

TÍTULO: La Paradoja del disco de Faraday

Centro: British School Xativa

Curso y Ciclo: 2 BAC

Tutor/a: Raúl Lacomba Perales

Categoría de concurso: FÍSICA

Alumnado: Óscar Nieto Val, Roberto Sisternes Calatayud, Sergi Tudela Tomás

1. Resumen breve del proyecto y objetivos

En esta práctica presentaremos un montaje para la demostración de la denominada paradoja del disco de Faraday¹. Así mismo, haremos medidas en diferentes disposiciones y comprobaremos si se cumple el modelo teórico propuesto².

2. Material y montaje

- *Disco conductor (aluminio ó cobre).
- *Imán cilíndrico.
- *Motor con eje y sistema de alimentación para producir las diferentes rotaciones.
- *Cableado y contactos tipo cepillo.
- *Voltímetro/Osciloscopio

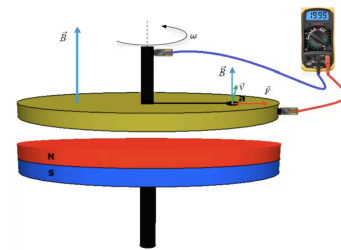


Figura 1: Esquema experimental

3. Fundamentación: Principios físicos involucrados y su relación con aplicaciones tecnológicas

La paradoja del disco de Faraday surge en el contexto de la inducción electromagnética cuando se analiza un disco conductor que rota en presencia de un campo magnético estacionario. Experimentalmente se observa que, al hacer girar un disco conductor de radio R inmerso en un campo magnético uniforme \mathbf{B} perpendicular a su plano, aparece una diferencia de potencial entre el centro y el borde del disco, aun cuando el flujo magnético a través del circuito externo permanece constante.

Desde la formulación clásica de la ley de Faraday-Lenz:

$$\varepsilon_{\text{flujo}} = -\Delta\phi/\Delta t \quad (1)$$

podría esperarse que no se indujera ninguna fuerza electromotriz (FEM), ya que el flujo magnético no varía en el tiempo. Sin embargo, el experimento muestra de manera inequívoca la existencia de una FEM medible. Esta aparente contradicción constituye la llamada paradoja del disco de Faraday.

La paradoja se intensifica al observar que la FEM persiste incluso cuando el imán y el disco rotan solidariamente, mientras que no aparece cuando solo gira el imán y el disco permanece en reposo (ver Figura 2). Esto demuestra que el fenómeno no depende del movimiento relativo entre imán y conductor, ni puede explicarse mediante la idea de "líneas de campo que giran".

La resolución de esta aparente paradoja² requiere emplear la expresión general de la fuerza electromotriz, que incluye no solo la contribución de campos eléctricos inducidos, sino también el efecto de la fuerza de Lorentz sobre cargas en movimiento. En el disco en rotación, los portadores de carga se desplazan con velocidad tangencial dentro del campo magnético estacionario experimentando la fuerza radial:

$$\mathbf{F}_m = q \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2)$$

que es la responsable de la separación de cargas y de la diferencia de potencial observada.

Esta diferencia de potencial entre la línea que une el centro del disco y su borde es igual a la denominada FEM, que se puede calcular como el trabajo por unidad de carga realizado por (2) sobre las cargas en movimiento a lo largo de dicha línea en la dirección radial:

$$\Delta V_{0 \rightarrow R} = \varepsilon_{\text{motriz}} = \int_0^R (\mathbf{F}_m/q) \cdot d\mathbf{r} = \int_0^R (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{r} \quad (3)$$

Teniendo en cuenta que \mathbf{v} y \mathbf{B} son perpendiculares entre sí, y el resultado de su producto vectorial es paralelo al $d\mathbf{r}$, nos quedará:

$$\Delta V_{0 \rightarrow R} = \epsilon_{\text{motriz}} = \int_0^R vB \, dr \quad (4)$$

Finalmente, expresando la velocidad en términos de la velocidad angular de rotación del sistema, ω , que consideramos constante, obtenemos:

$$\Delta V_{0 \rightarrow R} = \epsilon_{\text{motriz}} = \int_0^R r\omega B \, dr = (1/2)\omega BR^2 \quad (5)$$

4. Funcionamiento y Resultados: observaciones y medidas.

En primer lugar, emplearemos el esquema experimental mostrado en la *Figura 1* para llevar a cabo la demostración de tres casos (ver *Figura 2*):

Caso 1º: Imán estacionario + Conductor en rotación

Caso 2º: Imán en rotación + Conductor en rotación

Caso 3º: Imán en rotación + Conductor estacionario

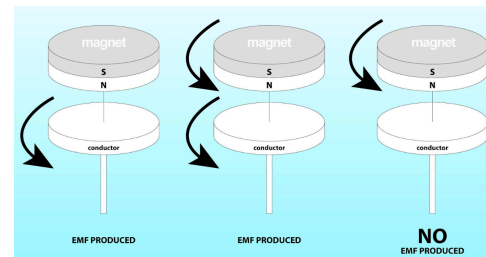


Figura 2: Los tres diferentes movimientos relativos entre el disco conductor y el imán para la demostración.

En la *Figura 2* se resumen los casos y los resultados esperados.

Por otro lado, en los casos en los que se produce FEM, comprobaremos que se cumple el modelo propuesto en la sección 3. En particular mediremos diferentes FEM para sus correspondientes velocidades angulares, ω . De acuerdo con la expresión (5), estos datos experimentales deben ajustarse a una línea recta en un gráfico 'FEM vs ω '. El gradiente del ajuste por mínimos cuadrados nos permitirá obtener el valor de la magnitud del campo magnético del imán, B , conocido el radio del disco conductor, R .

5. Conclusiones

Las paradojas en Física constituyen un punto de inflexión para el avance y descubrimiento de nuevas teorías. La paradoja del disco de Faraday es un buen ejemplo de este hecho. La clave para su comprensión reside en reconocer que la "clásica" ley de Faraday-Lenz en términos del cambio en el flujo magnético es una forma particular, válida para los ejemplos clásicos que se estudian en el bachillerato de circuitos rígidos y estacionarios sumergidos en campos magnéticos que varían con el tiempo (ϵ_{flujo}). Esta ley debe de extenderse en el caso de circuitos en movimiento relativo, en los que para algún observador el flujo magnético no varía con el tiempo, pero aún así aparece una corriente (ϵ_{motriz}). En estos casos hay que sumar el efecto de arrastre en los portadores de carga producido por la fuerza de Lorentz, que da lugar a una FEM la cual 'inducirá' una corriente. Esto supone un avance hacia una ley de Faraday más general:

$$\epsilon_{\text{Total}} = \epsilon_{\text{flujo}} + \epsilon_{\text{motriz}} \quad (6)$$

Este tipo de paradojas fueron el germen de la teoría de la relatividad especial de Einstein que recordemos se publicó con el nombre "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento", es decir, Einstein se planteó como de una vez por todas solucionar las paradojas que se planteaban en esa época en electrodinámica (siendo la paradoja del disco de Faraday una de ellas), llegando a la conclusión de que los campos magnéticos y eléctricos se podían manifestar de forma diferente dependiendo del estado de movimiento del observador.

Finalmente comentar que el principio estudiado tiene aplicaciones tecnológicas, por ejemplo, es la base de los generadores homopolares, empleados en aplicaciones que requieren corrientes elevadas y diseños mecánicos simples y robustos.

6. Bibliografía

1 <https://www.youtube.com/watch?v=gduYoT9sMaE>

2 Is Faraday's Disk Dynamo a Flux-Rule Exception? K. McDonald (2019). pdf at <https://kirkmc.d.princeton.edu/examples/faradaydisk.pdf>