



---

# Física Experimental 2

## - Inducción electromagnética -

### Práctica 6

Integrantes:

- Gulnara Nocetti
- Pedro Escudero

## 1. Introducción

En este experimento, se tuvo como objetivo examinar el fenómeno de inducción electromagnética, mediante el análisis del desplazamiento de un imán dentro de un solenoide y la medición de la corriente inducida en una bobina al ser expuesta a un campo magnético variable.

### 1.1. Ley de Faraday

La Ley de Faraday establece que un cambio en el flujo magnético a través de una superficie genera una fuerza electromotriz (FEM) inducida en un conductor, lo que a su vez induce una corriente eléctrica en el conductor.

La ecuación que describe ésta ley es:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1)$$

Donde el término de la izquierda representa la circulación del campo eléctrico  $E$  en una curva cerrada  $C$  (FEM inducida) y el de la derecha representa la variación del flujo magnético  $\Phi_B$  en el tiempo a través de la superficie delimitada por  $C$ .

En 1831, Faraday logró observar éste fenómeno, mediante un Setup experimental como el que se ilustra en la figura 1.

De ésta manera, dado que la bobina secundaria no está alimentada directamente por ninguna corriente eléctrica, cualquier corriente detectada en el circuito secundario deberá haber sido inducida por algún agente externo.

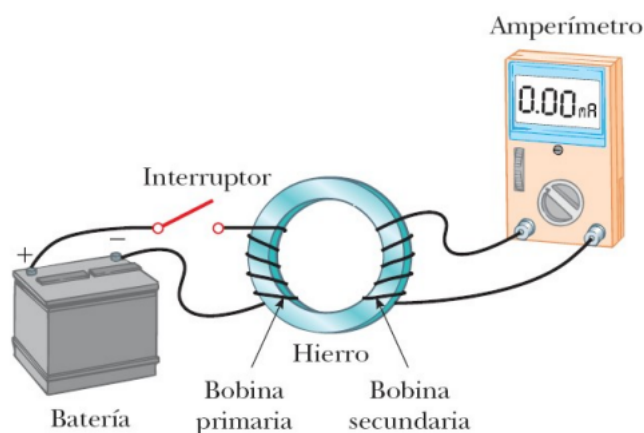


Figura 1: Esquema del dispositivo empleado por Faraday

Luego de las observaciones obtenidas a partir de éste experimento, Faraday concluyó que campos magnéticos variables inducen corrientes eléctricas.

## 1.2. Bobina dentro de un campo magnético variable

Dada una bobina de  $N$  espiras con área  $A$  y un campo magnético variable en tiempo  $B$ , podemos despejar la FEM generada en la bobina, obteniendo la siguiente expresión:

$$\epsilon_{\text{ind}} = -N \frac{\partial \Phi_B}{\partial t} \quad (2)$$

Para un campo magnético que varía solenoidalmente en el tiempo ( $B(t) = B_{\text{máx}} \sin(\omega t)$ ), de la ecuación previa obtenemos:

$$\epsilon_{\text{ind}} = -NA\omega B_{\text{máx}} \cos(\omega t) \quad (3)$$

De la ecuación 3 se deduce que la FEM inducida en el solenoide secundario es proporcional a la razón de frecuencia sobre impedancia (resistiva e inductiva) del solenoide primario.

¿Qué pasa si tenemos dos bobinas?

## 2. Metodología implementada

Para iniciar la experiencia, se utilizó un solenoide conectado directamente al osciloscopio, como se muestra en la Figura 2. Se introdujo un imán a través de su eje, y se observó el comportamiento al mover el imán dentro del solenoide, variando tanto la velocidad como la posición de los polos del imán.

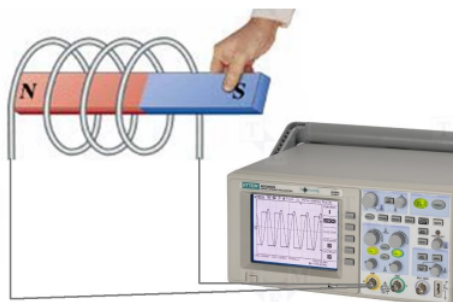


Figura 2: Estudio de un imán moviéndose dentro de un solenoide.

¿Quién es el solenoide secundario? Hasta acá no mencionaron que tuvieran dos bobinas

El sistema utilizado para medir la fuerza electromotriz (FEM) inducida en el solenoide secundario se muestra en la Figura 3. Para la preparación de este sistema, se dispusieron dos solenoides concéntricos. El solenoide primario se conectó a la fuente de alimentación, mientras que el solenoide secundario se enlazó con los canales del osciloscopio. En el transcurso del experimento se generó con la fuente tres tipos de señales, sinusoidales, triangulares y cuadradas, con el objetivo de observar la reacción que generaban el solenoide secundario.

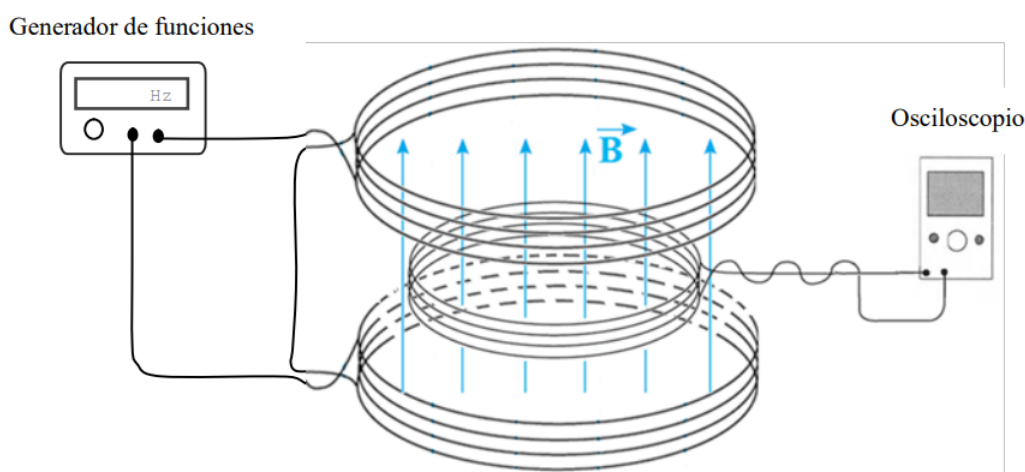


Figura 3: Dispositivo experimental utilizado para medir la FEM inducida.

Por otro lado, se registraron valores de amplitud de la Fuerza Electromotriz (FEM) inducida, variando la frecuencia de la señal. Se mantuvo un control estricto sobre el voltaje de salida del generador que alimentaba el solenoide primario, asegurando que su valor permaneciera constante.

Después de completar la primera etapa del experimento, se repitió el proceso al introducir una barra ferromagnética que atravesaba el centro de los solenoides, con el objetivo de observar posibles diferencias en el comportamiento.



---

Luego se agregó una resistencia  $R$  en serie al solenoide primario con  $R = 1000\Omega$  y se realizaron los dos conjuntos de medidas nuevamente (con y sin la barra ferromagnética dentro del solenoide).

A partir de los datos recopilados, se crearon gráficas que representaban Fem inducida  $\epsilon_{ind}$  en función de la frecuencia  $f$ .

Dado que despreciamos la incertidumbre de la frecuencia arrojada en el display, los datos tienen solo incertidumbre de voltaje  $\delta V$  asociada al osciloscopio, la cual se calcula como:

$$\delta V = 0,03V_{med} + 0,2Escala + 100mV \quad (4)$$

### 3. Análisis de datos

#### 3.1. - Estudio de un imán moviéndose en un solenoide -

Al mover el imán a lo largo del eje del solenoide, se observan variaciones en el osciloscopio que representan la FEM inducida sobre el solenoide, las cuales dependen de la posición y orientación del imán. La rapidez con la que se desplaza el imán afecta la intensidad de la corriente inducida en el solenoide, a mayor rapidez mayor corriente. Al invertir los polos del imán mientras se mueve a lo largo del eje, se nota que se invierte la polaridad de la corriente inducida. Además, si se mantiene el imán en reposo y se mueve el solenoide, se genera una corriente eléctrica en el solenoide debido al cambio en el flujo magnético a través de sus espiras, ocasionando el mismo efecto que mover el imán.

**¿cómo se explica esto a partir de la ley de Faraday?**

#### 3.2. - Estudio de la fem inducida en un solenoide debido a un campo magnético que varía en el tiempo: análisis de señales de diferente forma -

A continuación se presentan imágenes de las señales registradas en el osciloscopio mientras se alimenta al solenoide primario a un voltaje constante  $V_f$  con diferentes tipos de ondas. En todas la figuras, la curva rosada representa el voltaje en el solenoide primario y la amarilla en el solenoide secundario, el cual identificamos como la fem inducida ya que el solenoide secundario no está alimentado directamente por una fuente.

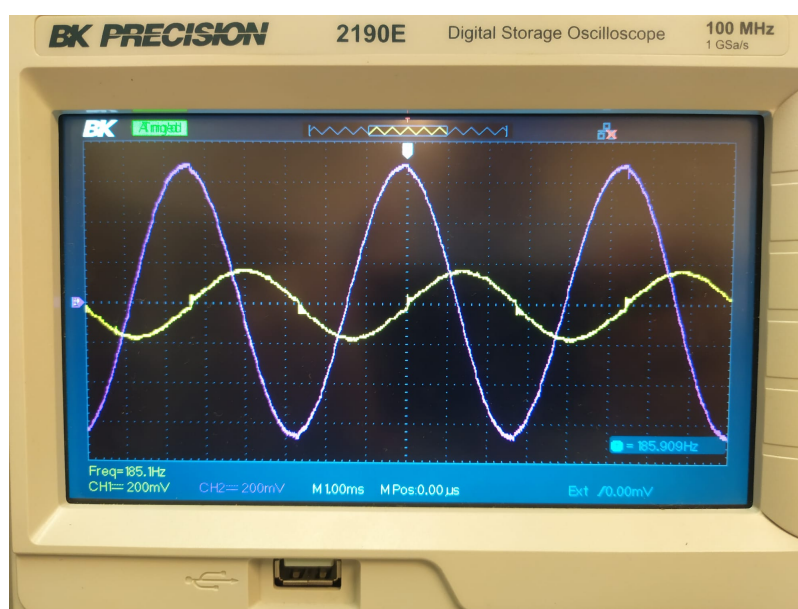


Figura 4: Pantalla del osciloscopio, onda sinusoidal.

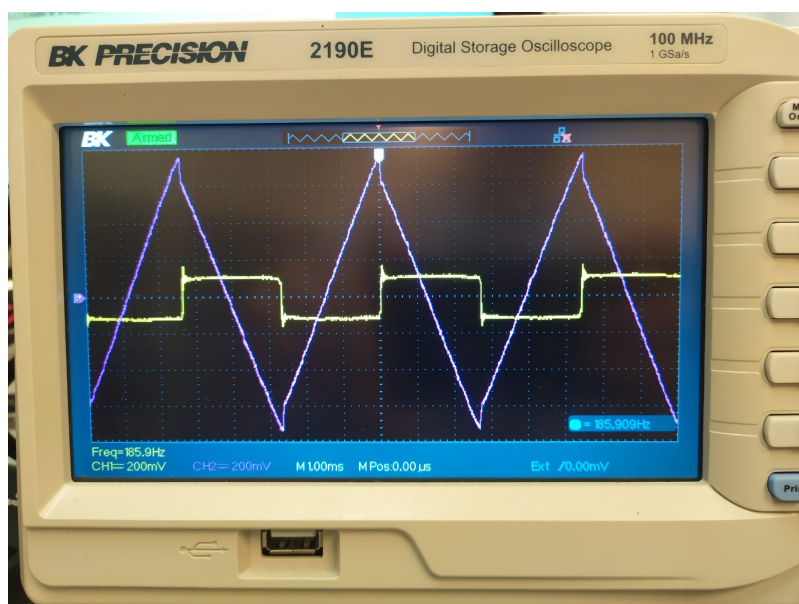


Figura 5: Pantalla del osciloscopio, onda triangular.

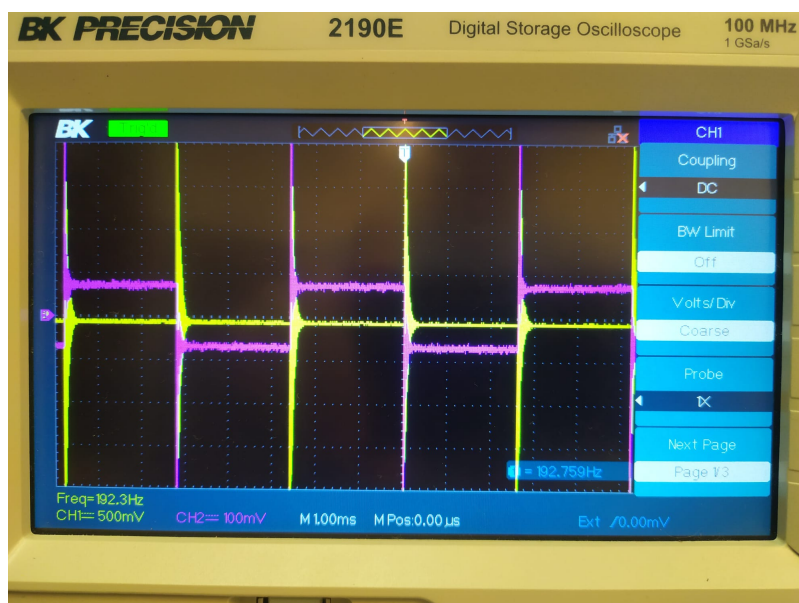


Figura 6: Pantalla del osciloscopio, onda cuadrada.



Si llamamos  $Z_L$  a la impedancia del bobinado primario ( $Z_L = R_L + j$ ),  $R$  a la impedancia resistiva de salida del generador de funciones ( $R = 50\Omega$ ) y  $V_P$  al voltaje en el solenoide primario, sabemos que el mismo satisface:

$$V_P = V_f \frac{Z_L}{Z_L + R} \quad (5)$$

Donde se puede ver fácilmente que el término que multiplica a  $V_f$  es menor que 1 por lo tanto, se observa que el voltaje en el solenoide primario es menor que el de la fuente y tiene un cierto desfase respecto a la misma.

Basándonos en la Ley de Faraday, se esperaría apreciar que la fem inducida en el solenoide secundario (representado por la curva amarilla) es proporcional a la derivada del campo magnético (con signo opuesto, por la ley de Lenz). A menos de un cierto desfase, en los tres casos la curva amarilla es proporcional a la derivada de la rosada, valiendo cero cuando la segunda es constante, aumentando su valor positivamente cuando el voltaje del primario decrece y viceversa.

¿a qué se debe este desfase?

Al colocar la barra ferromagnética dentro del solenoide, la presencia del núcleo de hierro aumenta la inductancia debido a la concentración y guía de las líneas de campo magnético sobre el propio material.

¿qué efecto causa esto en la fem inducida?

El campo magnético en el solenoide secundario  $B_S$  puede escribirse como:

$$B_S = \mu_0 n_P I_P = \mu_0 n_P \frac{V_P}{Z_P} \quad (6)$$

Sustituyendo en 3 se obtiene una nueva ecuación para la fem inducida:

$$\epsilon_S = -N A \omega \mu_0 n_1 \frac{V_0 \cos(\omega t)}{Z_P} \quad (7)$$

Donde  $Z_P = Z_L + R$  es el factor que ocasiona el desfase entre las magnitudes mencionadas

### 3.3. - Estudio de la FEM inducida en un solenoide debido a un campo magnético que varía en el tiempo: dependencia de la FEM con la frecuencia –

A continuación se presentan las gráficas realizadas a partir de los datos de Fem inducida en el solenoide secundario en función de frecuencia. En la figura 7 se revelan los datos tomados en el circuito simple, mientras que en la figura 8 se agrega una resistencia ( $R=1000\ \Omega$ ) en serie al solenoide primario y se repite el experimento.

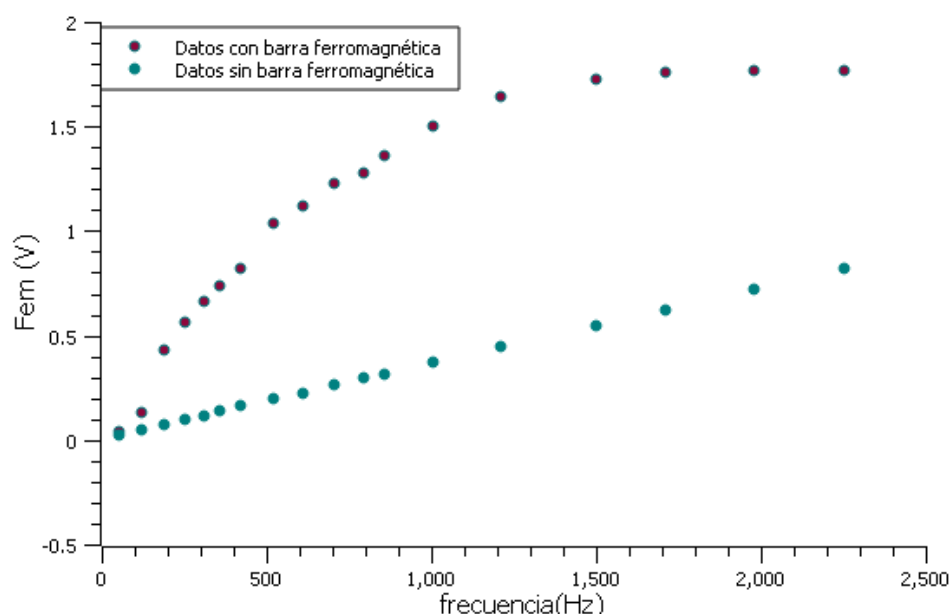


Figura 7: Datos de  $\epsilon_{ind}$  en función de frecuencia

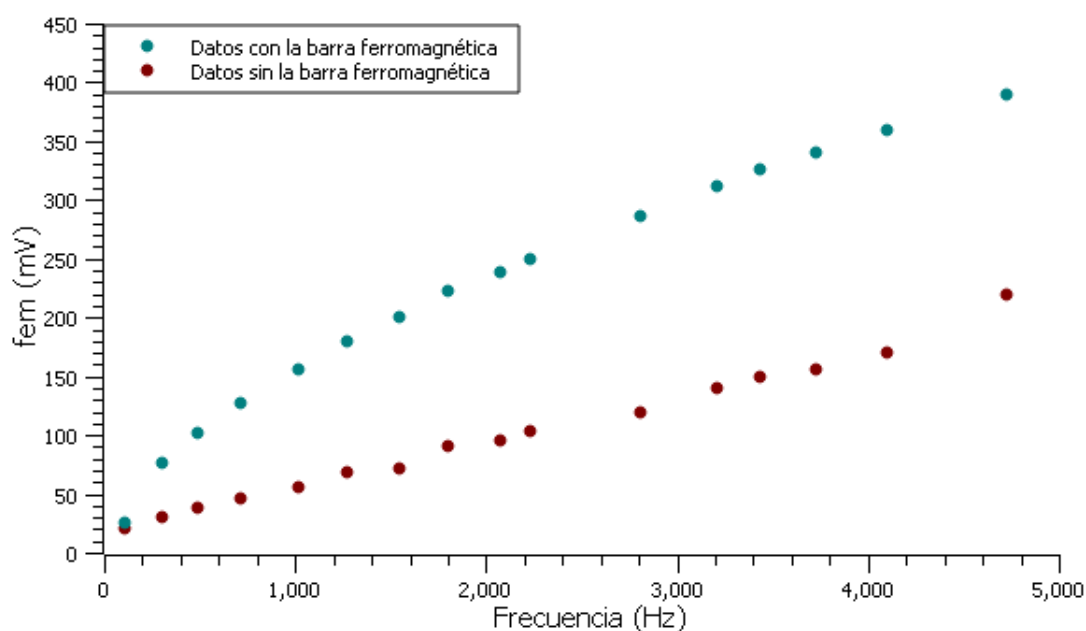


Figura 8: Datos de  $\epsilon_{ind}$  en función de frecuencia con resistencia





Se puede observar como en ambos casos la barra ferromagnética afecta el comportamiento de la  $\epsilon_{ind}$  arrojando valores de mayor magnitud. Esto es coherente si evaluamos que la permeabilidad magnética  $\mu$  en éste caso es mayor, lo cual incrementa el valor de  $B_{max}$  y por ende la inductancia (observar ecuación 3).

También se observa que sin el material, es decir, con una permeabilidad magnética menor, existe un intervalo donde es posible linealizar la función, mayor a aquel que se observa habiendo utilizado la barra ferromagnética. Esto se da porque se considera intervalo linealizable aquel que se ubica antes de llegar al polo (punto en que la parte real e imaginaria del cociente de la fem inducida en la ecuación 3, se anula) presentándose para aquellas bobinas con un núcleo ferromagnético, a menores frecuencias que sin él.

Observemos que  $\omega_{polo} = \frac{R_{fuente} + R_L}{L}$  donde  $L$  es directamente proporcional a  $\mu$ , por lo tanto al aumentar  $\mu$  disminuye  $\omega_{polo}$  y en consecuencia el tramo linealizable.

Al agregar la resistencia tenemos que  $\omega_{polo} = \frac{R_{fuente} + R_L + R}{L}$  por lo tanto para estos conjuntos de medidas, como se observa al comparar las gráficas 7 y 8, el intervalo linealizable es más extenso.

El uso de un núcleo de material ferromagnético como el hierro, si bien actúa como un amplificador de la inductancia y de la fem inducida (debido a la canalización y guía de las líneas de campo magnético encontradas en los alrededores), exhibe la desventaja de que al ser utilizados a la misma frecuencia que un bobinado con núcleo de aire, presenta mayores pérdidas energéticas, denominadas pérdidas de hierro. Este fenómeno se puede reducir al variar el tipo de metal, disminuyendo la permeabilidad magnética y evitando las pérdidas debido a corrientes parásitas.

¿qué pasa cuando la frecuencia es muy grande?



---

## 4. Conclusiones

En la primera instancia del experimento se pudo confirmar mediante observaciones el comportamiento teórico esperado de la fuerza electromotriz inducida así como también que la velocidad del imán tiene un impacto directo en la fem inducida en el solenoide, con un aumento de la misma a medida que la velocidad aumenta. Además, la inversión de los polos del imán altera la polaridad de la fem inducida, destacando la influencia de la orientación magnética.

Mediante el análisis de las señales registradas en el osciloscopio al alimentar el solenoide primario con diferentes tipos de ondas, pudimos observar experimentalmente la relación entre el voltaje en el solenoide primario y la fem inducida. Se cumple entonces que la fem inducida en el solenoide secundario es proporcional a la derivada del campo magnético variable en el tiempo, como lo describe la ecuación 3.

Observamos por otra parte que la introducción de materiales ferromagnéticos amplifica la fem inducida, resultados que se hicieron notorios en las mediciones del osciloscopio de  $\epsilon_{ind}$  en función de frecuencia. De éste mismo experimento se pudo apreciar que el intervalo linealizable es mas extenso cuando se tiene una mayor permeabilidad magnética, como es el caso al introducir la barra ferromagnética.

Al comparar los resultados anteriores con los obtenidos luego de agregar la resistencia observamos que el intervalo linealizable es mayor en este ultimo caso, aunque el fenómeno se puede apreciar mejor al en el caso de las medidas con la barra ferromagnética.



## 5. Anexo

### 1. Tabla de datos, FEM inducida respecto a la frecuencia:

$f(Hz)$	$V(mV)$ (sin material ferromagnético)	$V(mV)$ (con material ferromagnético)
52	0.027	0.051
70	0.033	0.064
90	0.041	0.12
121.9	0.0475	0.228
151.42	0.055	0.352
150	0.061	0.416
170	0.068	0.46
190	0.075	0.515
220	0.085	0.560
250	0.0975	0.63
280	0.108	0.66
310	0.118	0.67
320	0.122	0.735
360	0.14	0.82
420	0.164	1.04
520	0.196	1.12
610	0.224	1.225
706	0.26	1.28
793	0.296	1.36
856	0.316	1.5
1003	0.371	1.64
1210	0.52	-
1500	0.545	-
1710	0.62	-
1980	0.725	-
2250	0.82	-



2. Tabla de datos, FEM inducida respecto a la frecuencia. Con Resistencia en el circuito:

$f(Hz)$	$V(mV)$ (sin material ferromagnético)	$V(mV)$ (con material ferromagnético)
105	20	26
218	28	72
300	30	76
360	32	86
491	38	102
568	38	112
634	42	120
712	46	128
830	50	138
933	56	152
1020	56	156
1124	62	168
1269	68	180
1420	74	192
1545	72	200
1671	82	210
1800	90	222
1940	94	230
2074	96	238
2228	104	250
2806	120	286
3209	140	312
3433	150	326
3730	156	340
4103	170	360
4727	220	390



---

## 6. Referencias:

- Física Experimental 2 Práctica: Inducción electromagnética