

Trabajo Práctico N° 1

Documento: MEI-TP01

Fecha: 07/05/2012

Grupo N°
UTN - FRBA

Revisión: 1

Hoja: 1 de 11

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL



Facultad Regional Buenos Aires
Departamento de Electrónica

CÁTEDRA: MÁQUINAS E INST. ELÉCTRICAS

PROFESOR: Ing. Matricali, Jorge

AYUDANTE: Ing. Dudinszky, Michelle

Ing. Riquel, Juan Pablo

AÑO: 2012

Trabajo Práctico N° 1
"Visualización Ciclo de Histéresis y Comportamiento
de Inductores alimentados con CC y CA"

Alumno	Legajo	FIRMA T.P.			
		Libro	Folio	Nota	Firma

Realizó / Alumnos

Aprobó / Profesor

Trabajo Práctico N° 1

Documento: MEI-TP01	Grupo N° UTN - FRBA	Revisión: 1
Fecha: 07/05/2012		Hoja: 2 de 11

1) Objetivo:

El objetivo de la presente práctica consiste en:

- 1.1) Analizar el comportamiento de un inductor en función al material utilizado como núcleo (comparar pérdidas con núcleo de aire y núcleo de hierro), evaluar cómo se reflejan las pérdidas encontradas de acuerdo al tipo de tensión aplicada (CA ó CC) y verificar éstas pérdidas a través del calentamiento del núcleo.
- 1.2) Visualizar mediante el uso de un osciloscopio, en forma dinámica, las formas de onda de la corriente de excitación, su desfase respecto a la f.e.m. inducida, forma de la onda del flujo y lazo de histéresis del material de núcleo.

2) Elementos necesarios:

- 1Un. Inductor c/núcleo de aire de aproximadamente las siguientes características:

L= 60 mHy
r=10 Ohm
l=14 cm
Diámetro=3 cm

- 1Un. Vara de hierro dulce
- 1Un Transformador de dos devanados 220/24V, 48VA, con núcleo acorazado.
- 1Un. Osciloscopio Digital
- 1Un. Fuente de alimentación regulable DC 15V 1A (Electrargen NG0524)
- 2Un. Variac 220V 6A Salida 0-250V (Variostat NG0010)
- 1Un. Multímetro Digital
- 1Un. Amperímetro 0-5 A (NG0703)
- 1Un. TI 0,25 A-0,5 A-1 A / 5 A 5VA (EI9573)

3) Introducción Teórica

3.1) Circuito equivalente de una bobina real con núcleo de hierro

A diferencia de las bobinas con núcleo de aire, una bobina con núcleo de hierro produce una serie de pérdidas en el circuito magnético, por lo que su factor de potencia no es nulo. Por ello, una bobina real con núcleo de hierro se puede representar por medio de una resistencia y una inductancia en paralelo.

Realizó / Alumnos	Aprobó / Profesor

Trabajo Práctico N° 1

Documento: MEI-TP01

Grupo N°
UTN - FRBA

Revisión: 1

Fecha: 07/05/2012

Hoja: 3 de 11

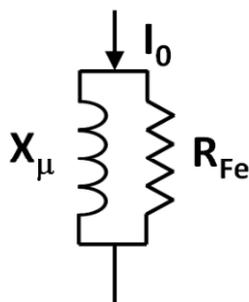


Figura 1: Circuito equivalente de una bobina real con núcleo de hierro

La resistencia del circuito equivalente se obtendrá a partir de la potencia activa consumida por la bobina cuando se aplica una tensión sobre la misma:

$$R_{Fe} = U_{ef}^2 / P_{Fe}$$

El factor de potencia de la bobina se calculará como el cociente entre la potencia activa y la potencia aparente consumidas por la bobina:

$$\cos \varphi = P_{Fe} / (U_{ef} \cdot I_{ef})$$

La inductancia del circuito equivalente se obtendrá dividiendo la tensión aplicada entre la corriente que circula por dicha inductancia:

$$X_{\mu} = U_{ef} / (I_{ef} \cdot \sin \varphi) = 2\pi \cdot f \cdot L$$

Siendo φ el desfase entre la tensión aplicada y la intensidad que circula por la bobina.

3.2) Flujo magnético creado al aplicar tensión a una bobina

Según se expuso en las clases de teoría, al aplicar una tensión de alimentación a una bobina, se crea un flujo magnético según establece la ley de Faraday:

$$\mu = N \cdot dF/dt$$

En el caso de aplicar una tensión de corriente alterna sinusoidal, y teniendo en cuenta la relación entre el flujo y la inducción magnética en un circuito ferromagnético, se puede deducir fácilmente que:

$$U_{ef} = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot F$$
$$U_{ef} = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot B \cdot S_{Fe}$$

3.3) Influencia del circuito magnético en la inductancia de la bobina

Como se demostró también en la teoría, el valor de la inductancia o coeficiente de autoinducción de una bobina viene dado por la expresión:

$$L = N^2/R$$

Realizó / Alumnos

Aprobó / Profesor

Trabajo Práctico N° 1

Documento: MEI-TP01

Grupo N°

Revisión: 1

Fecha: 07/05/2012

UTN - FRBA

Hoja: 4 de 11

Donde el valor de la reluctancia del circuito magnético \mathcal{R} , depende de las dimensiones geométricas del circuito magnético así como de su permeabilidad μ :

$$\mathcal{R} = L_{Fe} / (\mu \cdot S_{Fe})$$

En el caso de bobinas con núcleo de hierro, la permeabilidad dependerá del grado de saturación del circuito magnético, y por tanto, de la magnitud de la inducción en dicho circuito.

3.4) Pérdidas de los circuitos ferromagnéticos

Las pérdidas en los circuitos ferromagnéticos (conocidas como pérdidas en el hierro) se pueden dividir en aquellas debidas a la característica de histéresis del material (pérdidas por histéresis) y aquellas debidas a la circulación de corrientes parásitas inducidas en el núcleo (pérdidas por corrientes de Foucault).

Las pérdidas por histéresis vienen dadas por la expresión:

$$H_{\text{histéresis}} = K_H \cdot f \cdot B^n \cdot \text{Vol}_{Fe}$$

Siendo n un coeficiente cuyo valor está comprendido entre 1,6 y 2 para chapas magnéticas laminadas en caliente y superior a 2 para chapas magnéticas laminadas en frío, que, por simplicidad en el desarrollo posterior se tomara igual a 2.

Por su parte, las pérdidas por corrientes de Foucault vienen dadas por:

$$P_{\text{Foucault}} = K_F \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot \text{Vol}_{Fe}$$

De lo anterior se deduce que, para un circuito magnético alimentado a una frecuencia constante, las pérdidas en el hierro se pueden expresar como:

$$P_{Fe} = K \cdot B^2 \cdot \text{Vol}_{Fe}$$

Una forma alternativa de expresar las pérdidas en el hierro teniendo en cuenta la expresión dada en el punto 3.2) sería:

$$P_{Fe} = (K \cdot U^2 \cdot \text{Vol}_{Fe}) / (4,44 \cdot f \cdot N \cdot S_{Fe})^2 = \text{cte} \cdot U^2 / N^2$$

Como se indicó en el apartado 3.1) la presencia de la resistencia R_{Fe} en el circuito equivalente, se emplea para justificar o representar la existencia de las pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault:

$$P_{Fe} = R_{Fe} \cdot I^2$$
$$P_{Fe} = U^2 / R_{Fe}$$

3.5) Curva de magnetización de los materiales ferromagnéticos

La relación entre la inducción magnética que se establece en un circuito magnético y el campo magnético que la crea depende de las características del material, en este caso de su permeabilidad magnética:

Realizó / Alumnos

Aprobó / Profesor

Trabajo Práctico N° 1

Documento: MEI-TP01

Grupo N°
UTN - FRBA

Revisión: 1

Fecha: 07/05/2012

Hoja: 5 de 11

$$B = \mu \cdot H$$

En el caso de circuitos ferromagnéticos, la curva B-H presenta fenómenos de histéresis tal y como se observa en la figura:

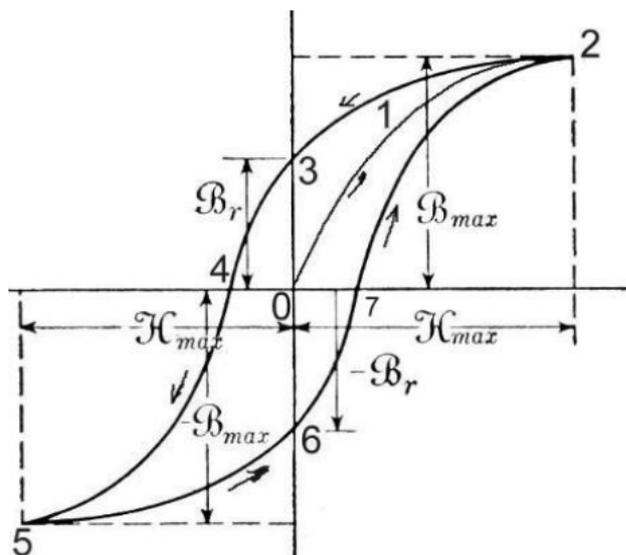


Figura 2: Curva de magnetización de un material ferromagnético

Supongamos un material magnéticamente virgen sobre el cual podemos actuar un campo de intensidad H variable a voluntad. Si medimos la inducción magnética B en función del campo H y aplicamos campos de intensidad creciente hasta llegar a H_{max} tendremos la curva 0-1-2 o curva de primera imantación, si disminuimos ahora H , aparece una curva B-H por encima de la anterior y para $H=0$ aparece cierta inducción B_1 , (magnetismo remanente), punto 3.

Si ahora invertimos la dirección del campo H vemos que para anular completamente la inducción magnética es necesario aplicar un campo 0-4 llamado fuerza coercitiva o campo coercitivo. Haciendo H más negativos se obtiene la curva B-H 4-5 hasta H_{-max} . De allí si vamos haciendo H menos negativo le sigue la curva 5-6-7-2 y de ahí en más si el material se somete a ciclos iguales ($-H_{max} + H_{max}$) sigue este la curva definida por los puntos 2-3-4-5-6-7 llamado ciclo de histéresis.

El {área encerrada por el lazo de histéresis es proporcional a la energía disipada por el ciclo debido a la misma. Es independiente de la frecuencia.

De las expresiones de L y R se deduce que, al igual que μ , la inductancia de la bobina aumentara para tensiones crecientes hasta alcanzar la saturación, momento en el que disminuirá.

3.6) Corriente consumida por una bobina real

Realizó / Alumnos

Aprobó / Profesor

Trabajo Práctico N° 1

Documento: MEI-TP01

Grupo N°
UTN - FRBA

Revisión: 1

Fecha: 07/05/2012

Hoja: 6 de 11

Las corrientes de Foucault son corrientes que circulan en el seno del núcleo magnético debido a que el campo magnético variable da lugar a ff.ee.mm inducidas y estas a corrientes de circulación. Estas corrientes se manifiestan de dos formas. Una inmediata como disipación de energía por efecto Joule y la segunda se traduce a un apantallamiento magnético o resistencia al cambio de estado tanto mayor cuanto mayor sea la velocidad de cambio.

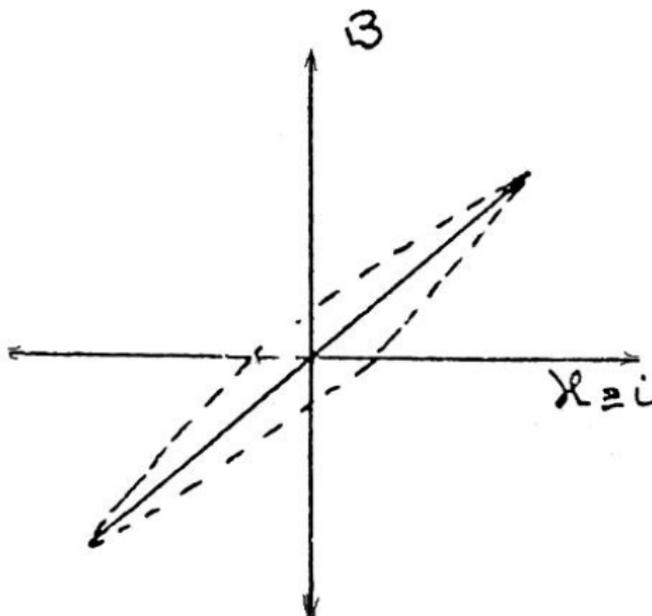


Figura 3: Curva de variación en función de una corriente i alterna sinusoidal

El área encerrada en el ciclo B-i es proporcional a la energía disipada por el ciclo debido a las corrientes de Foucault, a una frecuencia dada. Para cada frecuencia habrá un ciclo determinado

Si graficamos la curva B-i de un material en forma dinámica, vemos que el lazo de histéresis estático se le adiciona el efecto de las corrientes de Foucault, resultando en un lazo de mayor ancho y área, de tal modo que el área encerrada es proporcional a las pérdidas por histéresis más pérdidas por Foucault.

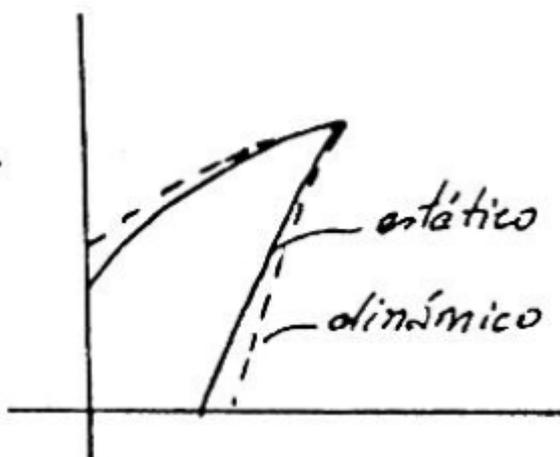


Figura 4: Efecto de la sumatorio de ambas pérdidas Histéresis más Foucault

Realizó / Alumnos

Aprobó / Profesor

Trabajo Práctico N° 1

Documento: MEI-TP01	Grupo N° UTN - FRBA	Revisión: 1
Fecha: 07/05/2012		Hoja: 7 de 11

3.6) Calculo de los componentes del circuito de ensayo

El área encerrada en el ciclo B-i es proporcional a la energía disipada por el ciclo debido a las corrientes de Foucault, a una frecuencia dada. Para cada frecuencia habrá un ciclo determinado

4) Desarrollo

4.1) Para cumplir con los objetivos planteados en el punto 1.1) se utilizarán los devanados de núcleo de aire.

4.1.1) Alimentando la bobina (inicialmente no utilizaremos el núcleo de hierro) con CA y utilizando el Variac iremos variando gradualmente la tensión (debemos cuidar de no aumentar el consumo más allá de 1,5 A para no dañar el bobinado.)
Para los diferentes valores de tensión elegidos, se deberá registrar el correspondiente valor de corriente

4.1.2) De la misma manera que en el punto anterior, pero esta vez utilizando el núcleo de hierro dulce, repetiremos las mediciones de corriente efectuadas para los puntos fijados anteriormente. Observaremos que el aumento de corrientes al ensayar con núcleo de hierro, es muy inferior al que se registra cuando ensayamos la bobina con núcleo de aire, por lo que seguramente deberemos utilizar el TI con valores diferente para poder lograr una buena medición a fondo de escala.

4.1.3) Habiendo realizado las mediciones anteriores llevaremos la tensión a un valor tal que el consumo de corriente sea de aproximadamente 1,5Amp (es decir máximo); si dejamos este valor fijo suficiente tiempo (son unos minutos nomás) enseguida podremos apreciar que el mismo presenta un leve calentamiento, confirmando así la existencia de pérdidas en este material.

4.1.4) Si ahora conectamos la bobina a una fuente de CC y volvemos a repetir los puntos anteriores y registrar los valores ¿Por qué su comportamiento no es el mismo?
¿Podemos verificar alguna variación térmica en el núcleo?

Realizó / Alumnos	Aprobó / Profesor

Trabajo Práctico N° 1

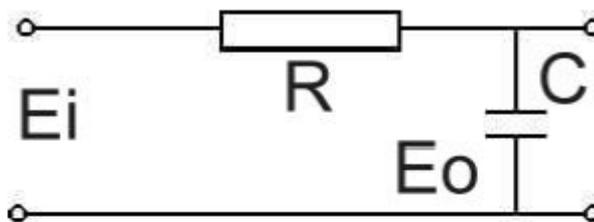
Documento: MEI-TP01

Grupo N°
UTN - FRBA

Revisión: 1

Fecha: 07/05/2012

Hoja: 9 de 11



$$E_i = i \cdot R + E_o$$

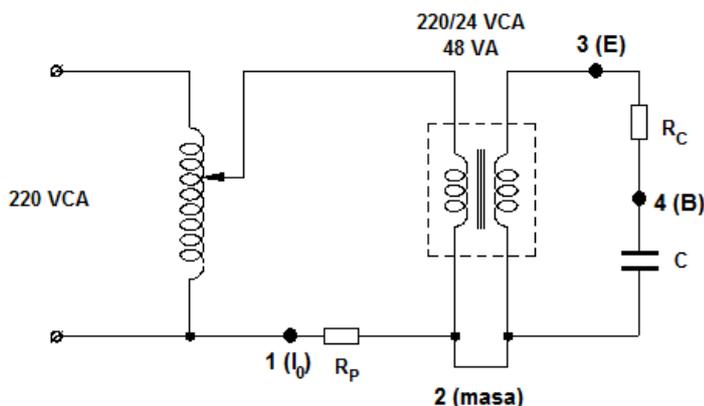
$$E_o = \frac{1}{C} \int i \cdot dt$$

$$I = E_i / (R - j(1/\omega C))$$

Si $R \gg 1/\omega C$ $i = E_i / R$

$$E_o = - \int (E_i / RC) \cdot dt$$

Circuito utilizado



4.2.1) Calculo de los componentes del circuito

Para el cálculo se de la resistencia primaria, se escogerá de tal valor que no modifique sustancialmente la tensión aplicada al transformador (respecto de la tensión aplicada). Puede adoptarse que el 1% de caída de tensión resulta un valor adecuado, así que se considerará un valor eficaz de 2,2V.

En lo que respecta a la corriente, la misma puede ser del orden del 10% de la nominal del mismo. La corriente nominal del primario es de 218mA, y una corriente en vacío del orden de 22mA.

$$R_p = \frac{U_H}{I_p} \Rightarrow R_p = \frac{2,2 \text{ V}}{0,022 \text{ A}} \Rightarrow R_p \approx 100 \Omega$$

$$P_{R_p} = I_p^2 \cdot R_p \Rightarrow P_{R_p} = (0,022 \text{ A})^2 \cdot 100 \Omega \Rightarrow P_{R_p} = 0,047 \text{ W}$$

Realizó / Alumnos

Aprobó / Profesor

Trabajo Práctico N° 1

Documento: MEI-TP01	Grupo N° UTN - FRBA	Revisión: 1
Fecha: 07/05/2012		Hoja: 10 de 11

La resistencia a conectar será de 100 Ohm, 1/8W.

El Circuito integrador conectado a la salida no debe influir en exceso sobre el transformador, debiendo el mismo permanecer en la situación de vacío. Además, por tratarse de un circuito integrador, la resistencia será mucho más grande que la reactancia capacitiva (a los valores de frecuencia de red).

Lo anteriormente indicado simplifica el cálculo, pues se considera la corriente limitada únicamente por la resistencia; de esta manera:

$$i_s \approx \frac{E_2}{R_c}$$

Para no afectar la condición de vacío en sobremanera, la corriente secundaria deberá ser limitada a alrededor del 1% de la corriente nominal (aproximadamente 20 mA).

Con esta premisa, puede depreciarse la caída de tensión secundaria, siendo la fuerza electromotriz inducida igual a la tensión en bornes secundarios, entonces:

$$R_c = \frac{U_2}{1\% I_2} \Rightarrow R_c = \frac{24 \text{ V}}{0,02 \text{ A}} \Rightarrow \boxed{R_c = 1200 \Omega}$$

Además, la reactancia capacitiva será del orden del 1% de manera que el circuito pueda considerarse un integrador.

$$X_c = 1\% R_c \Rightarrow X_c = 12 \Omega$$

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_c} \Rightarrow C = \frac{1}{2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 12 \Omega} \Rightarrow \boxed{C = 265 \mu\text{F}}$$

Comercialmente, no puede hallarse con facilidad un capacitor de esa capacidad con bajas pérdidas. Por esto se procede a disminuir el mismo en la misma proporción que se aumentará la resistencia. Para adecuar estas magnitudes a valores comerciales, la relación será de alrededor de 120.

$$\boxed{C = 2,2 \mu\text{F}} \quad 2,2\text{V}$$

$$\boxed{R_c = 150 \text{ k}\Omega} \quad 1/8\text{W}$$

4.2.2) Visualización simultanea de I_0 e E

Se utilizará un osciloscopio de dos canales. Las puntas del canal 1 se conectarán a los bornes 2 y 3 del circuito (masa a 2) y las puntas del canal 2 a los bornes 1 y 2 del mismo (masa a 2.)

Observaremos en pantalla (eligiendo el modo conveniente la amplificación de cada canal para hacer las imágenes de magnitud comparable, ajustando el disparo de ambos en

Realizó / Alumnos	Aprobó / Profesor

Trabajo Práctico N° 1

Documento: MEI-TP01	Grupo N° UTN - FRBA	Revisión: 1
Fecha: 07/05/2012		Hoja: 11 de 11

automático y superponiendo las imágenes) que el desfase de ambas señales, I_0 y E , es de casi un cuarto de ciclo (90° .)

Si variamos la tensión de alimentación veremos que para tensiones bajas (baja inducción) la tensión y la corriente suben y bajan proporcionalmente (característica lineal) pero para tensiones crecientes llega un momento en que la corriente crece mucho más rápido (saturación.)

El desplazamiento de fase entre ambas señales se podrá también comprobar ajustando los controles hasta que ambas imágenes tengan la misma magnitud; luego se alimentará el barrido con la señal del canal 2 (I_0) (llave de la base de tiempo a la posición X-Y) obteniendo la figura de una circunferencia con un eje casi vertical (debido a la deformación armónica de I_0) que corresponde a la figura de Lissajous de dos ondas senoidales desplazadas un cuarto de ciclo, resultando comprobando tal desplazamiento.

4.2.3) Visualización simultánea de I_0 y ϕ y el lazo de histéresis

Dejando las conexiones del canal 2 como en el punto anterior y poniendo las puntas del canal 1 a los bornes 4 y 2 (masa a 2) aparecerá en el canal 1 una señal proporcional al flujo ϕ . Se observará que ϕ e I_0 están prácticamente en fase.

Pasando el control de base de tiempo a X-Y se obtendrá un lazo proporcional al lazo de histéresis dinámico (histéresis más Foucault) ya que la deflexión es proporcional a B y la horizontal proporcional a H (en realidad a I_0 .)

4.2.4) Visualización simultánea de E y ϕ

Alimentando el canal 1 con señal proporcional a E y el canal 2 con señal proporcional a ϕ , vemos que estas son senoidales casi puras y están desfasadas 90° .

4.2.5) Conclusiones

- a) Dibuje el circuito de ensayo del inductor, explicando la finalidad de cada instrumento o equipo.
- b) Presente la tabla relevada en el inductor con CA y CC. Dibuje en un mismo gráfico la corriente en función de la tensión.
- c) Mencione y explique las diferencias que encuentra entre estas gráficas.
- d) ¿Cómo explica el calentamiento en el núcleo ferromagnético? Justifique.
- e) Explique que componentes tiene I_0 (I_μ , I_p y armónicos).
- f) Demuestre cómo se puede integrar un circuito R-C una señal de entrada E_i .
- g) Trazar el circuito utilizado en la práctica. ¿puede ser considerado un integrador?
- h) ¿Qué efecto produciría una R_p de alto valor?
- i) Graficar como varía el lazo de histéresis y la corriente I_0 a medida que aumenta la tensión aplicada. Colocar las fotografías que crea necesarias para facilitar su explicación.
- j) ¿Porque el desfase entre I_0 y E no es exactamente de 90° ? Colocar las fotografías tomadas de la pantalla del osciloscopio.
- k) ¿Qué factores influyen en la disminución de dicho desfase?
- l) ¿Qué es una figura de Lissajous?
- m) ¿Cuándo se obtendría una circunferencia perfecta? ¿es una circunferencia lo visto en la práctica? ¿Por qué? Colocar fotografías de lo experimentado.
- n) Si el núcleo no se hubiese saturado ¿cuál hubiera sido la forma de onda de I_0 ?
- o) Siempre que la tensión aplicada sea senoidal ¿lo será también I_0 ?

Realizó / Alumnos	Aprobó / Profesor