

Caída de un imán por un tubo conductor y análisis de los pulsos inducidos en una espira exploradora

Martin, Laura laura_martin1@hotmail.com

Leibovich, Débora debbie@megabras.com

Laboratorio de física 2 - Diciembre 2000 - Universidad Favaloro
Facultad de Ingeniería, Ciencias Exactas y Naturales

En el presente trabajo, se analiza en detalle la forma del pulso de tensión inducida en una bobina cuando un imán permanente la atraviesa con diferentes velocidades. Luego, se estudia el perfil de velocidad del imán al caer por un tubo conductor, obteniéndose el valor de la velocidad terminal.

Introducción:

Si se deja caer un imán permanente a través de un tubo conductor (no ferromagnético), a pesar de no existir atracción magnética, la caída del imán se verá significativamente retardada. Mientras el imán cae por el tubo, el flujo magnético variable induce corrientes que a su vez originan una fuerza contramotriz que frena el imán. Como consecuencia de esto, el imán rápidamente alcanza una velocidad terminal.

- Para analizar este proceso de manera cuantitativa, se realiza en primer lugar un análisis teórico del pulso inducido en una bobina al ser atravesada por un imán permanente.
- El imán es considerado como compuesto por dos cargas magnéticas ficticias (“monopolos magnéticos”) de magnitud q_m y signos opuestos, separadas por una distancia L igual a la longitud del imán^[1,2]. Si m_B es el momento magnético dipolar del imán, entonces podemos escribir:

$$q_m^{\pm} = \pm m_B/L.$$

- El campo magnético creado por el monopolo positivo a una distancia r tiene magnitud:

$$B^+(r) = \mu_0 q_m^+ / (4\pi r^2).$$

- La fuerza electromotriz inducida en la bobina por este “monopolo magnético”, al moverse a lo largo del eje de dicha bobina, se obtiene de acuerdo a la ley de Faraday como la derivada del flujo magnético que la atraviesa, respecto del tiempo.

De esta manera es posible obtener una expresión que da el valor de la tensión generada en una espira de radio R y N vueltas cuando un imán, de momento m_B y longitud L , la atraviesa con una

velocidad v (ver referencia 2 para más detalles de cálculo). La fem inducida en la bobina viene dada por:

$$\varepsilon(z) = \frac{v \cdot N \cdot m_B \cdot R^2 \cdot \mu_0}{2L} \left\{ \frac{1}{\left((z + L/2)^2 + R^2 \right)^{3/2}} - \frac{1}{\left((z - L/2)^2 + R^2 \right)^{3/2}} \right\} \quad (1)$$

La figura 1 esquematiza las variables de la ecuación:

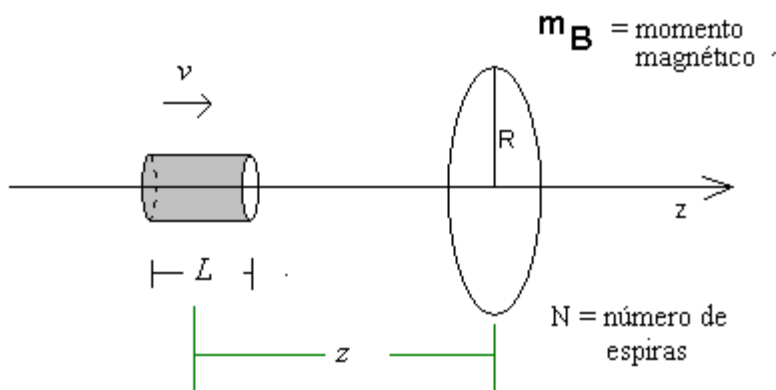


Figura 1. Esquema de las variables involucradas en el modelo teórico

Determinando z como función del tiempo, y su derivada temporal $v(t)$ se obtiene una expresión para el cálculo en forma teórica de $\varepsilon(t)$.

En este experimento tiene como objetivo:

- Estudiar la forma de los pulsos de tensión inducidos en las bobinas cuando el imán pasa a través de las mismas con distintas velocidades y compararlo con el modelo teórico.
- Medir la velocidad límite, v_L , que adquiere el imán al caer por el tubo de material conductor.

Arreglo experimental

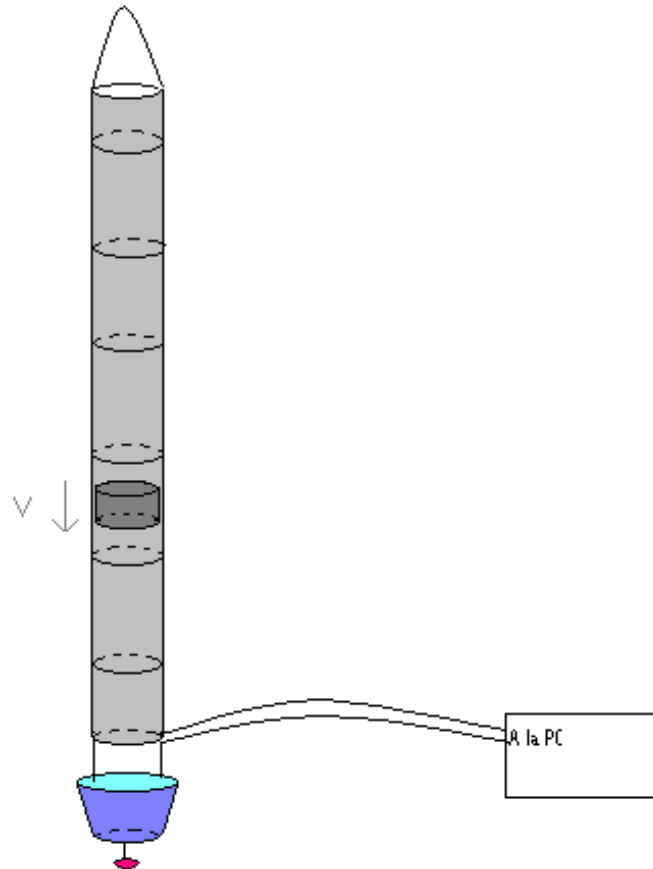


Figura 2. Diagrama del dispositivo experimental utilizado.

El arreglo experimental utilizado es el mostrado en la figura 2. Consiste en un tubo suspendido, al final del cual se cuelga un peso para mantener su verticalidad y un recipiente para recibir el imán. El experimento se realiza primero con un tubo de acrílico y luego con uno de aluminio.

Los tubos tienen arrollamientos espaciados entre sí (7.0 ± 0.1) cm, todos conectados en serie. Cada arrollamiento consta de 20 vueltas de alambre de cobre esmaltado de 0.15 mm de espesor.

Los dos extremos del bobinado se conectan a la entrada de una placa de adquisición de datos asociada a la PC (MPLI de Vernier). De esta manera, se registra la sucesión de pulsos de tensión generados al dejar caer el imán por el tubo. La frecuencia de muestreo usada es en ambos casos superior a 300 Hz.

El imán utilizado es de tierras raras y sus dimensiones se listan junto con las de los tubos utilizados, en la tabla 1.

Tubo de acrílico	
Diámetro interno	1.628B0.002 cm
Diámetro externo	1.670B0.002 cm
Tubo de aluminio	
Diámetro interno	1.282B0.002 cm
Diámetro externo	1.902B0.002 cm
Imán de tierras raras	
Radio	0.500B0.002 cm
Longitud	0.632B0.002 cm

Tabla 1. Dimensiones de los componentes utilizados

Resultados:

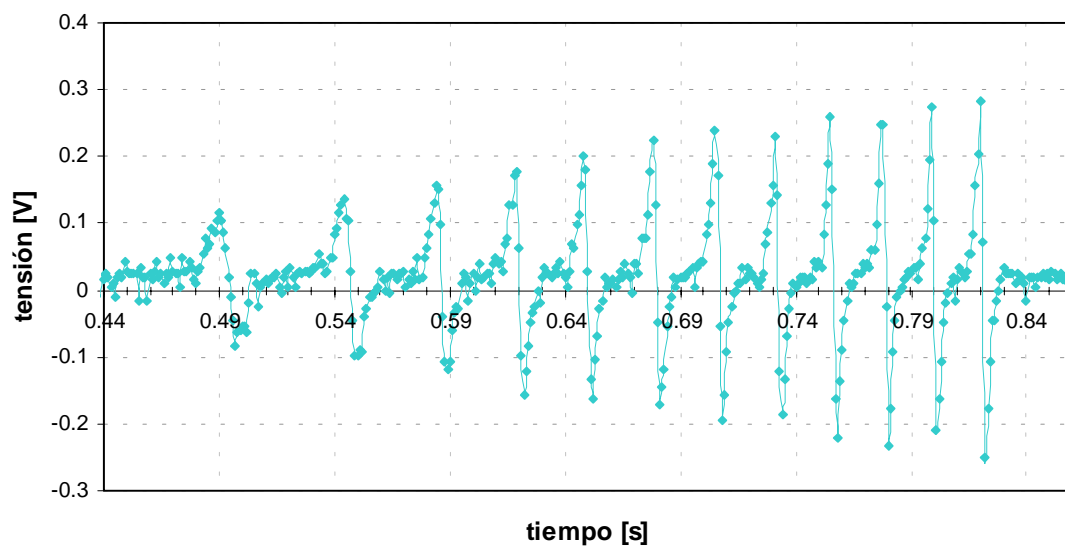


Figura 3. Representación gráfica de la tensión inducida en las bobinas del tubo de acrílico al ser atravesadas por el imán permanente.

Tubo no-conductor - acrílico: A partir de la figura 3 se puede obtener la posición del imán en función del tiempo. El cruce por cero de cada pulso indica el tiempo en el cual el imán pasa por el centro de cada bobina. Este tiempo se obtiene basándose en una aproximación lineal realizada sobre los puntos experimentales cerca de $\mathcal{E}(t)=0$. Dado que la distancia entre bobinas es conocida, a partir de estos datos se calcula el perfil de $z(t)$ del imán en el tubo.

Cualitativamente, se observa que a medida que aumenta la velocidad, la altura de los pulsos aumenta y éstos se angostan.

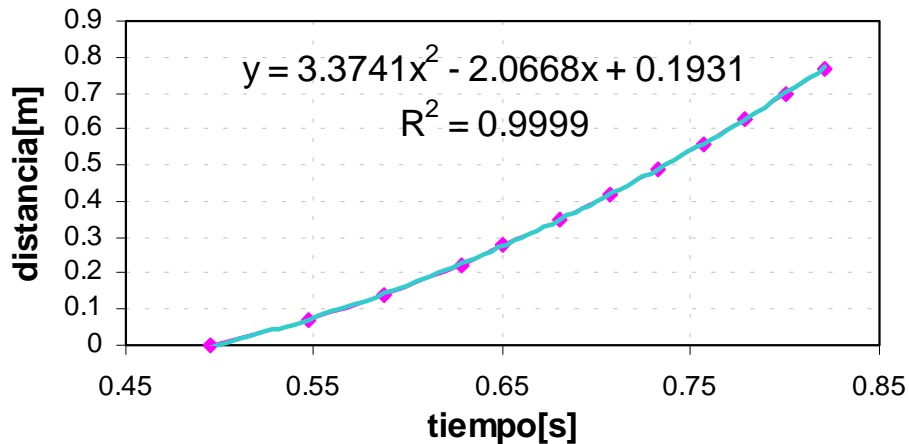


Figura 4. Representación gráfica de la distancia recorrida por el imán en función del tiempo durante su caída a través del tubo de acrílico. $v[m/s]=6.748.t-2$ y $\bar{v} \approx 2 m/s$.

En el gráfico de la figura 4 se observa que la caída del imán por el tubo no conductor es un movimiento acelerado. De aquí se obtiene una expresión de la velocidad en función del tiempo, que luego se utiliza para modelar los pulsos de la figura 2. También se calcula la magnitud de la aceleración a con la que cae el imán, siendo $a = 6.748 \text{ m/s}^2$. Este valor es menor que la aceleración de la gravedad $g \cong 9.81 \text{ m/s}^2$ debido a posibles roces con el tubo.

En la figura 5 se muestra la curva teórica de tensión en función del tiempo obtenida a partir del modelo planteado. El momento magnético m_B que mejor aproxima el modelo teórico a la curva medida es $m_B=0,91\text{Am}^2$.

Tubo conductor de aluminio: A diferencia de lo analizado para el tubo de acrílico, en la figura 6 se observa que los pulsos de tensión se hallan equiespaciados para el tubo de aluminio, indicando que la caída del imán es a velocidad constante. En este caso, la forma (relación alto-ancho) de los pulsos es similar para todas las bobinas, y su magnitud es de aproximadamente un orden de magnitud menor que para el tubo de acrílico.

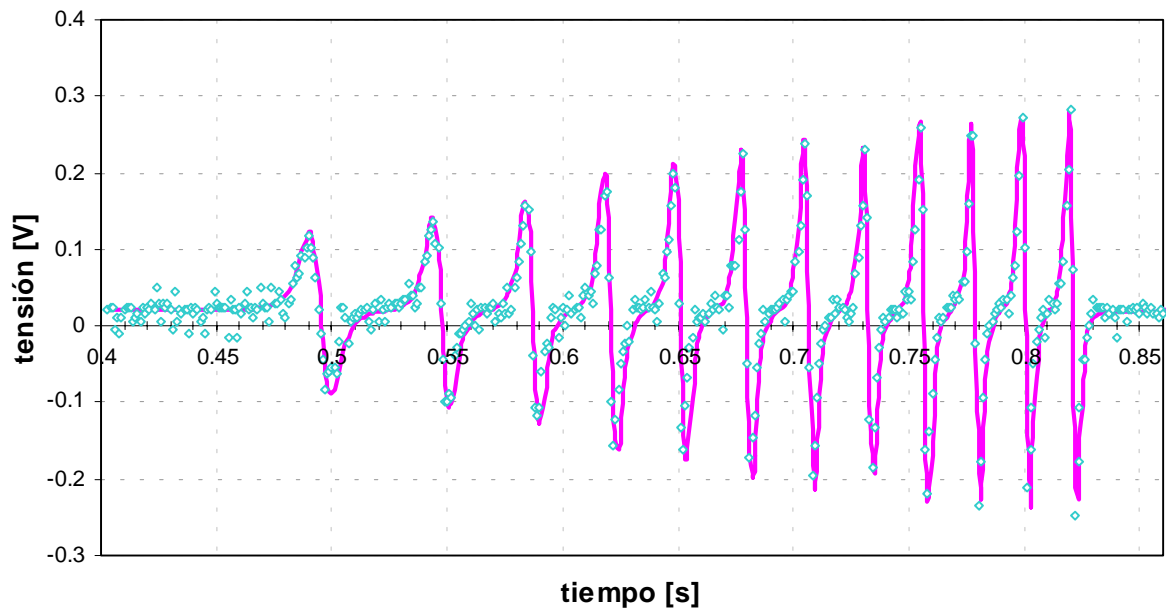


Figura 5. Superposición de las curvas obtenidas en forma experimental y teórica por el tubo de acrílico.

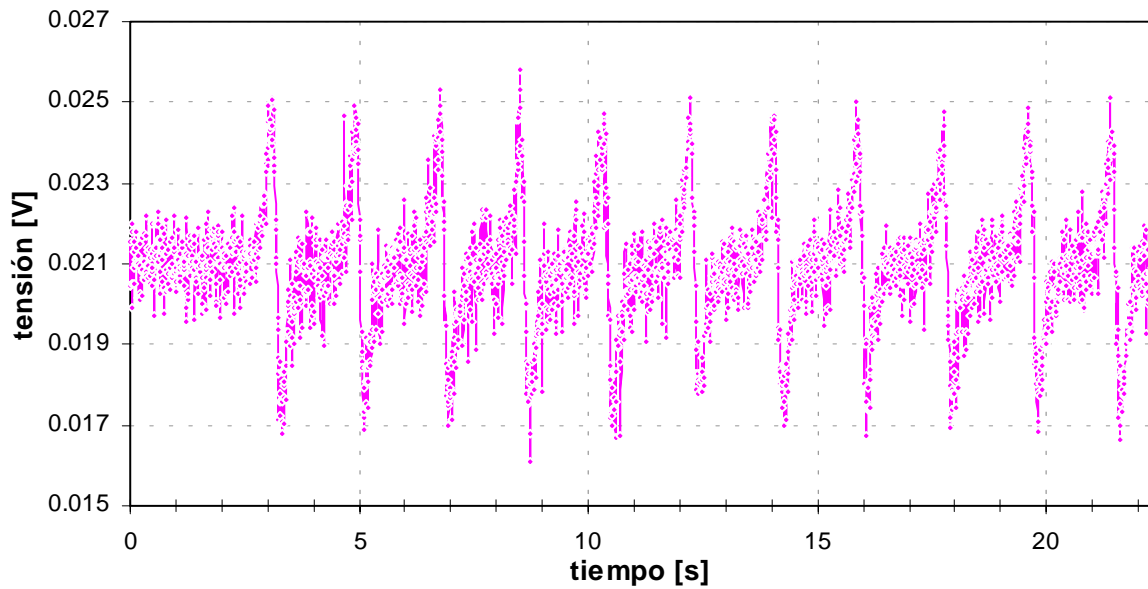


Figura 6. Representación gráfica de la tensión inducida en las bobinas del tubo de aluminio al ser atravesado por el imán.

Para realizar un análisis cuantitativo de este resultado, se obtiene de manera análoga a lo realizado anteriormente, un gráfico de la distancia recorrida por el imán como función del tiempo tal como se muestra en la figura 7.

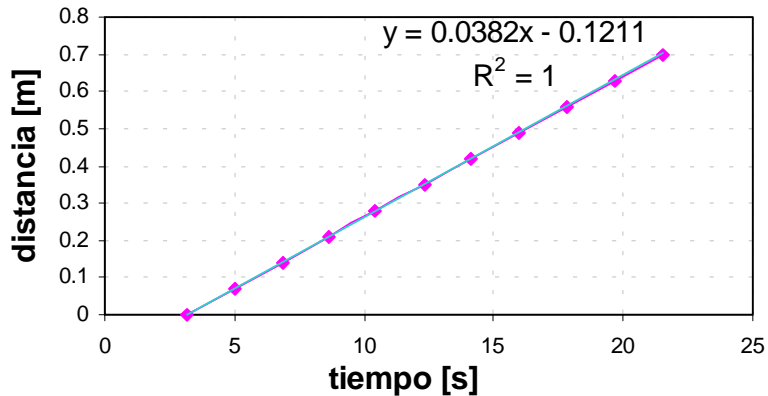


Figura 7. Representación gráfica de la distancia recorrida por el imán en función del tiempo durante su caída a través del tubo de aluminio. $\bar{v} \approx 0.038 \text{ m/s}$.

A partir de la figura 7, se verifica que la velocidad de caída del imán es constante y se obtiene el valor de dicha velocidad terminal, $v_t = (0,038 \pm 0,002) \text{ m/s}$.

Utilizando estos datos, se construye la curva teórica, obteniéndose un valor de $m_B = 0,91 \text{ Am}^2$ para la mejor aproximación a los valores medidos experimentalmente, y que coincide con el valor obtenido para el mismo imán usando el tubo de acrílico.

En la figura 8 se muestran en forma superpuesta los valores obtenidos experimentalmente con los calculados de manera teórica.

Discusión:

Para obtener una expresión teórica que permita modelizar los pulsos de tensión, se realizaron una serie de aproximaciones. El imán fue considerado como un par de cargas magnéticas ficticias separadas por una distancia igual a la longitud del imán, y las bobinas se consideraron puntuales.

A pesar de que, teniendo en cuenta las dimensiones reales, estas aproximaciones podrían parecer poco adecuadas, se obtuvo un alto grado de acuerdo entre los valores de tensión medidos y los calculados en base al modelo planteado. Si imaginamos al imán permanente como equivalente a una espira de corriente de igual dimensión que el imán, es decir tanto la espira como el imán tienen el mismo radio $R(=05.\text{cm})$, la corriente de la espira sería del orden de $I_{\text{espira}}=10^4\text{A}$. Esta corriente es comparable en órdenes de magnitud a la corriente que produce una central eléctrica de 200 MW (usina nuclear por ejemplo) con una tensión de 20 KV!.

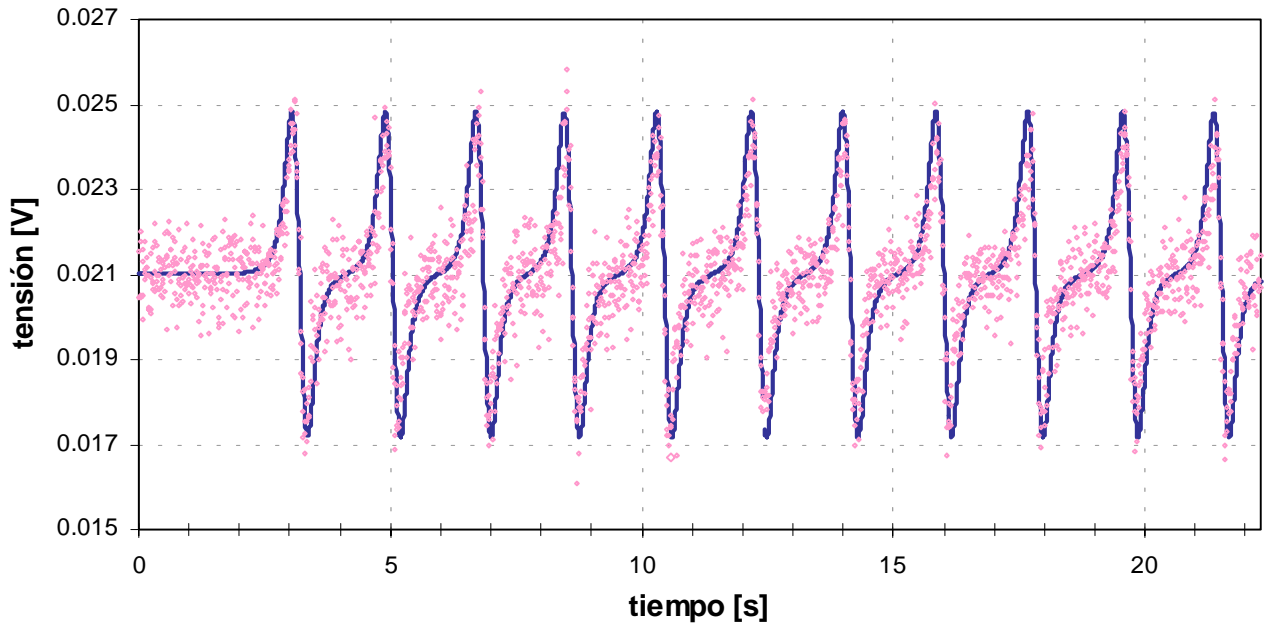


Figura 8. Superposición de las curvas obtenidas en forma experimental y teórica por el tubo de aluminio.

Conclusiones:

- ✓ El análisis teórico propuesto es adecuado para la modelización del pulso de tensión generado en una bobina al ser atravesada por un imán.
- ✓ Se verifica que al caer un imán por un tubo de material conductor (no ferromagnético), éste rápidamente alcanza una velocidad terminal. Para el caso analizado, dicha velocidad es $v_{\perp} = (0,038 \pm 0,002)$ m/s. La energía potencial del imán en parte se convierte en energía cinética del imán y en parte se invierte en generar corrientes parásitas en el tubo que finalmente se disipa en forma de calor.

Bibliografía:

1. C. S. Mac Lutchy, P. Backman and L. Bogan “A quantitative magnetic braking experiment”, Am. J. Phys. 61, 1096 (1993)
2. J. Manzanares, et al. “An experiment on magnetic induction pulses” Am. J. Phys. 62, 702 (1994)
3. Sears-Zemansky, *Física Universitaria*, vol.2 (Addison Wesley, EE.UU., 1996)