

# Faraday y la guitarra eléctrica

César Sancho

I.E.S. Benjamín de Tudela, Navarra, España. [csanchom@educacion.navarra.es](mailto:csanchom@educacion.navarra.es)

[Recibido en enero de 2010, aceptado en octubre de 2010]

Para ilustrar el fenómeno de la inducción electromagnética y algunos conceptos relativos a las ondas, se propone una variante de las experiencias tradicionales: un estudio acústico de la guitarra eléctrica.

**Palabras clave:** Inducción electromagnética; Ondas estacionarias.

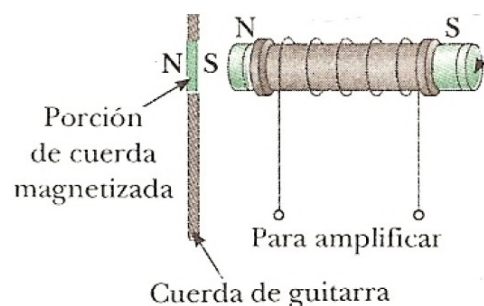
## Faraday and the electric guitar

A different way of showing the phenomenon of electromagnetic induction and other concepts of waves is proposed through some variations of traditional experiments: an acoustic study of the electric guitar.

**Keywords:** Electromagnetic induction; Standing waves.

## Introducción

Los experimentos diseñados por Michael Faraday en Inglaterra en 1831, e independientemente por Joseph Henry en Estados Unidos ese mismo año, mostraron que puede inducirse una corriente eléctrica en un circuito mediante un campo magnético variable. Los resultados de estos experimentos desembocaron en una ley fundamental en el electromagnetismo conocida como ley de inducción de Faraday (Serway y Jewett 2003, Franco 2010).



**Figura 1.** La cuerda vibrante induce una f.e.m. en la bobina.

La fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida puede producirse de muchas maneras y experiencias tales como acercar y alejar un imán frente a una bobina, abrir o cerrar el interruptor de un circuito primario frente a un circuito secundario, y otras similares, se usan frecuentemente para ilustrar estos conceptos en las clases de Física. La oportunidad de realizarlas es indiscutible si se quiere que la ley permanezca indeleble en la memoria de los alumnos.

Como ampliación de dichas experiencias, se propone en este trabajo una interesante aplicación de la ley de Faraday: la construcción de una guitarra eléctrica.

## ¿Cómo produce sonido la guitarra eléctrica?

Las cuerdas de una guitarra eléctrica son de material ferromagnético. Cuando una cualquiera de ellas vibra induce una f.e.m. en una bobina llamada bobina captora. Esa bobina lleva como núcleo un imán permanente que se encuentra frente a la cuerda de guitarra y cerca de ella. El imán permanente del interior de la bobina magnetiza la porción de la cuerda más próxima (véase la figura 1).

Cuando la cuerda vibra con una frecuencia determinada, el segmento magnetizado produce un flujo magnético variable a través de la bobina captora.

La f.e.m. inducida en la bobina alimenta a un amplificador y de ahí la señal se envía a los altavoces, produciendo el sonido que escuchamos.

El artículo de Horton y Moore (2009) ofrece un análisis detallado del sistema de generación del sonido en una guitarra eléctrica.

## Construcción de la guitarra

Necesitamos un hilo de acero (que se consigue en una tienda de instrumentos musicales), dos clavijas (o dos tornillos con sus tuercas) donde colocar sus extremos para tensarlo, dos pinzas con nuez, una varilla larga de aluminio y el pie donde colocarla (opcional).

Además, una bobina (de 1200 espiras al menos), una pinza y su nuez para sujetarla a la varilla de aluminio, así como imanes de neodimio cilíndricos, a ser posible.

Y, por último, unos altavoces de ordenador (que ya llevan el amplificador incorporado) y cable bifilar con bananas en el doble extremo que se une a la bobina y un jack en el que se conecta al amplificador.

Es importante el detalle del imán. Es recomendable usar al menos tres imanes de neodimio (cilíndricos de 2 cm de diámetro y 1 cm de altura) unidos. Estas dimensiones están normalizadas por los fabricantes de imanes. Como el alojamiento de la bobina para los núcleos es más largo que el conjunto de los tres imanes, completamos con cualquier objeto de hierro o con imanes de ferrita.

La figura 2a muestra cómo colocar cada uno de los componentes. La imaginación de cada cual puede decorar el montaje a su gusto. En la figura 2b se ve con más detalle la posición del hilo metálico, bobina e imán.

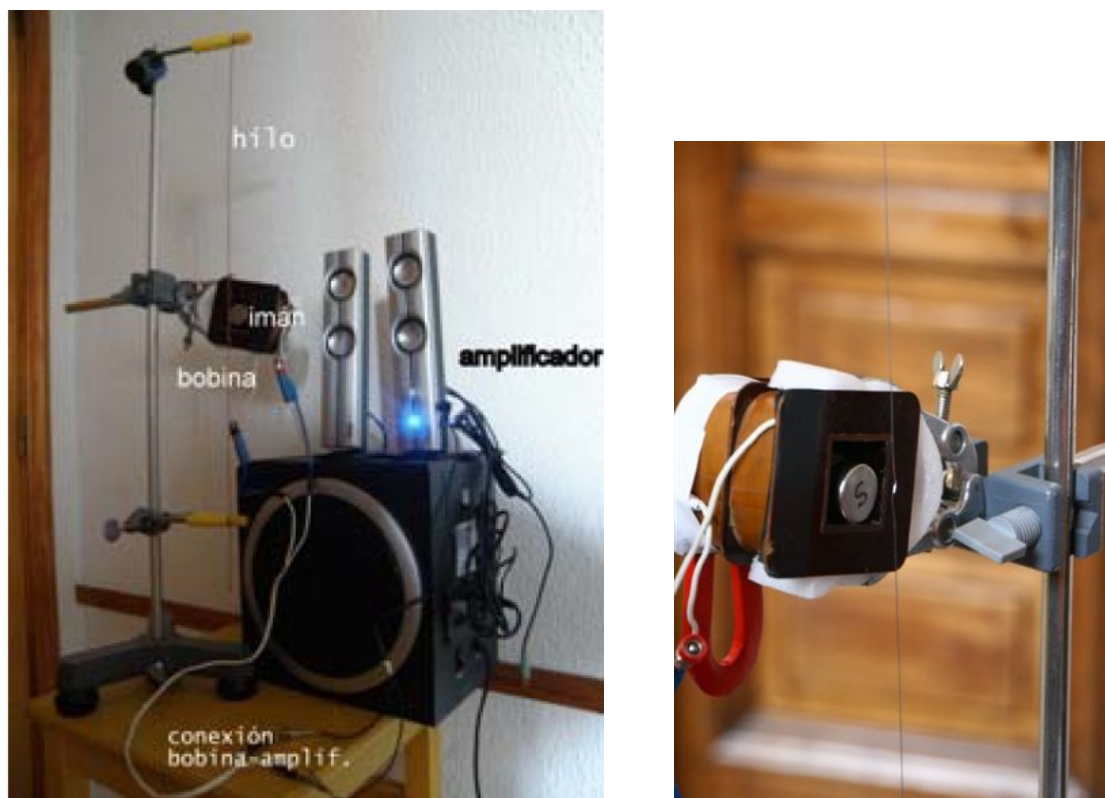


Figura 2. (a) Esquema de construcción. (b) Detalle de la bobina captora.

Ahora sólo nos queda hacer vibrar la cuerda. Una mano sujeta la varilla tal y como lo hace un músico y con la otra hacemos vibrar la cuerda; o bien colocamos la varilla en su pie para tener las dos manos libres. Veremos formarse una onda estacionaria y oiremos en los altavoces el sonido característico del instrumento que acabamos de fabricar.

### Algunos conceptos a recordar

Con esta guitarra se pueden comprobar algunas leyes de la acústica (Cortel 1997, Franco 2010). Pero antes conviene que refresquemos unas pocas ideas que gobiernan el sonido producido por una cuerda tensa.

Una cuerda tensa, de longitud determinada y sujeta por sus extremos, tiene cierto número de patrones naturales de vibración, denominados modos propios. Los extremos de la cuerda son nodos, ya que estos puntos se encuentran fijos. El primer modo propio (primer armónico) tiene dos nodos y un vientre, la longitud de la cuerda es igual a  $\lambda/2$ , y la frecuencia natural que le corresponde es la llamada frecuencia fundamental; en la expresión anterior,  $\lambda$  es la longitud de onda de la onda producida en la cuerda. El siguiente modo ocurre cuando la longitud de la cuerda es igual a  $\lambda$  (tres nodos y dos vientres) y la frecuencia que le corresponde será el doble de la fundamental (tono más alto). Las frecuencias de los modos restantes son múltiplos enteros de la fundamental. El conjunto de todas ellas forma una serie armónica, tal como se ilustra en la figura 3.

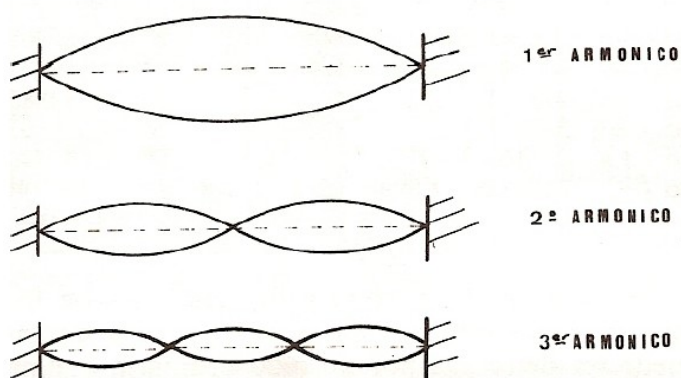


Figura 3. Armónicos de una cuerda tensa con sus extremos fijos.

La cuerda de una guitarra vibra con la longitud determinada por la distancia de la cejilla al puente ( $\approx 66$  cm) o de los trastes al puente. Si acortamos esta distancia a la mitad (pisando la cuerda en el traste correspondiente) entonces la frecuencia emitida será el doble que la anterior. Así, si la cuerda daba inicialmente un Mi, al pisar en su centro (traste 12) y pulsar la cuerda nuevamente tendremos otro Mi (pero de una octava superior).

La frecuencia de la cuerda de la guitarra se puede variar ya sea cambiando la tensión de la cuerda o cambiando su longitud. Por ejemplo, la tensión en las cuerdas se varía por medio del giro de clavijas situadas en el clavijero del instrumento. Una vez que la guitarra se ha “afinado”, el instrumentista varía la frecuencia al mover sus dedos, pisando los trastes a lo largo del mástil; de este modo cambia la longitud de la parte vibrante de la cuerda. Las notas musicales corresponden a unas frecuencias determinadas. Cuando se acorta la longitud, la frecuencia aumenta, ya que las frecuencias de los modos propios son inversamente proporcionales a la longitud de la cuerda. Así conseguimos la escala natural, conjunto de 8 notas o tonos musicales repetitivos de forma que la octava nota viene a ser el comienzo de la siguiente escala. La única condición desde el punto de vista físico que a esta escala se le impone es que el oído humano escuche una determinada nota y las homólogas de las escalas anteriores y posteriores bajo un mismo tono, aunque posean diferente timbre y altura.

Un diapasón afinado a 440 Hz define la nota La de la cuarta octava. Las otras octavas de esta nota son múltiplos o submúltiplos de esta frecuencia. La asignación de las otras notas

intermedias de la escala es de origen totalmente subjetivo e histórico. La más corriente es la escala cromática; en ella las frecuencias de las notas comprendidas entre el La4 y su octava superior, La5, son las que aparecen en la tabla 1.

La4	440,0 Hz
Si	493,9 Hz
Do	523,2 Hz
Re	587,3 Hz
Mi	659,3 Hz
Fa	698,5 Hz
Sol	784,0 Hz
La5	880,0 Hz

**Tabla 1.** Escala musical.

En consecuencia, las longitudes de onda de los diferentes modos propios de una cuerda puede expresarse en la forma

$$\lambda = 2L/n \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (1)$$

donde  $L$  es la longitud de la cuerda.

Y las frecuencias naturales asociadas con estos modos se obtienen de la relación

$$f = v/\lambda = n v/(2L), \quad (2)$$

donde la rapidez de la onda  $v$  es la misma para todas las frecuencias.

Puesto que la velocidad de la onda en una cuerda depende de la tensión,  $F$ , y de su masa por unidad de longitud,  $\mu$ , en la forma  $v = \sqrt{F/\mu}$ , las frecuencias naturales de la cuerda tensa pueden expresarse como

$$f = n/(2L)\sqrt{F/\mu}. \quad (3)$$

## Estudio acústico de la guitarra

Algunas comprobaciones y medidas que nuestra guitarra nos permite realizar son:

1. Medir las frecuencias de vibración. Para ello utilizaremos un micrófono conectado al ordenador para recoger del amplificador los sonidos. Mediante un programa grabador-editor de sonido, como Audacity, de sencillo manejo y cuya descarga de Internet es gratuita (Audacity 2009), mediremos la frecuencia de vibración de la cuerda para diferentes longitudes porque el programa analiza el sonido dibujando el espectro y localizando la frecuencia dominante (García Molina *et al.* 2010).
2. Calcular las velocidades de propagación de ondas transversales en la cuerda. Para ello se mide la longitud de la cuerda y se utiliza la expresión (2), además del dato obtenido antes para la correspondiente frecuencia.
3. Calcular las tensiones aplicadas. Con una balanza calcularemos la masa por unidad de longitud de la cuerda y, además, usaremos la ecuación (3) junto con los datos ya conocidos.
4. Generar armónicos. Cuando una cuerda tensa se deforma de manera que su forma inicial corresponda a cualquiera de sus armónicos, después de ser liberada vibrará a la frecuencia de ese armónico. Pero, si la cuerda se golpea o se puntea, la vibración resultante incluirá frecuencias de varios armónicos, incluyendo a la fundamental. Podemos detectarlos colocando simplemente el dedo, tocando con suavidad, sobre el punto medio de la cuerda al mismo tiempo que pulsamos, así anularemos el sonido fundamental y sólo escucharemos prácticamente el segundo armónico.
5. Relacionar las frecuencias entre diversas notas. El mástil de la guitarra es un lugar de trabajo muy apropiado para comprobar las relaciones de frecuencias entre las diversas notas musicales.

No vamos a entrar aquí en una descripción exhaustiva de conceptos que se encuentran en los manuales de teoría de la música, pero conviene saber que la distancia entre dos notas

consecutivas tiene un valor que se denomina tono, excepto los intervalos de Mi a Fa y de Si a Do que son un semitono. Si admitimos que un tono consta de dos semitonos encontramos que la escala musical consta de 12 semitonos. La explicación de estas alteraciones es compleja y razones de tipo histórico se mezclan con las de tipo físico, técnico y subjetivo. Ello justifica los 12 trastes que se observan en la figura 4. Pisando de un traste al siguiente el sonido incrementa su frecuencia en un semitono.

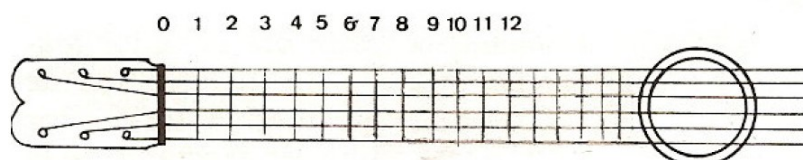


Figura 4. Doce primeros trastes del mástil de la guitarra.

La guitarra que hemos construido no tiene trastes, pero podemos sujetar la cuerda, firmemente, con dos dedos, a diferentes distancias, para comprobar, cualitativamente, cómo varía la frecuencia con la longitud.

Las separaciones entre trastes pueden obtenerse, con la ayuda de una regla graduada, sin más que tener en cuenta que las frecuencias son inversamente proporcionales a las longitudes de la cuerda vibrante.

## Conclusión

Se ha presentado algunas de las posibilidades didácticas de la guitarra eléctrica, con las que se ha pretendido solamente demostrar que los instrumentos musicales son interesantes mesas de laboratorio que pueden aprovecharse como fuente de contrastes teoría-experiencia. En particular, se muestra la guitarra eléctrica como ejemplo de aportación física a la música.

Sin embargo hay que rendirse ante aquellos que prefieren deleitarse interpretando un rock más que analizando las intrincadas leyes de su acústica.

## Referencias

- Audacity (2009) <http://www.softonic.com/s/audacity-gratis> (consulta realizada el 06.01.09)
- Cortel A. (1997) *Las ondas. La luz y el sonido*. ICE Universitat de Barcelona.
- Franco Á., *Curso interactivo de Física*. <http://www.sc.chu.es/sbweb/fisica/default.htm> (consulta realizada el 06.05.10).
- García Molina R., Piñol N., Abellán J. (2010) Se ve, se siente... el sonido está presente. *Alambique* 64, 72-78.
- Horton N. G., Moore T. R. (2009) Modeling the magnetic pickup of an electric guitar. *American Journal of Physics* 77, 144-150.
- Serway R. A., Jewett J. W. (2003) Cap. 23 en *Física*. Madrid. Thompson.