

# Estudio de fuerzas ferromagnéticas usando un motor de solenoide

Juarez Ferriol May



Licenciatura en Física  
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología  
Universidad Nacional de Tucumán  
Tucumán, Argentina

Diciembre 2023

Supervisor: Lic. Leal Sebastián

# Resumen

## Introducción

## Marco teórico

### Campos magnéticos en solenoides

#### Campo magnético de un solenoide infinito en el vacío

Un solenoide es cualquier dispositivo físico capaz de crear un campo magnético sumamente uniforme e intenso en su interior, y muy débil en el exterior. Un ejemplo teórico es el de una bobina de hilo conductor aislado y enrollado helicoidalmente, de longitud infinita. En ese caso ideal el campo magnético sería uniforme en su interior y fuera sería nulo.

En la práctica, una aproximación real a un solenoide es un alambre aislado, de longitud finita, enrollado en forma de hélice (bobina), por el que circula una corriente eléctrica. Cuando esto sucede, se genera un campo magnético dentro de la bobina tanto más uniforme cuanto más larga sea la bobina.

En el caso de un solenoide infinito en el vacío, se puede obtener el módulo del campo magnético en el eje axial con la ecuación (1), donde  $\mu_0$  es la constante de permeabilidad magnética en el vacío, N el número de espiras del solenoide, I la corriente que circula, y L la longitud total del solenoide.

$$B_x = \frac{\mu_0 N I}{L} \quad (1)$$

#### Campo magnético de un solenoide finito en el vacío

En el caso de un solenoide finito, con  $x = 0$  siendo el centro del solenoide, y estando en el vacío, podemos calcular el campo magnético en el eje axial con la ecuación (2).

$$B_x = \frac{\mu_0 N I}{2L} \left[ \frac{L/2 - x}{\sqrt{(L/2 - x)^2 + r^2}} + \frac{L/2 + x}{\sqrt{(L/2 + x)^2 + r^2}} \right] \quad (2)$$

#### Campo magnético de un solenoide con un núcleo ferromagnético

Las ecuaciones que hemos discutido hasta ahora son válidas para solenoides en el vacío, lo que significa que la permeabilidad del campo magnético es la misma que la del vacío,  $\mu_0$ .

Si el solenoide está inmerso en un material con permeabilidad relativa  $\mu_r$ , entonces el campo se incrementa proporcionalmente a esa cantidad, que podemos ver modificando la ecuación (1), obteniendo la ecuación (3).

$$B_x = \frac{\mu_r \mu_0 N I}{L} \quad (3)$$

En la mayoría de los solenoides, éste no se encuentra sumergido en un material de mayor permeabilidad, si no que parte del espacio alrededor del solenoide tiene el material de mayor permeabilidad, y parte del espacio alrededor es simplemente aire, que se comporta muy parecido al vacío. En ese caso, el efecto completo del material de mayor permeabilidad no se ve, si no que va a existir una permeabilidad efectiva, o aparente,  $\mu_{ef}$  de manera que  $1 \leq \mu_{ef} \leq \mu_r$ .

La inclusión de un núcleo ferromagnético aumenta la permeabilidad efectiva del campo magnético, como se puede ver para un solenoide infinito en la ecuación (4).

$$B_x = \frac{\mu_{ef}\mu_0 NI}{L} \quad (4)$$

### **Campo magnético de un solenoide finito con un núcleo ferromagnético**

Si juntamos lo discutido anteriormente sobre el solenoide finito y el núcleo ferromagnético, llegamos a la ecuación (5).

$$B_x = \frac{\mu_{ef}\mu_0 NI}{2L} \left[ \frac{L/2 - x}{\sqrt{(L/2 - x)^2 + r^2}} + \frac{L/2 + x}{\sqrt{(L/2 + x)^2 + r^2}} \right] \quad (5)$$

En los extremos del solenoide (obtención de la ecuación en el apéndice A), el campo magnético es igual a la ecuación (6).

$$B_x = \frac{\mu_{ef}\mu_0 NI}{2\sqrt{L^2 + r^2}} \quad (6)$$

Como se esperaría de un sistema en donde la dirección negativa y positiva es arbitraria y no modifica nada, los campos magnéticos son simétricos respecto al punto central del solenoide.

### **Elementos magnéticos**

Los átomos que forman a toda la materia contienen electrones en movimiento, los cuáles forman circuitos de corriente microscópicos que producen campos magnéticos. En muchos materiales, estas corrientes están orientadas de manera aleatoria, y no causan ningún campo magnético neto. Sin embargo, en algunos materiales, un campo magnético externo puede causar que estos

En base a los orígenes atómicos de las propiedades magnéticas de un material, podemos discutir tres clases generales de comportamientos magnéticos, *paramagnetismo*, *diamagnetismo*, y *ferromagnetismo*.

Ferromagnetismo

Materiales, métodos y recolección de datos

Resultados

Conclusión y discusiones

Recapitulación de los objetivos

Resumen e implicación de los resultados

Futuras investigaciones

Agradecimientos

## Apéndice A - Campo magnético en los extremos del solenoide

Empezando por la ecuación de campo magnético de un solenoide finito con un núcleo ferromagnético (5).

$$B_x = \frac{\mu_{ef}\mu_0 NI}{2L} \left[ \frac{L/2 - x}{\sqrt{(L/2 - x)^2 + r^2}} + \frac{L/2 + x}{\sqrt{(L/2 + x)^2 + r^2}} \right]$$

En el extremo izquierdo ( $x = -L/2$ )

$$B_x = \frac{\mu_{ef}\mu_0 NI}{2L} \left[ \frac{L/2 - (-L/2)}{\sqrt{(L/2 - (-L/2))^2 + r^2}} + \frac{L/2 + (-L/2)}{\sqrt{(L/2 + (-L/2))^2 + r^2}} \right]$$

$$B_x = \frac{\mu_{ef}\mu_0 NI}{2L} \left[ \frac{L/2 + L/2}{\sqrt{(L/2 + L/2)^2 + r^2}} + \frac{L/2 - L/2}{\sqrt{(L/2 - L/2)^2 + r^2}} \right]$$

$$B_x = \frac{\mu_{ef}\mu_0 NI}{2L} \left[ \frac{L}{\sqrt{L^2 + r^2}} \right]$$

$$B_x = \frac{\mu_{ef}\mu_0 NI}{2\sqrt{L^2 + r^2}}$$

De manera análoga en el extremo derecho ( $x = L/2$ )

$$B_x = \frac{\mu_{ef}\mu_0 NI}{2L} \left[ \frac{L/2 - (L/2)}{\sqrt{(L/2 - (L/2))^2 + r^2}} + \frac{L/2 + (L/2)}{\sqrt{(L/2 + (L/2))^2 + r^2}} \right]$$

$$B_x = \frac{\mu_{ef}\mu_0NI}{2L} \left[ \frac{L/2 - L/2}{\sqrt{(L/2 - L/2)^2 + r^2}} + \frac{L/2 + L/2}{\sqrt{(L/2 + L/2)^2 + r^2}} \right]$$

$$B_x = \frac{\mu_{ef}\mu_0NI}{2L} \left[ \frac{L}{\sqrt{L^2 + r^2}} \right]$$

$$B_x = \frac{\mu_{ef}\mu_0NI}{2\sqrt{L^2 + r^2}}$$

## Referencias

- [1] D. E. Ponzetti, *Proyecto experimental: Motor solenoide*. (Tucumán, 2018)
- [2] H. D. Young, R. A. Freedman, *Sears and Zemansky's University Physics: with Modern Physics*, 14th ed. (Pearson, San Francisco, 2015).