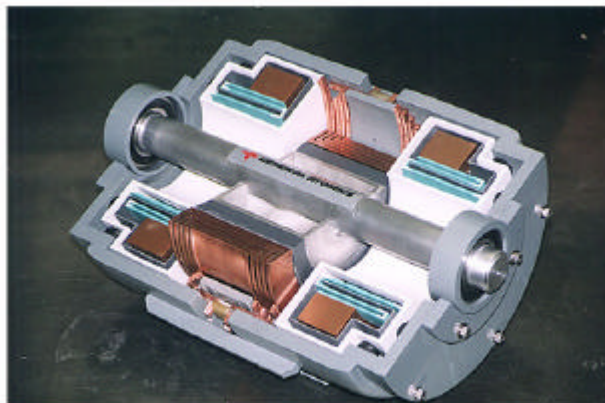
El hecho de poder reconocer el asiento de las fuerzas que dan lugar a la inducción electromagnética es de capital importancia para el diseño de una nueva generación de máquinas electro-mecánicas. Este tema ocupa a los ingenieros y ha cobrado creciente interés actual merced al empleo de superconductores. Tanto es así que la Armada Estadounidense está desarrollando prototipos de motores homopolares para motorizar naves de combate capaces de desplegar 50.000 HP. La fotografía 1 ilustra uno de tales prototipos [20]. El gráfico 2 exhibe un corte transversal de tal motor.



One-quarter scale 5,000 hp motor under construction

Foto 1

Desde el punto de vista de la física, el hecho de haber develado el funcionamiento de las máquinas homopolares pone un punto final a fantasiosos intentos de extraer “energía libre” del espacio, posibilidad en apariencia factible dentro del viejo paradigma [21, 22].



Homopolar motor model in half-section

Figura 2

Populares órganos de difusión científica, como lo es el *European Journal of Physics*, insisten aún en sostener el viejo y erróneo modelo absolutista [23]. Críticas a tales tratamientos han sido ya debidamente publicadas [24, 25, 26].

## II FUERZA DE LORENTZ E INDUCCIÓN HOMOPOLAR

La ley de Lorentz,  $\vec{F}_L = q (\vec{v} \times \vec{B})$ , aplicada a los electrones de conducción que se encuentran en movimiento con relación al imán permite interpretar adecuadamente la inducción homopolar. En la anterior expresión  $\vec{v}$  simboliza la velocidad del electrón con

respecto del imán, siendo  $\vec{B}$  la intensidad del campo magnético (Tesla) en el punto en que se encuentra la carga considerada. Llamando  $\vec{w}$  al vector perpendicular al plano de rotación, cuyo módulo coincide con la velocidad de rotación del electrón, resulta  $\vec{v} = \vec{w} \times \vec{r}$ . Cualesquiera de tales cargas experimenta la fuerza  $\vec{F}_L = q[(\vec{w} \times \vec{r})] \times \vec{B}$ , equation que toma la forma  $\vec{F}_L = (q\vec{w}B)\vec{r}$  si  $\vec{B}$  permanece constante sobre el conductor. La cantidad  $\vec{F}_L / q \equiv \vec{E}_L = (\vec{w}B)\vec{r}$  se denomina, usualmente, campo (eléctrico) de Lorentz inducido por el movimiento.

El significado de  $\vec{w}$  en las anteriores expresiones ha sido motivo de interminables discusiones a lo largo de los últimos 170 años.

Hoy sabemos [2,15] que  $\vec{w} = \vec{w}_C - \vec{w}_I$ , donde  $\vec{w}_C$  y  $\vec{w}_I$  denotan, respectivamente, la velocidad angular del conductor activo y la del imán, medidas ambas con relación a ejes fijados en el laboratorio. De aquí se desprende que una rotación en *sentido antihorario* del conductor radial ( $\vec{w}_C = w_0 \hat{z}$ ) con el imán estacionario en el laboratorio ( $\vec{w}_I = 0$ ) es equivalente a una rotación de *sentido horario* del imán ( $\vec{w}_I = -w_0 \hat{z}$ ) con el conductor radial fijo en el laboratorio ( $\vec{w}_C = 0$ ). Aquí  $\hat{z}$  simboliza el vector unitario sobre el eje de rotación z. De este modo, el campo inducido de Lorentz se expresa como:

$$\vec{E}_L = [(\vec{w}_C - \vec{w}_I) \times \vec{r}] \times \vec{B} \quad (1)$$

La fuerza de Lorentz es una fuerza *local* ya que involucra la intensidad del campo magnético  $\vec{B}$  tal como sería medida en el mismo punto en que  $q$  está localizada.

Otros modelos matemáticos interpretan las interacciones entre partículas mediante *acciones a distancia*, sin la necesidad de introducir el concepto de campo. La electrodinámica de Weber [28], basada sobre acciones a distancia, también explica la inducción homopolar [29].

Ambos modelos permiten calcular la fem desarrollada por el generador homopolar. Para un conductor radial de longitud  $R$ , rotando a la velocidad angular  $w$ , en una región del espacio en la que la intensidad de campo magnético es  $B$ , resulta  $e = wBR^2/2$ .

### III HOMOPOLARES ADITIVOS. PUEDEN CONSTRUIRSE?

Como es de todos conocido, los alternadores (generadores de corrientes alternadas) son *aditivos*. Esto significa que la fem desarrollada por una bobina de  $N$  espiras es  $N$  veces mayor que la fem desarrollada por cada espira individual. En los alternadores, el *flujo magnético* ( $\Phi = \iint \vec{B} \cdot \vec{dS}$ ) que atraviesa cada espira no es constante, sino que varía en el transcurso del tiempo, típicamente de la forma  $\Phi = \Phi_{\text{máx}} \text{sen}(wt + a)$ . En virtud de la ley de inducción de Faraday-Neumann ( $e = -d\Phi/dt$ ), resulta una tensión sinusoidal entre bornes del alternador.

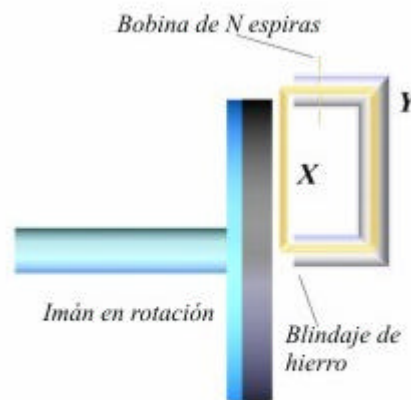
En los generadores homopolares, por el contrario, no ocurre variación alguna del flujo magnético sobre los conductores y resulta natural preguntarse si es posible que estas máquinas también sean aditivas. Tomando seriamente en cuenta los modelos de *acciones locales* tal posibilidad no estaría *a priori* excluida, y todo se reduciría a modificar, deliberadamente, las acciones del campo  $\vec{B}$  sobre alguno de los conductores activos.

Blindando magnéticamente una de las ramas de una bobina de  $N$  espiras quedaría logrado el propósito. La figura 3 muestra un imán uniforme rotando en las proximidades de una bobina conductora cuya rama Y, alejada del al imán, está ubicada en lo interior de un tubo de hierro dulce (blindaje magnético), en tanto que la rama próxima, X, permanece desnuda.

Según el modelo basado sobre acciones locales, cada rama de la bobina, en movimiento relativo con el imán, se comportaría como un generador de fem, dando lugar a un acoplamiento de dos generadores conectados en oposición. Las ramas desnuda y blindada de la bobina serían fuentes de las fem dadas, respectivamente, por:

$$e_x = w B_x R^2 / 2 \quad (2)$$

$$e_y = w B_y R^2 / 2 \quad (3)$$



**Figura 3**  
Modelo de generador homopolar aditivo

La fem neta provista por la máquina vendría dada por  $Nw R^2 (B_x - B_y) / 2$ , siendo  $B_x$  ( $B_y$ ) la intensidad del campo magnético *local* sobre la rama X (Y).

## IV EXPERIMENTAL

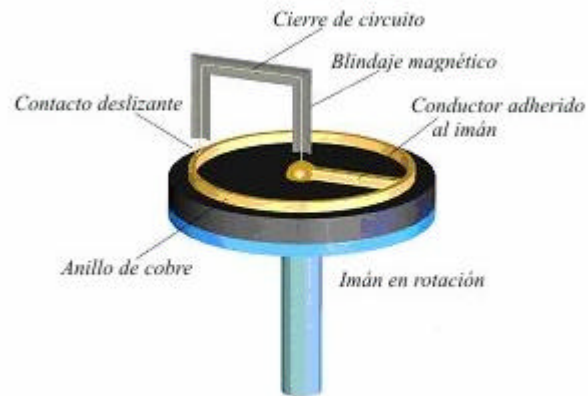
### IV.1 IMÁN EN ROTACIÓN CERCA DE UNA BOBINA PARCIALMENTE BLINDADA

Se trabajó con una bobina con 200 espiras de alambre de cobre esmaltado, con  $X$  medio igual a 5 cm.  $B$  sobre la rama  $X$  resultó ser de al menos 300 gauss (0,03T). El blindaje de hierro dulce (radios exterior e interior de 3 y 5mm respectivamente) asegura un factor de blindaje mayor que 10 (Apéndice 1) sobre  $Y$ :  $B_y < B_x / 10$ .

Para una corrida típica a  $w = 200$  rad/sec, sería de esperar una fem cercana a 1 volt. Las mediciones efectuadas con un voltímetro de alta impedancia nunca superaron la cota de incerteza experimental ( $\pm 0,2$  mvolt). El experimento no permite validar las ecuaciones (2) y (3).

### IV.2 IMÁN EN ROTACIÓN CON CIERRE DE CIRCUITO BLINDADO

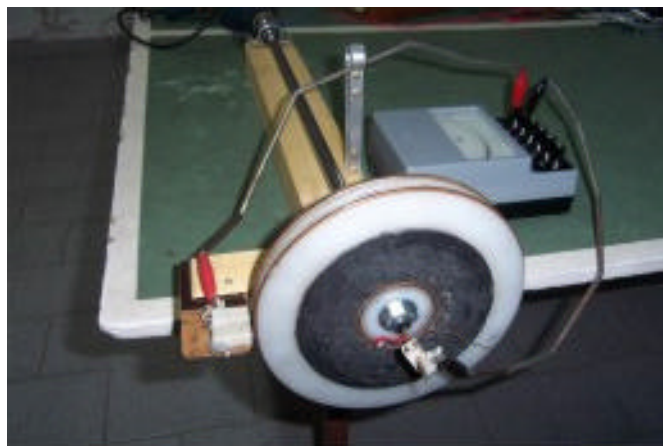
El resultado del experimento IV.1 obliga a investigar más detenidamente el fenómeno en cuestión. Para ello, se montó un dispositivo en el cual el conductor radial se pone en rotación solidario con el imán. El cierre de circuito, blindado, permanece estacionario en el laboratorio (Figura 4).



**Figura 4**  
El blindaje magnético no modifica la fem provista por la máquina

Mediante contactos deslizantes se asegura la continuidad eléctrica a través del cierre de circuito y el anillo de cobre (Foto 2).

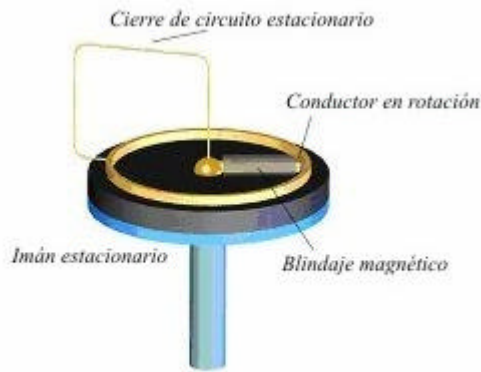
En una corrida típica a  $\omega = 200$  rad/seg, con cerca de 600 gauss sobre el conductor radial y  $B_{\text{Cierre circuito}} < (1/10) B_{\text{Conductor radial}}$ , la fem medida resultó ser de 14 mV, esto es, la misma que si se operase en ausencia de blindaje.



**Foto 2**

### IV.3 CONDUCTOR RADIAL BLINDADO, ROTANDO SOBRE EL IMÁN ESTACIONARIO

La figura 5 muestra al conductor radial blindado, rotando sobre el imán en reposo en el laboratorio. También el cierre de circuito permanece estacionario. Cuando el conductor radial alcanza unos 200 rad/seg, la fem medida alcanza los 14 mV, esto es, lo mismo que si el blindaje no estuviese presente. Este experimento se efectuó respetando las mismas condiciones experimentales que en IV.2.



**Figura 5**  
El blindaje magnético no modifica la fem provista por la máquina

La foto 3 muestra el dispositivo empleado en el laboratorio. Un cilindro de bronce aloja al imán permanente y al conductor radial blindado. El conductor radial y accesorios fueron cementados a una placa de material plástico, con libertad de rotación sobre el imán. Cada extremo del conductor radial aloja un electrodo de grafito. Uno de estos electrodos desliza sobre la cara interna del cilindro de bronce, en tanto que el otro lo hace sobre el eje de rotación. Un motor eléctrico convencional pone en movimiento al conductor radial de prueba. El dispositivo giratorio debió ser balanceado para evitar vibraciones espurias, para lo cual se emplearon dos monedas y un tubo de bronce eléctricamente aislado del eje de rotación y del cilindro de bronce (foto 4).

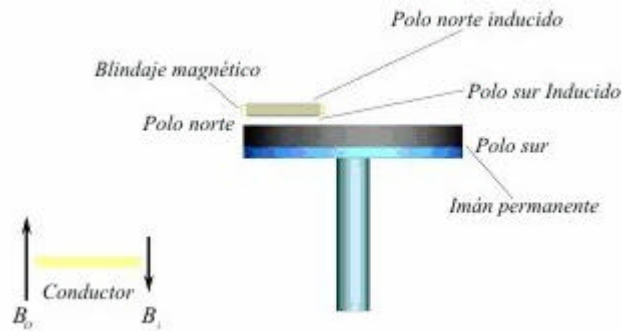


**Foto 3**

Una vez más, el campo de Lorentz inducido sobre conductores en movimiento con relación al imán resulta enteramente inmune a los blindajes magnéticos. En otras palabras, la intensidad de campo magnético  $\vec{B}$  que interesa en la ecuación 1 es solamente la debida a las **fuentes del campo magnético que están en movimiento con relación a los conductores, y no el valor local de la misma sobre las cargas eléctricas contenidas en estos.**

## V BLINDAJE MAGNÉTICO E INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Los materiales ferromagnéticos experimentan magnetización inducida cuando se encuentran en las proximidades de imanes permanentes o de circuitos recorridos por corrientes eléctricas [30]. La figura 5 muestra los polos inducidos sobre un prisma de hierro localizado sobre el polo Norte de un imán permanente.



**Figura 5**  
Polos inducidos sobre un trozo de hierro

La figura muestra, además, un alambre conductor alojado en lo interior del prisma. Este alambre, sometido al campo magnético  $\vec{B}_o$  debido al imán permanente, también experimenta las acciones debidas al campo magnético  $\vec{B}_i$  inducido en la masa de hierro. Este campo inducido, originado por las *cargas magnéticas aparentes* desarrolladas en las caras inferior y superior del prisma, sumado con el campo original da lugar al *campo local* sobre el alambre:

$$\vec{B}_{Local} = \vec{B}_o + \vec{B}_i \quad (4)$$

Nótese que  $\vec{B}_i$  es un vector opuesto al vector  $\vec{B}_o$ , lo que significa que el campo local es menor que el campo original  $\vec{B}_o$ . Esto constituye, precisamente, el fundamento de los blindajes magnéticos.

Los experimentos anteriormente reportados muestran, sin ningún género de dudas, que los campos magnéticos cuyas fuentes se mantienen en reposo con relación a los conductores, no contribuyen al campo de Lorentz. Todo pasa como si el blindaje no estuviese presente. Las acciones *no locales* del imán en rotación bastan para comprender los fenómenos observados. Recurriendo a la arcaica figura que vincula generación de fem con “corte” de líneas de campo, resulta claro que las líneas asociadas con  $\vec{B}_i$  no pueden ser “cortadas” por el alambre conductor (ambos se mantienen en reposo relativo).

El blindaje mismo, aunque incapaz de perturbar el fenómeno inductivo sobre el alambre, resulta eléctricamente polarizado por el campo de Lorentz, de la misma manera que el alambre activo.

## APÉNDICE

Tomado de Page & Adams [30], página 143, traducción libre:

*“Un instrumento magnético sensible puede ser muy eficazmente blindado de la acción de campos externos colocándolo en lo interior de un cilindro de hierro dulce de alta permeabilidad magnética. Investigaremos la magnitud del campo en lo interior del blindaje cilíndrico localizado en una región en la que el campo magnético uniforme es perpendicular al eje del cilindro”.*

Tras resolver la ecuación de Laplace que gobierna el potencial magnetostático, estos autores arriban al factor de blindaje,  $g = (\mu/4)[1 - (a/b)^2]$ , expresión en la que  $a$  y  $b$  representan, respectivamente, los radios interior y exterior del cilindro, siendo  $\mu$  la permeabilidad magnética relativa del blindaje. Un cilindro de hierro de permeabilidad 300, de radios 4 y 5 cm, respectivamente, tendrá un factor de blindaje de  $(300/4)[1 - (4/5)^2] = 27$ . En otras palabras, el instrumento blindado estará sometido a una intensidad magnética unas 30 veces menor que si no lo estuviese.



## Reconocimientos

Nuestro sincero agradecimiento a Maximiliano Blas por su inestimable apoyo, brindado con motivo de esta edición.

## Referencias

01

A. Einstein, "Zur Elektrodynamik Bewegter Körper", Annalen der Physik, **17** 1905

02

J. Guala-Valverde & P. Mazzoni. "The Unipolar Dynamotor: a Genuine Relational Engine", Apeiron, **8**,41 (2001)

03

J. Guala-Valverde. "Spinning Magnets and Relativity: Jehle vs. Bartlett". Physica Scripta (Royal Swedish Acad. Sciences), **66**, 252 (2002)

04

J. Guala-Valverde, P. Mazzoni and R. Achilles. "The Homopolar Motor: A True Relativistic Engine". American Journal of Physics, **70**, 1052 (2002)

05

J. Guala-Valverde y P. Mazzoni. "Máquinas Eléctricas Unipolares". Ref. Facultad Ingeniería, Tarapacá, Chile. Vol.10, 1 (1002)

06

J. Guala-Valverde. "Feynman Lectures:  $\vec{A}$ -Field and Relativity". Spacetime & Substance Journal, **3**, N° 2, 94 (2002)

07

J. Guala-Valverde. "On the Electrodynamics of Spinning Magnets". Spacetime & Substance Journal, **3**, N°3, 140 (2002)

08

J. Guala-Valverde, P. Mazzoni & R. Achilles. "The Homopolar Motor". New Energy Technologies, **4** (7), 37 (2002)

09

Fabio R. Fernández. "More on Feynman Lectures by J. Guala-Valverde". Spacetime & Substance Journal, **3** N°4, 184 (2002)

10

J. Guala-Valverde. "Why Homopolar Devices cannot be Additive?". Spacetime & Substance Journal, **3** N° 4,186 (2002)

11

R.Achilles. « Again on the Guala-Valverde Homopolar Experiments ». Spacetime & Substance Journal, **3** N°5, 235 (2002)

12

A.K.T. Assis & J. Guala-Valverde. "On Absolute and Relative Motions in Physics". Journal of New Energy, **6** N°4, 8 (2002)

13

J. Guala-Valverde. "Experiment versus Dogma". Galilean Electrodynamics, **14**, 120 (2003)

14

J. Guala-Valverde. "Feynman Lectures Amended". Journal of Theoretics, **6-6**,2 (2004)

15

J. Guala-Valverde, Physics, N° 14 in [www.andrijar.com](http://www.andrijar.com)

16

W.K.H. Panofsky & M. Phillips, "Classical Electricity and Magnetism", Addison-Wesley, New York (1955)

17

R. Feynman, "Feynman Lectures on Physics", Addison-Wesley, New York (1964)

18

W.K.H. Panofsky. Private communication, letter to J. Guala-Valverde (Jan1995)

19

J. Guala-Valverde. "*Distant Matter in Physics*". Annales Fondation Louis de Broglie, **29** N°4, 1 (2004)

20

[belfman@chipcenter.com](mailto:belfman@chipcenter.com) , <http://archive.chipcenter.com> , <http://www.ga.com> , [willcreedon@ga.com](mailto:willcreedon@ga.com) .

21

J. Guala-Valverde. "*Braking Force and Energetics in Homopolar Generators*". Spacetime & Substance Journal, **5** N°2, 94 (2004)

22

[www.teslatech.info](http://www.teslatech.info) , [www.amasci.com](http://www.amasci.com) , [www.trunkerton.fsnet.co.uk](http://www.trunkerton.fsnet.co.uk) , [www.depalma.pair.com](http://www.depalma.pair.com)

23

H. Montgomery. "*Current Flow Patterns in a Faraday Disk*". European Journal of Physics, **25**, 171 (2003)

24

J. Guala-Valverde. "*Comments on Montgomery Paper*". Apeiron **11** , 327 (2004)

25

J. Guala-Valverde. "*Lorentz Force and Rotational Relativity*". Journal of Theoretics, **6-5**,1 (2004)

26

G.R. Dixon. "*Electromagnetism and Rotational Relativity*". [www.maxwellsociety.net](http://www.maxwellsociety.net)

27

P. and N. Graneau, « *Newtonian Electrodynamics* », Chapters 4,5. World Scientific Pub. Co. Singapore (1996)

28

A.K.T. Assis, "*WEBER ELECTRODYNAMICS*", Kluwer, Dordrecht (1994)

29

A.K.T. Assis and D.S. Thober, *Frontiers of Fundamental Physics*, Plenum NY, 409 (1994)

30

L. Page & N. I. Adams, "*Principles of Electricity*", Chapter 4. Van Nostrand, NY (1949).