

## Contribución al estudio de las corrientes parásitas en un anillo de Thomson

Felipe Garay,<sup>1</sup> Víctor Armijo, Sergio Serrano

### RESUMEN

Las corrientes parásitas inducidas en metales por un campo magnético variable, siempre constituyen un tema de interés a nivel teórico y práctico (contadores de luz, hornos, detectores de metales), así como en la enseñanza de la Física.

Esas corrientes se producen, por ejemplo, mediante un montaje del tipo del anillo de Thomson: cuando este núcleo se alarga sobresaliendo de la bobina, para introducir un anillo, frecuentemente de aluminio, aparece el fenómeno de levitación magnética debido a la repulsión entre la corriente de la bobina y la inducida en el anillo.

Nuestro objetivo con este trabajo se centra en obtener la forma exponencial decreciente de la fuerza repulsiva que empuja al anillo frente a la altura de equilibrio que este alcanza. Para ello se realizaron los siguientes experimentos:

1. Estudio de la fuerza repulsiva sobre el anillo, con relación a la altura dentro del núcleo (se introdujo un método novedoso, pues no se necesita voltear el montaje bobina-anillo).
2. Estudio del efecto disipativo de la corriente en el anillo, analizando el aumento de temperatura en un recipiente con agua, receptor del calor generado por el anillo. Adicionalmente, se proponen métodos para estudiar la frecuencia de oscilación del anillo y el desfase entre la corriente en él, en relación con la inductora.

Palabras clave: *corrientes parásitas, fenómeno de levitación magnética, efecto disipativo de la corriente.*

---

<sup>1</sup> Universidad Nacional Autónoma de Honduras. Facultad de Ciencias, Escuela de Física. Correo electrónico: felipe.jose.garay@gmail.com

## ABSTRACT

The eddy currents induced in metals by a variable magnetic field are always a topic of interest, both theoretical and practical (electricity meters, furnaces, metal detectors) and in Physical teaching.

These flows occur, for example, a mounting ring Thomson type: when this core projecting from the coil extends to introduce a ring, often aluminum, appears magnetic levitation phenomenon due to repulsion between the coil current and the induced in the ring.

Our objective with this work has focused on obtaining the decreasing exponentially repulsive force that pushes the ring vs. height it reaches equilibrium. We carry out the following experiments:

1. Study of the repulsive force on the ring, in relation to height in the core (here we introduce a novel method for not need to turn the coil-ring assembly).
2. Study dissipative effect of the current in the ring, analyzing the temperature rise in container with water, heat generated by receiver ring. Additionally, we propose methods to study the oscillation frequency of the ring and the gap between the current in it in relation to the inducer.

Key words: *eddy currents, magnetic levitation phenomenon, dissipative effect of the current.*

## INTRODUCCIÓN

La inducción electromagnética es quizá uno de los fenómenos más impactantes del electromagnetismo y también de los más útiles; en el caso del llamado anillo de Thomson, la inducción provoca la levitación del anillo. Para producir este efecto se dispone de una bobina dotada de un núcleo de hierro (una barra vertical) que sobresale de la bobina, con una longitud de casi el triple que la parte interior a la bobina (ver imagen 1).

La bobina se alimenta con corriente alterna (se usaron 260 V, de la red externa). Al introducir cualquiera de los anillos de aluminio con los que se trabajan (con un hoyo siempre algo más ancho que el diámetro del núcleo sobresaliente), este se levanta sobre el núcleo hasta que su peso lo detiene, quedando en equilibrio de levitación.

En general, la bibliografía referente al tema<sup>2</sup> establece que la fuerza de repulsión magnética que sufre (hacia arriba) el anillo, ha de disminuir exponencialmente con la altura; aunque en la bibliografía consultada no aparece un método específico para medir esa fuerza.

Algunas veces, se proponen opciones muy sofisticadas para medir la fuerza, pero ni así, según la amplia bibliografía consultada, se consigue establecer de forma experimental el esperado decrecimiento exponencial. En consecuencia, en este trabajo se encuentran dos formas alternas de tal tipo de decrecimiento ligado directamente, en ambas situaciones, al decrecimiento exponencial de la corriente parásita inducida en el anillo.

Imagen 1. Detalle del montaje



---

<sup>2</sup> Ver: Álvaro Esneider, J. R. (2004). Anillo de Thomson. *Revista Colombiana de Física*, (36), 1; Franco, A. G. (2009). Curso interactivo de Física en internet. Disponible en: [http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/\\_elecmagnet/induccion/anillo/anillo.xhtml](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/_elecmagnet/induccion/anillo/anillo.xhtml)

## OBTENCIÓN TEÓRICA DE LA FUERZA DE REPULSIÓN SOBRE EL ANILLO

La corriente que alimentó la bobina (la llamamos  $I_b$ ) fue la de red a 60 Hz y 260 V; por tanto, podemos escribir:  $I_b = I_{0b} \sin \omega t$  (1).

Por otro lado, el campo magnético responsable de la fuerza vertical que levanta el anillo por encima de la bobina, proviene del componente radial del campo creado por la propia bobina y su núcleo (las componentes azimutal y vertical no pueden producir fuerza vertical). El campo completo que genera la bobina es útil presentarlo en la forma siguiente:

$$\vec{B} = B_\rho \hat{\rho} + B_z \hat{z} + B_\varphi \hat{\varphi} = \mu n I_b(t) [f_\rho(\rho, z) \hat{\rho} + f_z(\rho, z) \hat{z} + f_\varphi(\rho, z) \hat{\varphi}] \quad (2)^3$$

Donde:

1. Las funciones  $f_\rho(\rho, z)$ ,  $f_z(\rho, z)$  y  $f_\varphi(\rho, z)$ , que incluyen integrales elípticas, de resolución numérica, están en relación directa con la geometría del sistema y, por supuesto, al no depender del tiempo, no tienen efectos en la inducción.
2.  $n$  e  $I_b(t)$  son respectivamente el número de vueltas por unidad de longitud de la bobina y la corriente que la alimenta (la de la red, ya antes mencionada, dependiente del tiempo).

De los dos componentes del campo que intervienen:

1. El componente vertical es responsable de la inducción en el anillo (la otra –por ser tangencial al plano de cualquier espira de la bobina- no puede producir flujo):

$$(\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{a} = \int \vec{B} \cdot da \hat{z} = \int B_z da);$$

2. La radial es la causante de la fuerza que hace levitar el anillo, su valor se calcula así:

$$\vec{F} = I_a \int d\vec{s} \times \vec{B} = I_a \int r_a d\varphi \hat{\varphi} \times \vec{B} = \hat{z} I_a r_a \int d\varphi B_\rho = 2\pi I_a r_a B_\rho \hat{z} \quad (3)$$

3. No incluye el término con  $\int d\varphi \hat{\varphi} \times B_\varphi \hat{\varphi}$ , dado que evidentemente es nulo.

<sup>3</sup> La casi totalidad de los puntos sobre cualquier sección circular del anillo (perpendicular al núcleo de hierro) 'recibe' un campo en que la permeabilidad magnética es la del hierro (signada con  $\mu$ ) en la pequeña corona de aire entre el anillo y el núcleo y sobre el propio anillo, la permeabilidad es  $\mu_0$ .

4. Tampoco incluye el componente  $I_a r_a (\int d\phi \hat{\phi} \times B_z \hat{z})$  pues la pequeña fuerza radial sobre cada elemento de longitud del anillo termina en una fuerza total nula, asumiendo que la resistencia mecánica del anillo evita la deformación del mismo (de nuevo recordamos que los subíndices 'a' indican valores para el anillo:  $I_a$ , corriente inducida en el anillo;  $r_a$  radio del anillo).
5. La única integral sobreviviente entrega un resultado sencillo, ya que  $B_\rho \propto f_\rho(\rho, z)$  permite ser extraído de la integral.

Teniendo en cuenta en (3), la expresión de (2):

$$F(z, t) = 2\pi\mu r_a n I_b(t) I_a(t) f_\rho(r_a, z) \quad (4)$$

Expresión análoga a la de la ecuación (3), en Hall, 1997,<sup>4</sup> en la que es útil notar que intervienen las dos corrientes, la inductora y la inducida.

El cálculo de la corriente inducida sobre el anillo es un trabajo sencillo: se trata de resolver la 'ecuación de circuito' para el anillo:<sup>5</sup>

$$M \frac{di_b}{dt} = L \frac{di_a}{dt} + I_a R$$

Lo que recuerda que el voltaje inducido en el anillo por la corriente de la bobina –dependiente, a través del coeficiente  $M$ , de la “relación geométrica” anillo-bobina– se invierte en una autoinducción en la bobina y en una caída de voltaje debido al efecto resistivo. Se trata de resolver:

$$L \frac{di_a}{dt} + I_a R = M I_{0b} \omega \cos \omega t.$$

Como es bien sabido, la solución tiene la forma:<sup>6</sup>  $I_a = I_{0a} \cos(\omega t - \delta) + A e^{-(R/L)t}$  en donde el término exponencial es un transitorio que en relativo poco tiempo no tiene influencia y las constantes  $I_{0a}$  y  $\delta$ , dependientes de las condiciones iniciales, son:

<sup>4</sup> Hall, J. (feb., 1997). Forces on the jumping ring. *The Physics Teacher*, 35.

<sup>5</sup> El planteamiento de la ecuación de circuito aparece, por ejemplo, en: Franco, A. G. (2009). Curso interactivo de Física en internet.

<sup>6</sup> Para la solución de la ecuación de circuito se aplica la técnica de las e.d.o. con coeficientes constantes (como también puede leerse en la ref. aludida en la cita 2).

$$I_{0a} = \frac{M\omega I_{0b}}{\sqrt{(L\omega)^2 + R^2}} \text{ y } \delta = \tan(L\omega/R)^7$$

Tras desarrollar el  $\cos(\omega t - \delta)$  es interesante leer la corriente en el anillo en una forma muy útil para la posterior interpretación:

$$I_a = \frac{M\omega I_{0b}}{\sqrt{(L\omega)^2 + R^2}} \left( \frac{R}{\sqrt{(L\omega)^2 + R^2}} \cos \omega t + \frac{L\omega}{\sqrt{(L\omega)^2 + R^2}} \sin \omega t \right) \quad (5)$$

Lo cual nos lleva a una expresión para la fuerza de (4):

$$F(z, t) = 2\pi\mu r_a n \frac{M\omega I_{0b}^2}{(L\omega)^2 + R^2} * (R \sin \omega t \cos \omega t + L\omega \sin^2 \omega t) f_\rho(r_a, z) \quad (6)$$

Donde, además de  $f_\rho(r_a, z)$  también  $M$  es función de la altura,  $z$ , que alcance el anillo:

$$M = \frac{\Phi_{bob \rightarrow ani}}{I_{bob}} = \frac{\iint B_z da}{I_b} = N \left( \mu n \int_0^{r_b} f_z(\rho', z) \rho' d\rho' \int_0^{2\pi} d\phi' \right) = \mu 2\pi n N \int_0^{r_b} f_z(\rho', z) \rho' d\rho'$$

En (6) encontramos una fuerza oscilante que provoca vibración en el anillo. El promedio temporal es:

$$\langle F(z) \rangle_{(T=2\pi/\omega)} = \mu 2\pi r_a n \frac{M(z)\omega I_{0b}^2}{(L\omega)^2 + R^2} * \left( \frac{1}{2} R \langle \sin 2\omega t \rangle + L\omega \langle \sin^2 \omega t \rangle \right) f_\rho(r_a, z)$$

Que (de acuerdo con las referencias 1 y 3) nos lleva<sup>8</sup> a:

$$\langle F(z) \rangle_{(T=2\pi/\omega)} = \frac{\mu\pi r_a n M(z)\omega L\omega I_{0b}^2}{(L\omega)^2 + R^2} f_\rho(r_a, z) \equiv \mu\pi r_a n \omega^2 I_{0b}^2 \frac{M(z)}{L} f_\rho(r_a, z) \sin^2 \delta \quad (7)$$

La presencia de la  $L$  es la causa de la fuerza neta hacia arriba, debido al desfase que impone en la corriente sobre el anillo, este puramente resistivo solo habría presentado el término proporcional a  $\sin \omega t \cos \omega t$ , cuyo promedio temporal es cero.

Por otro lado (4), se muestra que intervienen ambas corrientes, las cuales están con

<sup>7</sup> Ver la ecuación (2) de: Paul, J. H.; Tjossem, E. C. (April 2011). Optimizing Thomson's jumping ring. *Am. J. Physics*, 79(4).

<sup>8</sup>  $\langle \sin 2\omega t \rangle_{(t=2\pi/\omega)} = 0$  y  $\langle \sin^2 \omega t \rangle_{(t=2\pi/\omega)} = 1/2$

relación inmediata a las respectivas componentes vertical y radial del campo, y que esas corrientes estén desfasadas, propone que los referidos componentes vertical y radial, asimismo, lo estén (se encuentra aquí otra manera de entender la causa de una fuerza neta no nula).<sup>9</sup>

## PRIMERA INFORMACIÓN EXPERIMENTAL SOBRE LA CORRIENTE INDUCIDA

### *Fuerza dependiente de la altura*

Se preparó un montaje, como el que se muestra en la figura 1, en el que un sistema de hilos móviles y un contrapeso permitía colocar el anillo tenso a cualquier altura sobre el tubo (el primer anillo que se ve solo sirve de soporte mediador, el que está inserto en el tubo inmediatamente encima de la bobina es el que se usó para el experimento). En este montaje radica una parte de la novedad del presente trabajo con relación a otros publicados sobre el mismo tema.

Se usó una bobina, con diámetros: interior de 10 cm, exterior de 12 cm y una altura de 22 cm, arrollada con 6000 vueltas de alambre de cobre esmaltado, que presenta una resistencia total de 167  $\Omega$ .

El hilo vertical conecta el anillo de apoyo con un contrapeso acoplado en la parte de la balanza opuesta al plato de la misma. Manteniendo sin disparar la balanza, se colocó el anillo de Thomson (de aluminio) a una altura por encima de la de equilibrio. Se disparó la balanza y esta señaló la fuerza hacia abajo ejercida por el anillo, resultado del peso del anillo y del contrapeso menos la fuerza magnética de repulsión. En la posición de equilibrio, la fuerza magnética, evidentemente, equivale al peso del anillo; al ir levantando el anillo a diferentes alturas, realizando para cada altura el procedimiento antes descrito, se pudieron obtener los distintos valores de la fuerza.

Se utilizaron cuatro anillos de alturas y espesores distintos, pero todos con el mismo radio. En su totalidad se observó decaimiento, esencialmente exponencial, de la fuerza magnética repulsiva, respecto de la altura del anillo sobre el núcleo de hierro. La ecuación empírica para la fuerza se presenta, no importa cuál anillo se utilice, en la forma general que sigue:

$$F_i = C_i * \exp(-k_i z) \xrightarrow[\text{con Log}]{\text{Linealizando}} \ln F_i = \ln C_i - k_i z \quad (8)$$

<sup>9</sup> Álvaro Esneider, J. R. (2004). Anillo de Thomson. *Revista Colombiana de Física*, (36), 1. El autor propone, en el apéndice VII, el desfasaje entre los componentes del campo.

$\ln F_i = \ln C_i - k_i z$  (8) (el subíndice  $i$  distinguiría un anillo de otro).

Tabla 1. Datos de cada anillo y comprobación de igualdad entre masa ( $M_i$ ) y  $C_i$

Anillo	Altura (cm)	Espesor (mm)	Masa (g)	Valor de $C_i$ (g)
A1 (ALTO)	12.65	2.50	16.0	16.2
A2 (ALTO)	22.08	2.50	27.9	27.5
PL1 (PLANO)	2.61	4.86	5.9	5.3
PL2 (PLANO)	2.61	7.08	9.2	9.3

De un lado, el análisis directo de la fórmula indica que en;

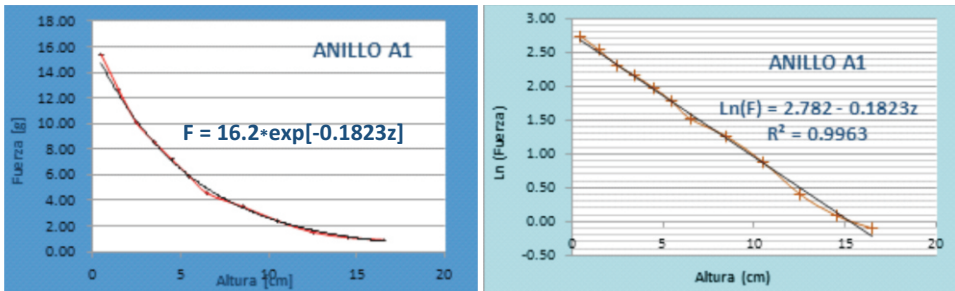
$z = 0$  (posición de equilibrio):  $F_i = C_i$ ;

de otro, la física nos señala que, efectivamente, la fuerza repulsiva en el equilibrio ha de igualar a la masa del anillo. Una comprobación de la validez de estos resultados se da mediante el cálculo del punto de corte de la recta –aludida en (7) – con el eje vertical ( $\ln F_i$ ); es decir, para cualquier anillo,  $i$ , se obtuvo que:

$C_i$  (intersección con el eje vertical)  $\approx$

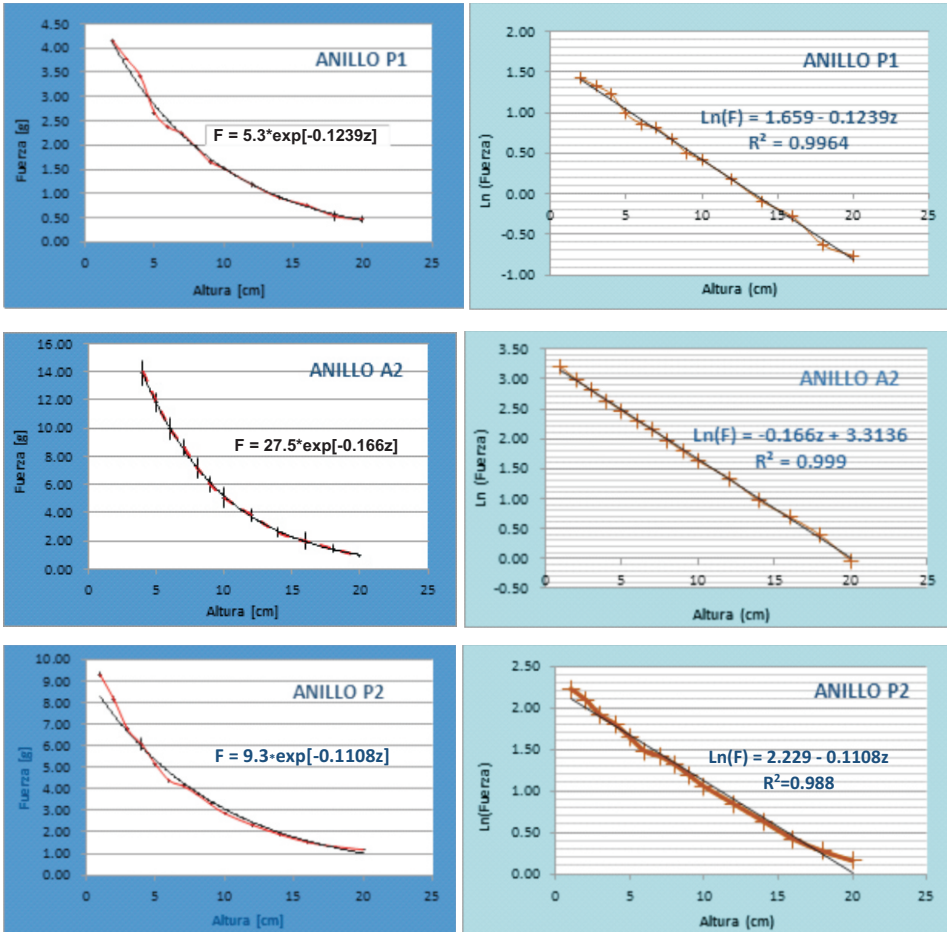
$M_a^i$  (masa de cada anillo, medida en la balanza) (ver tabla 1)

Gráfico 1. Fuerza de repulsión versus altura del anillo en el núcleo<sup>10</sup>



<sup>10</sup> Las gráficas de fondo celeste corresponden a la 'linealización' de las de fondo azul (para obtener así la constante  $k$  de decaimiento). En trazo negro delgado se incluyen las 'líneas de tendencia' exactas a la forma exponencial (azul oscuro) o lineal (celestes). Solo las exponenciales incluyen los errores experimentales, las cruces en las gráficas de fondo celeste marcan solo la posición del punto.





El análisis visual de las gráficas del gráfico 1, permite hacer las siguientes consideraciones:

1. Los anillos altos presentan un comportamiento de "mejor decaimiento exponencial" que los anillos planos, en los puntos relativamente próximos a la posición de equilibrio; probablemente, se debe a la mayor dificultad para mantenerlos en equilibrio en un plano completamente horizontal, lo cual provoca una pequeña pérdida de la simetría cilíndrica en la corriente inducida en ellos.
2. Los errores experimentales (en particular los de tipo estadístico) son pequeños.<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Esa 'pequeñez' impide apenas distinguirlos con claridad en la escala de las distintas gráficas: estos errores experimentales –salvo en el anillo A2– son del orden de las centésimas de gramo, mientras que las fuerzas de repulsión son del orden de los gramos. El error experimental en la altura es siempre 0.1 cm.

3. En general, la 'exponencialidad' de las gráficas de la izquierda o la equivalente 'linealidad' en las de la derecha, es buena (todos los coeficientes  $R^2$  son mayores que 0.99).
4. En las pequeñas separaciones del comportamiento exponencial (que de forma más o menos aleatoria aparecen) es bastante probable la influencia de los pequeños cambios, alrededor siempre de 260 V, en el voltaje eficaz de red que alimentaba la bobina durante las distintas mediciones.

Para encontrar el basamento teórico de ese comportamiento exponencial se precisa, evidentemente, el tratamiento matemático de las magnitudes, notadas a través de las funciones  $f$ , que de modo multiplicativo aparecen en la fórmula (6) y que, como ya se dijo, incluyen integrales elípticas, a saber:

$$M(z) = \mu 2\pi n \tilde{N} \int_0^{r_b} f_z(\rho', z) \rho' d\rho' \text{ y } f_\rho(r_a, z).$$

En síntesis, se requiere análisis numérico de esas integrales y después aproximaciones adecuadas, no obstante, eso no fue el objeto del presente trabajo, el cual se mantuvo a un nivel puramente experimental.

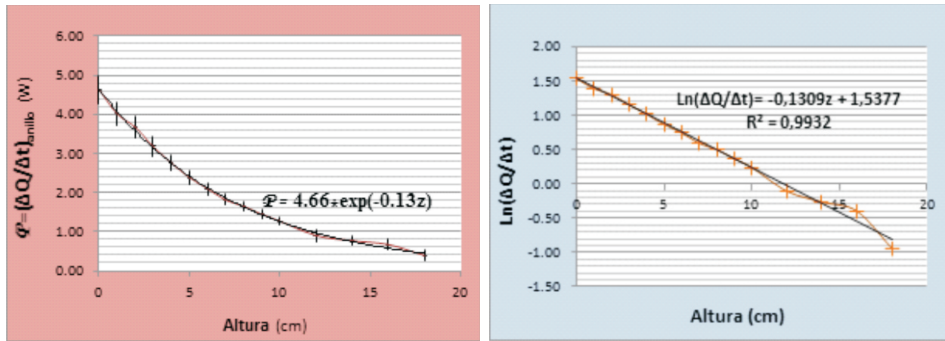
## **SEGUNDA INFORMACIÓN SOBRE LA CORRIENTE INDUCIDA: POTENCIA CALORÍFICA DISIPADA POR EL ANILLO, SEGÚN SU ALTURA EN EL NÚCLEO**

Para tener una información alternativa sobre el comportamiento de la corriente inducida conforme aumenta la altura del anillo en el núcleo, se analizó el efecto resistivo-disipativo de la corriente en el anillo.

Para ello se usó un montaje en el que se dispuso un pequeño calorímetro, construido especialmente para las mediciones, para lo cual debe cumplir con dos requisitos:

1. Que fuera de alto nivel aislante (para contener la fuerte disipación calorífica del núcleo y minimizar el calor que desde el agua fuera expulsado al exterior del calorímetro).
2. Lo suficientemente pequeño para que la cantidad de agua –receptora del calor disipado por el anillo- permitiera un aumento relativamente rápido y notoriamente visible de la temperatura. Los resultados se muestran en la gráfico 2.

Gráfico 2. Potencia calorífica disipada por el anillo a diferentes alturas: gráfica normal (izquierda) y gráfica logarítmica (derecha)



## COMBINACIÓN DE RESULTADOS

Si se recogen los distintos resultados, se tiene que:

1. De lo obtenido por la disipación de calor:

a. Al igualar la expresión para la potencia disipada en corriente alterna con el calor absorbido por el agua:

$$I_a^2 Z = mc \frac{\Delta T}{\Delta t} \Rightarrow I_a \propto \left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)^{1/2} \quad (9)$$

b. Del resultado experimental anterior (mostrado en la fig.3) se obtiene que la disipación calorífica presenta también un decaimiento exponencial, así que:

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)^{\frac{1}{2}} \propto \exp(-k_p z) \Rightarrow I_a \propto \exp\left(-\frac{1}{2} k_p z\right) \quad (10)$$

donde:  $k_p = 0,131$  (ver la figura 3, izqda)

2. De lo relativo a la fuerza a distintas alturas:

a. Experimentalmente:

$$F(z) \propto \exp(-k_f z) \quad (11)$$

donde:  $k_f = 0,182$  , para el anillo A1 (ver la primera de la serie de gráfico 1)

b. Y de la fórmula (4):  $F(z, t) = 2\pi\mu r_a n l_b(t) I_a(t) f_p(r_a, z)$

En ella, tanto  $I_a$  (a través de  $f_z$ , incluida en el coef. de inductancia mutua,  $M$ ) como  $f_p$  son funciones que necesariamente decrecen con la altura  $z$ . Asumiendo, debido al resultado experimental un decaimiento exponencial, podríamos escribir:

$$I_a \propto \exp(-k_M z) \quad (12) \quad \text{y} \quad f_p \propto \exp(-k_f z) \quad (13)$$

3. Combinando (9), (10), (11), (12) y (13):

a.  $F(z) = F(0) \exp(-k_F z) = F(0) \exp\left(-\frac{1}{2} k_P z\right) \exp(-k_f z)$

b. De lo anterior:  $k_F = \frac{1}{2} k_P + k_f$

c. En fin, los valores empíricos, relativos a los distintos coeficientes de decaimiento,<sup>12</sup> serán:

$$k_F = 0.182; \quad k_P = 0.131;$$

$$k_f = 0.117 \text{ y}$$

$$k_{(rel. \ a \ I_a)} \left( = \frac{1}{2} k_P \right) = 0.065$$

## IDEAS PARA OBTENER OTROS RESULTADOS EXPERIMENTALES

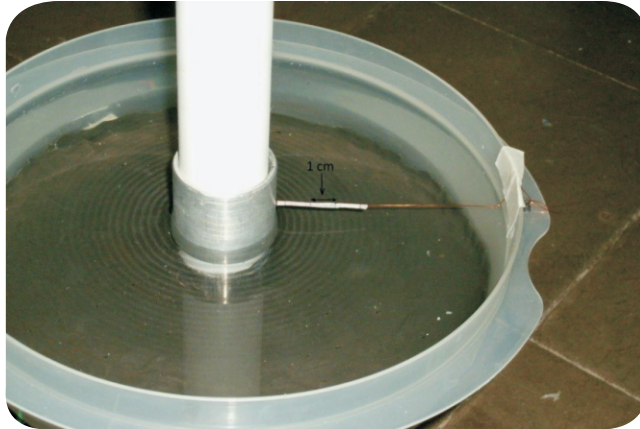
En este trabajo de caracterización de la corriente inducida en el anillo de Thomson, se adjuntan dos pruebas experimentales adicionales, que se presentan como avance para futuros trabajos en el tema.

Para comprobar de un modo sencillo la vibración del anillo, debido a la fuerza de tipo oscilante a que está sometido, se preparó un recipiente de sección circular con agua, en el que se sumergió el anillo.

Se formaron unas ondas estacionarias circulares, casi perfectas (ver imagen 2). El estudio de la tensión superficial a que las mismas están sometidas, permitirá la constatación experimental de la frecuencia de oscilación, esperable en  $2\omega$ .

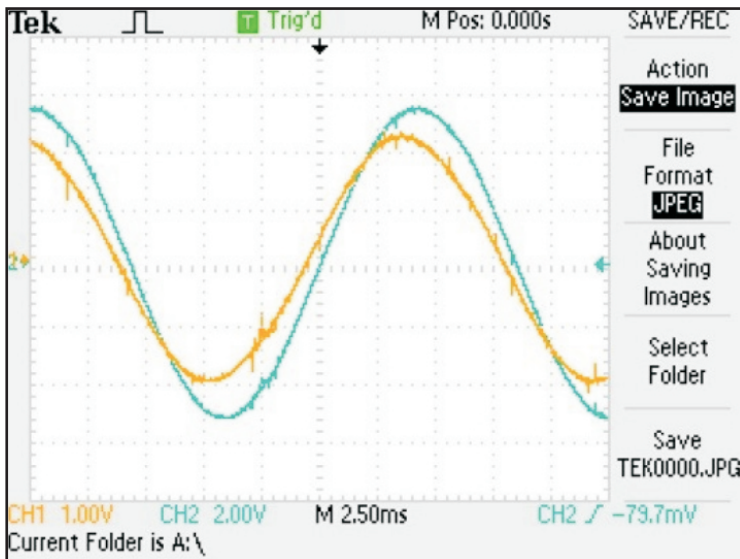
<sup>12</sup> Los valores que se dan para los distintos coeficientes empíricos,  $k$ , de decaimiento de las tres cantidades son relativos únicamente al anillo A1, para el cual se tiene la información de potencia disipada por efecto resistivo.

Imagen 2. Recipiente con agua que muestra las ondas estacionarias producida por el anillo vibrante, el sencillo montaje muestra cómo poder medir la longitud de onda.



Finalmente, se incluye un modo sencillo de medir el desfase entre la corriente inducida en el anillo y la corriente de red alimentadora de la bobina: mediante un osciloscopio especializado, con dos de los cuatro canales de que dispone: colocando, para obtener la forma de la señal inducida, una punta del osciloscopio sobre el anillo y la otra en la tierra del mismo (ver gráfico 3).<sup>13</sup>

Gráfico 3. Comportamiento experimental obtenido



## CONCLUSIONES

1. Como una primera aportación a los muchos estudios sobre el anillo de Thomson, se ha realizado un análisis de la relación fuerza de repulsión-altura,<sup>13</sup> mediante un método experimental novedoso, no encontrado, como ya se dijo, en las publicaciones consultadas al respecto. El estudio añade un componente extra de comprobación de la validez del decaimiento exponencial, al haber sido realizado para cuatro anillos de dimensiones diferentes (llamados A1, A2, P1 y P2, cuyas dimensiones se consignaron en la tabla 1), validez que, por otro lado, tiene un fuerte apoyo por la coincidencia experimental que se muestra en la tabla 1.
2. Se considera igualmente importante haber encontrado el esperado decaimiento exponencial de la corriente inducida por dos caminos distintos, señalados en los títulos de las secciones 3 y 4.
3. Queda pendiente para un trabajo posterior el estudio numérico de las llamadas funciones  $f$ , que sirva para sustentar teóricamente la causa del decaimiento exponencial de la corriente inducida.<sup>14</sup>
4. Desde el punto de vista práctico, este trabajo es un aporte más que apunta a mejorar el conocimiento de las corrientes parásitas; corrientes de alto interés en la investigación y en la industria.

## BIBLIOGRAFÍA

- Álvaro Esneider, J. R. (2004). Anillo de Thomson. *Revista Colombiana de Física*, (36), 1.
- Bostock-Smith, J. (2008). The jumping ring and Lenz's Law. *Physics Education* 43, (3).
- Franco, A. G. (2009). (Recuperado el 22 de diciembre de 2011). Curso interactivo de Física en internet. Disponible en:  
[http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica\\_/elecmagnet/inducccion/anillo/anillo.xhtml](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica_/elecmagnet/inducccion/anillo/anillo.xhtml)
- Hall, J. (Feb. 1997). Forces on the jumping ring. *The Physics Teacher*, 35.
- Paul J. H. Tjossem, E. C. (2011). Optimizing Thomson's jumping ring. *Am. J. Physics* 79(4).
- Velimir Labinac, N. E.-K. (2006). Magnetic field of a cylindrical coil. *American Journal of Physics*, (74), 621.

---

<sup>13</sup> Por ejemplo en la ref. 3 se señala el comportamiento experimental que hemos obtenido, si bien sólo se indica que ése comportamiento ha de ser esperable, no se muestra ningún método de comprobación del mismo

<sup>14</sup> Puede encontrarse un trabajo muy interesante a este respecto en Velimir Labinac, Nataša Erceg, and DubravkaKotnik-Karuzaa),Magneticfield of a cylindricalcoil, enAmerican Journal of Physics, 2006.