

## ■ INTRODUCCIÓN

¿Qué es un inductor? Cuando un conductor de electricidad es recorrido por una corriente eléctrica, alrededor del mismo se genera un campo magnético similar al campo magnético terrestre. El campo magnético es por supuesto invisible a los sentidos de un ser humano y no tienen manifestaciones evidentes de su existencia como el campo eléctrico. En efecto, si nosotros tomamos nuestras bolitas metálicas y les aplicamos una tensión creciente llegará el momento en que se producirá un arco eléctrico con manifestaciones luminosas y acústicas muy evidentes, que seguramente al lector le recordaran a Frankenstein.

Se podría decir que no es en realidad una manifestación del campo eléctrico lo que estamos percibiendo sino justamente su ruptura cuando los electrones tienen suficiente energía como para saltar el espacio aislante entre las esferas. Pero lo cierto es que se produce un arco en el lugar donde se estaba desarrollando el campo eléctrico.

En cambio Ud. puede tomar un conductor hacerle pasar una corriente creciente por él y no se va a producir ninguna manifestación evidente del campo magnético aunque la corriente llegue a valores muy grandes.

Si queremos estar seguro de que se produce un campo magnético debemos hacerlo utilizando algún dispositivo sensible al campo magnético y por ahora el único que conocemos es la famosa brújula.

Todo aquello que se puede aprender con la experiencia realizada en un trabajo práctico no debe dejar de realizarse jamás. Así que vamos a relatar como realizar un trabajo práctico muy interesante utilizando una brújula y la red de energía eléctrica domiciliaria.

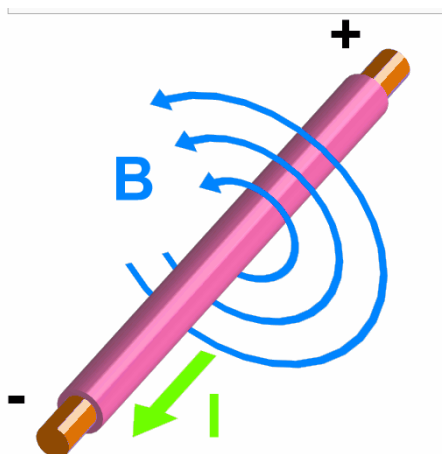
## ■ TRABAJO PRÁCTICO SOBRE ELECTROMAGNETISMO

Vamos a necesitar una brújula y un artefacto eléctrico de elevado consumo como por ejemplo una estufa o una plancha. Como primera medida Ud. debe construir un pequeño prolongador para la red domiciliaria; con un 1 metro de longitud construido con cable de 1,5 a 3 mm<sup>2</sup> de sección es suficiente. La única característica especial de este cable es que debe tener sus conductores no paralelos (deben ser conductores simples y no formando un par o abrir el par cortado el aislante plástico que los une).

Imaginemos que usa una estufa eléctrica. Coloque la brújula sobre la mesa y oriéntela con la punta roja hacia el norte. Acerque uno de los cables del par del prolongador a la brújula. Conecte la estufa y observará una fuerte oscilación de la aguja indicando que el campo magnético terrestre sufrió una grave variación.

Por ultimo le pedimos que tome el conductor y lo enrosque sobre si mismo generando un rulo de unos 10 cm. y unas 10 vueltas. Ahora realice la misma experiencia orientando el rulo en diferentes posiciones. Observe que el efecto se multiplica es decir que el campo magnético generado se refuerza con cada espira del rulo. Lo que acabamos de construir es un inductor o bobina elemental con núcleo de aire.

En la figura 1 se puede observar un conductor eléctrico y la forma del campo magnético que se genera a su alrededor.



**Fig. 1** Campo magnético alrededor de un conductor

Cuando este conductor se enrolla sobre si mismo el campo magnético de una espira se refuerza con el campo magnético de la espira anexada y así sucesivamente hasta lograr un campo magnético reforzado.

## ■ EL INDUCTOR EN CORRIENTE CONTINUA (CC)

Antes de analizar al inductor recordemos las características de un capacitor. Si Ud. carga a un capacitor y lo aísla de toda carga el capacitor quedará cargado permanentemente; es decir que el capacitor es un componente que retiene la carga. Si se conecta un capacitor a una fuente de tensión sabemos que la tensión sobre el capacitor variará suavemente de modo que debe transcurrir un tiempo hasta que el capacitor se cargue. Esto significa que un capacitor se opone a los cambios de tensión, si está descargado quiere seguir estándolo y recién después de tener aplicada una corriente aumenta la tensión sobre el dependiendo de la capacidad del capacitor.

Si Ud. pretende cargar un capacitor rápidamente conectándolo sobre una batería, el capacitor protesta generando una chispa de corriente (rojiza) que inclusive puede arrastrar material de los alambres de conexión.

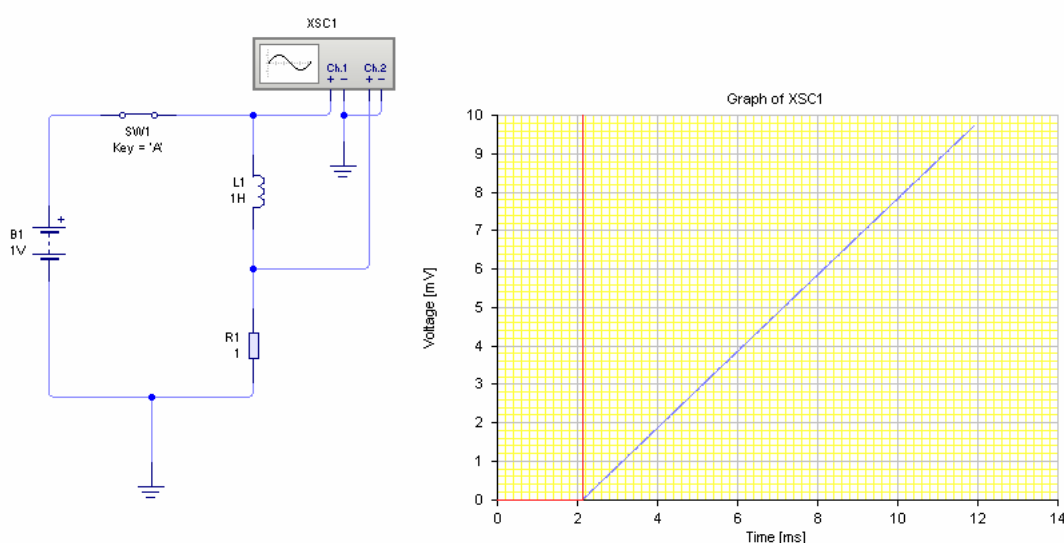
El inductor tiene características absolutamente inversas. Si Ud. lo conecta directamente a una fuente no se producen chispas porque la corriente aumenta lentamente, dependiendo de la inductancia del inductor. Se puede decir, que un inductor se opone a los cambios de la corriente que circula por él generando una tensión inversa a la de la fuente. Esta tensión tiene inclusive un nombre: se llama fuerza contraelectromotriz. El laboratorio virtual Live Wire nos permite realizar un trabajo práctico virtual muy instructivo para visualizar la corriente circulante por un inductor sometido a la acción de una batería.

Así como utilizamos un osciloscopio para visualizar la tensión sobre un capacitor usaremos un osciloscopio para medir la corriente que circula por un inductor. Pero el osciloscopio solo responde a las variaciones de tensión y nosotros queremos ver variaciones de corriente.

## ¿Existe algún componente que entregue una tensión proporcional a la corriente que lo circula?

Existe, y Ud. ya lo conoce, se llama resistor. En efecto un resistor genera sobre él una tensión igual a la corriente que lo circula multiplicado por la resistencia del resistor es decir  $I = V \cdot R$ .

Pero Ud. se preguntará si el agregado de un resistor en el circuito no modifica las características del mismo haciéndole perder validez al trabajo práctico. La respuesta es que todo depende del valor del resistor agregado. Si este es muy pequeño es como si no hubiéramos agregado nada; el resistor se observa pero no influye en las ecuaciones del circuito. Por otro lado como un inductor es un componente bobinado con un alambre de cobre y ese alambre tiene cierta resistencia es como si estuviéramos aumentando la resistencia del propio bobinado. En la figura 2 se puede observar el circuito de nuestro trabajo práctico en LW.



**Fig.2** Corriente por un inductor

Nuestro circuito es simplemente un inductor de 1 Hy (unidad de medida de la inductancia) conectado a una batería de 1V mediante una llave. También tiene un resistor de 1 Ohm en donde se medirá la tensión con intención de averiguar el valor de corriente circulante. Nota: este resistor de pequeño valor se llama “shunt” y para que no afecte significativamente al funcionamiento del circuito la caída de tensión sobre él debe ser 100 veces menor a la tensión sobre el inductor (en nuestro caso no debe superar los 10 mV equivalente a una corriente circulante de 10 mA).

Antes de encender la simulación predisponga la velocidad del LW haciendo tools → simulation → timing control y poniendo 1mS como “Timing base”. En caso de duda consulte la unidad didáctica 5  
([http://www.yoreparo.com/cursos/electronica/aprender\\_electronica\\_05.php](http://www.yoreparo.com/cursos/electronica/aprender_electronica_05.php))

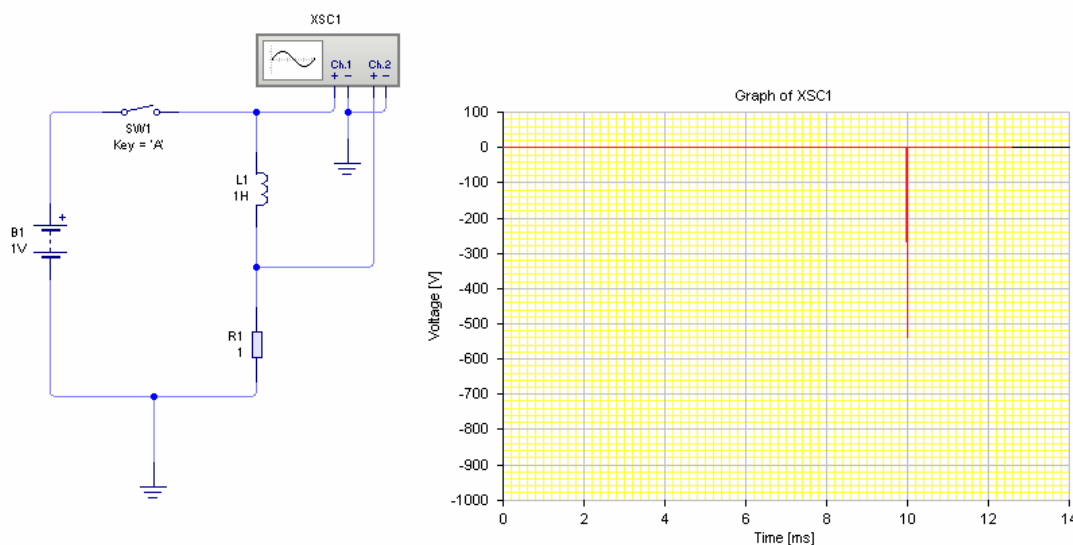
Luego de arrancar la simulación y cuando el haz llega a los 2 mS se cierra la llave SW1 por medio del mouse o pulsando la tecla “A” que fue elegida para operarla. De inmediato se observa que el haz rojo da un salto vertical hasta la tensión de batería (que en nuestro caso queda fuera de escala) y que el haz azul representativo de la corriente comienza a crecer lenta y linealmente a razón de 1 mV/mS lo cual significa un incremento de la corriente de 1 mA/mS o lo que es lo mismo 1 A/S.

Justamente elegimos estos valores para definir al inductor de 1 H $\Omega$  como aquel en que la corriente crece a razón de 1A/S cuando se le aplica una tensión de 1V.

Ahora empleando el mismo circuito vamos a apreciar la característica más distintiva del inductor que es su característica de elevar la tensión de la batería debido a la generación de la fuerza contra electromotriz. Como ya sabemos el inductor no quiere que la corriente que circula por él tenga cambios bruscos. La corriente siempre variará con suavidad cuando hay un inductor en el circuito a pesar de que Ud. cambie el circuito exterior tan drásticamente como el de nuestro ejemplo. En efecto la llave SW1 estará cerrada por un tiempo determinado haciendo que la corriente aumente hasta ese momento. Al abrir la llave el inductor trata de que la corriente no varíe bruscamente pero se encuentra con la imposibilidad de hacerlo debido a que nuestro circuito con la llave abierta es precisamente un circuito abierto y por un circuito abierto no puede circular corriente. El inductor lleno de energía magnética solo tiene un recurso por emplear. Aumentar la tensión hasta que salte un arco por la llave y así mantener la corriente lo más invariable que pueda.

### ¿Será posible simular esta condición de falla?

Solo tenemos que modificar la escala de tensión de nuestro grafico para darle lugar a que se aprecie una sobretensión negativa de la tensión de batería. Luego deje la llave cerrada por 10 mS aproximadamente y ábrala con el mouse o con la tecla A de la PC.



**Fig.3** Fenómeno de la sobretensión en un inductor

Como podemos observar se produce un pulso de tensión negativa de unos 550V que en una llave real produciría un arco de tensión (azulado, con forma de rayo y saltando entre los dos contactos). Este es un fenómeno real que cuando se produce en forma indeseada puede alterar muchos componentes del circuito.

## EL INDUCTOR COMO ACUMULADOR DE ENERGÍA MAGNÉTICA

Ahora vamos a hablar de una característica del inductor que es su capacidad de almacenar energía. Si Ud. conecta un capacitor a una batería por medio de un resistor este después de un instante de tiempo queda cargado a la tensión de la batería. Si lo

retira de la batería no se descarga porque el aire no puede conducir la electricidad y no hay efectos de sobretensión. El equivalente para cargar un inductor es hacerle circular una corriente y luego ponerlo en cortocircuito sin pasar por el circuito abierto. Esta es una condición difícil de lograr pero suponiendo que pudiera lograrse Ud. no podrá mantener cargado un inductor real por una razón muy concreta. El conductor con el que esta construido es de cobre y el cobre tiene una resistencia considerable que se calienta transformando la energía magnética acumulada en calor.

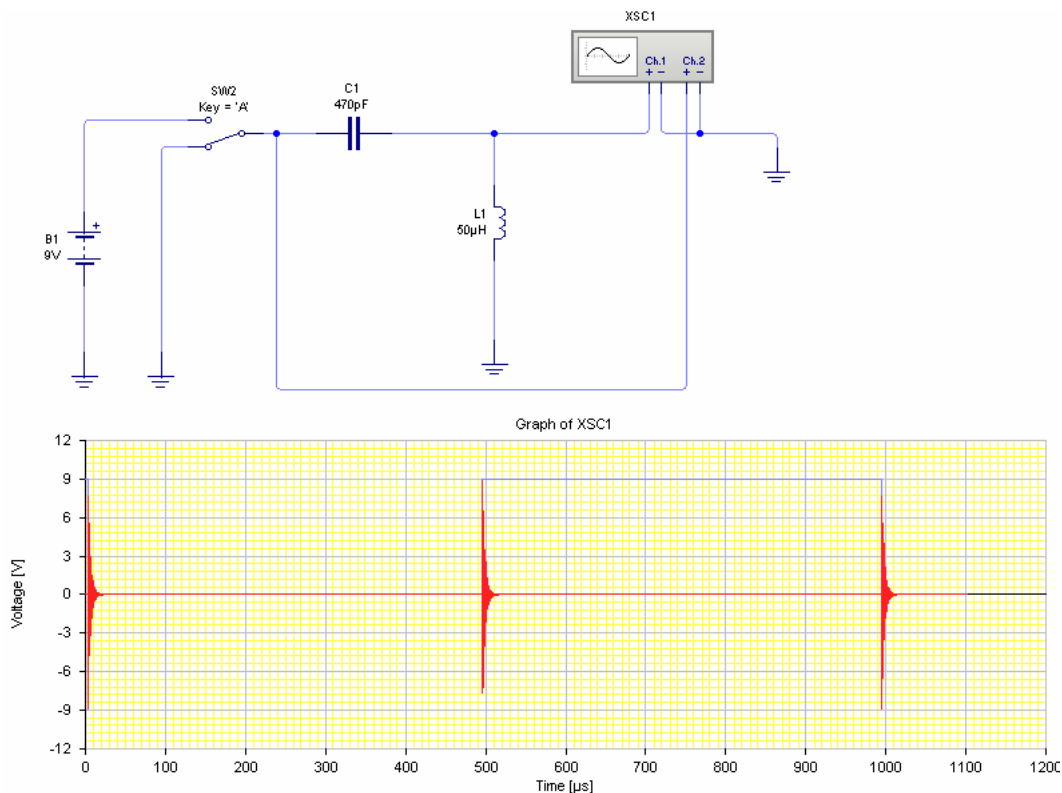
Por estas razones los técnicos suelen confundir los hechos y no consideran al inductor como un dispositivo capaz de almacenar energía. Pero el inductor al ser un símil del capacitor es potencialmente un acumulador de energía (magnética en lugar de eléctrica) y solo basta con construir un inductor real tan cercano del ideal como los capacitores reales lo son de los ideales, y por supuesto encontrar un circuito de carga adecuado que mantenga al inductor cerrado con una resistencia nula.

Hace un tiempo una universidad de EEUU realizó un experimento real usando alambres superconductores y el inductor cargado magnéticamente recorrió varias universidades en diferentes estados sin descargarse.

## ■ COMBINANDO UN INDUCTOR CON UN CAPACITOR Y UN RESISTOR

Hasta ahora nuestros circuitos tenían tan solo dos componentes; R y C ahora intentaremos conectar un tercer componente el L para analizar un fenómeno fundamental de la electrónica que nos permita realizar la experiencia de Guillermo Marconi que fue el primero en transmitir a distancia una señal de radio modulada por código Morse (el primer telégrafo sin hilos de la historia) y que es la base de toda la electrónica moderna.

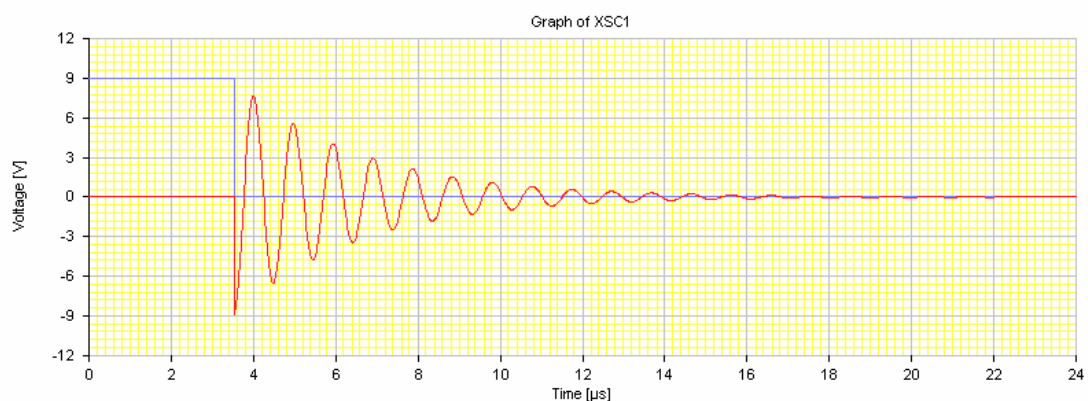
En la figura 4 se puede observar nuestro circuito básico para construir un transmisor que aun no sabemos lo que es, aunque todos los días recibimos señales de TV o de radio basadas en el proyecto que estamos encarando aunque obviamente se trata de transmisores mas sofisticados.



**Fig.4** Transmisor similar a los de Marconi con llave mecánica

Ud. puede observar solo dos componentes. El tercero existe internamente en el inductor y es la resistencia de su bobinado. El capacitor está conectado a una llave mecánica que genera una tensión continua de 0 o de 9V de acuerdo a su posición. El gráfico esa llave se opera cada 500 uS. Al segundo cero la llave está en la posición inferior de 0V permaneciendo allí hasta los 500 uS momento en que el gráfico azul indica 9V hasta los 1000 uS en que vuelve a cambiar de estado. Nota: cuando la llave está en cero volt el trazo se pierde detrás del trazo rojo.

Pero lo más importante es lo que se observa como una oscilación después de cada cambio de estado. En el gráfico indicado no se puede observar con detalle la forma de variación de la señal por eso en la figura 7.5.2 se puede observar el eje de tiempos ampliado a 2 mS por división en donde se aprecia la verdadera forma.



**Fig.5** Oscilación amortiguada

La forma de onda mostrada se llama oscilación amortiguada y se debe a la interacción del capacitor con el inductor. En principio vamos a tratar de entender como se produce esta “señal” (el termino señal se emplea para indicar tensiones o corrientes variables en el tiempo, en donde esas variaciones puedan emplearse para transmitir información de algún tipo).

Durante la primer parte del ciclo, la llave que esta hacia arriba, produce la carga rápida del capacitor desde la fuente a través de la resistencia interna de la misma y el inductor. Esto queda indicado por el trazo del haz azul que indica la tensión después de la llave y que se observa fijo en 9V. Observe que en este caso la tensión sobre la bobina (haz rojo) indica una tensión nula.

A los 3,5 uS se mueve la llave y el capacitor se conecta a masa con lo cual su carga se aplica al inductor. El capacitor observa que tiene una carga conectada sobre el y le hace circular una corriente que depende de la tensión acumulada (tensión de fuente en nuestro caso 9V) con el negativo sobre el vivo del inductor y el negativo sobre la masa. Un instante después toda la energía eléctrica del capacitor se descargó y el haz rojo llega nuevamente a cero. Pero que el capacitor esté descargado no significa que no haya energía acumulada en el circuito. En efecto, en ese momento el campo magnético sobre el inductor es máximo porque toda la energía eléctrica (capacitor) se transformó en energía magnética (inductor) debido a la ley de conservación de la energía que indica que la energía no puede desaparecer. Ahora el inductor cargado debe descargarse y solo tiene conectado sobre si mismo un capacitor así que el capacitor se carga ahora con un pico de tensión positiva y así se continuaría hasta el infinito si no fuera porque el inductor tiene una resistencia debido a alambre conductor y en ella se genera energía térmica (calor). Por esa razón los ciclos de intercambio de energía son cada vez menores hasta que la energía electromagnética termina convirtiéndose íntegramente en calor.

## Ley de Thompson

Este trabajo práctico es suficientemente enriquecedor como para que podamos deducir comprobar fácilmente una formula muy importante de la electrónica que nos indica a que velocidad se producen los intercambios energéticos. Esta formula se llama formula de Thomson y nos indica la duración de cada ciclo de intercambio desde un pasaje ascendente por cero hasta el siguiente (en nuestro caso de 1 uS leyéndolo de la gráfica). Nosotros no vamos a demostrar la ley de Thomson que esta basada en las ecuaciones del capacitor y el inductor, solo vamos a indicarla como:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

Aplicada a nuestro circuito y utilizando potencias de 10 se puede obtener que T es aproximadamente igual a 1 uS. (En realidad sería exactamente 1 uS si pudiéramos utilizar capacitores de 500 pF en lugar de 470 pF).

Pero si Ud. observa el dial de una radio de onda media o OM (en Argentina onda larga o OL) verá que no está marcada en uS sino Hz o ciclos por segundo dando lugar a un concepto denominado “frecuencia” de una señal. Si una señal dura 1 uS significa que se repetirá 1 millón de veces durante un tiempo de 1 S. Esto se obtiene por una simple regla de tres simple que indica:

Si un ciclo dura un tiempo  $T = 1 \mu\text{s}$  en un segundo se producirán  $1/T = 1.000.000$  de ciclos o un millón de ciclos o 1 Mc/Seg o un MHz en honor al científico que estudió el fenómeno que se llamaba Hertz.

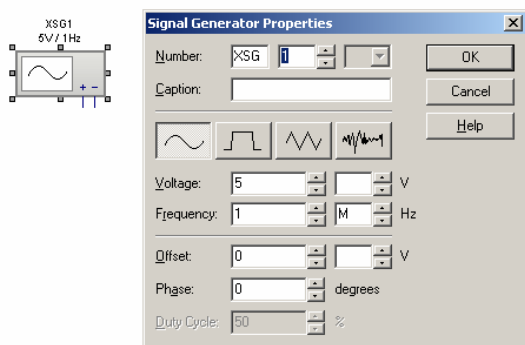
Como el lector observara 1 MHz es equivalente a 1.000 KHz y esa es la frecuencia del centro de la banda de OL que se puede captar con cualquier radioreceptor casero. ¿Y que será lo que se escuche cuando nuestra emisora se sintonice en una radio? Se va a escuchar un silenciamiento por un instante cada vez que se opere la llave SW2.

Para escuchar un tono audible es necesario mover la llave con un periodo audible. Por ejemplo un tono de 2 KHz equivale a un periodo de  $1/2.000$ avo de segundo o 500  $\mu\text{s}$  cosa que evidentemente no podemos realizar a mano. Por esa razón se debe cambiar el circuito en la sección de la llave utilizando una fuente de tensión que cambie de 0 a 9V a un ritmo programable y que aun no conocemos. Esta fuente de tensión se llama generador de funciones.

## GENERADOR DE FUNCIONES

Un generador de funciones es una fuente de alimentación (como una batería) pero cuya tensión varía a lo largo del tiempo. Existen tres formas de señal fundamentales que son la rectangular, la triangular y la sinusoidal. Nosotros conocemos ya a dos de ellas la rectangular y la sinusoidal porque están presentes en nuestro transmisor (o generador de señales de radiofrecuencias).

En la figura 6 se puede observar el frente del generador de funciones que posee el LW y que nosotros vamos a anexar a nuestro circuito. Búsquelo haciendo Gallery → input component → Signal generator.



**Fig.6** Generador de funciones

Observe en el centro del instrumento, allí existe un dibujo de la forma de señal de salida. La primera es una señal senoidal que es la misma que vimos en nuestro trabajo práctico virtual pero que en este caso no es amortiguada sino permanente. La segunda es la señal rectangular que nosotros generábamos a mano con la llave; la tercera es la señal triangular que es una sucesión de rampas obtenidas por carga y descarga de un capacitor y la última es una señal con forma aleatoria que representa el ruido que puede generar por ejemplo un TV sobre el parlante cuando está fuera de canal (lluvia).

En la parte superior se puede observar el número de posición del generador en el circuito y una ventana en blanco para colocar algún comentario. Luego debajo de los botones de forma de señal se puede observar las características más importantes del generador

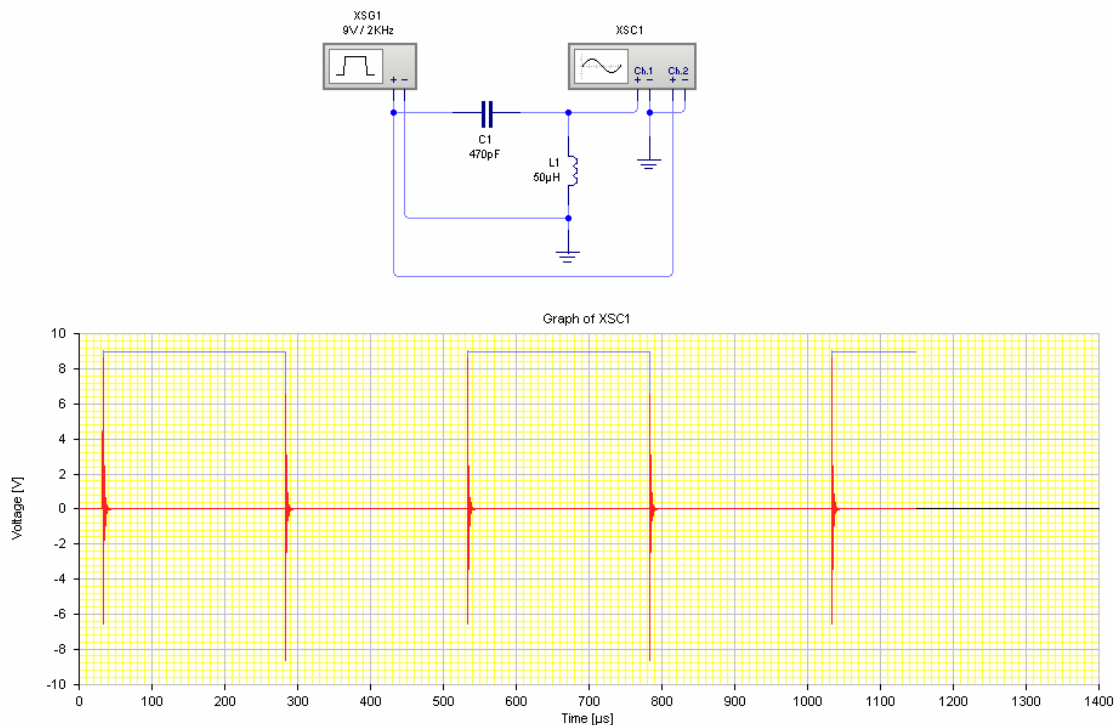


como la tensión y la frecuencia. Le pedimos al alumno que conecte un osciloscopio al generador y observe las señales que entrega el generador variando todos los parámetros para conocerlo mejor. No se olvide de predisponer el time control de acuerdo al periodo de la señal a observar.

## ■ GENERADOR DE RF MODULADA

En nuestro curso mientras los alumnos aprenden van construyendo su propio instrumental de trabajo. Y para reparar una radio hace falta un generador de AM que cubra la banda de OL. Con los conocimientos adquiridos hasta aquí y los que vamos a adquirir en las próximas unidades didácticas donde aprenderemos a programar un microprocesador PIC Ud. va a aprender a construir este generador de AM aun antes de saber que es un transistor.

Para terminar la lección 7 vamos a modificar el circuito de nuestro trabajo práctico virtual quitando la llave que manejábamos a mano y agregando un generador de funciones.

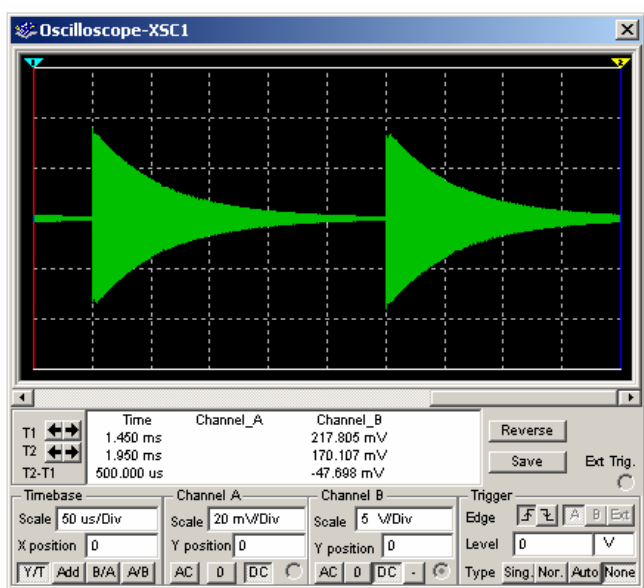


**Fig.7** Generador de RF con generador de funciones

Nuestro generador de RF consta ahora de los dos componentes anteriores C1 y L1 cuya frecuencia de resonancia según la formula de Thomson los hace generar oscilaciones de 1 MHz en el medio de la banda de OL. Estas oscilaciones no son permanentes sino que tienen forma de senoide amortiguada. Es como si nuestra emisora de radio no estuviera permanentemente encendida sino que se encendiera a plena potencia cada 500 uS (semiperiodo de la señal entregada por el generador de funciones XSG1) y luego se atenuara generando unos 20 o 30 ciclos con potencia decreciente.

En realidad el tiempo de decaimiento real que tendremos en nuestro prototipo va a ser seguramente muy superior de acuerdo a la construcción del inductor L1. Si el inductor se construye con un alambre grueso y de poca resistencia seguramente su componente resistiva va ser muy pequeña y va a ser prácticamente un inductor ideal que genere poca

amortiguación y prácticamente va a permanecer excitado los 500  $\mu$ S. En la figura 8 se puede observar como se vería la señal sobre el inductor real con un osciloscopio real.



**Fig.8** Oscilograma real sobre L1

Seguramente el alumno estará pensando en este momento. Todo muy lindo y parece muy simple generar un señal de radio modulada en AM, pero de donde saco un generador de funciones. En la próxima entrega le vamos a explicar como realizar un generador de funciones programable con un microprocesador que cuesta algo de 1,5 U\$S para comenzar introducirse en el mundo de las técnicas digitales y construir un instrumento práctico para nuestro taller que genere señales de audio y RF modulada.

## CONCLUSIONES

Los clásicos cursos básicos de electrónica sin laboratorios virtuales y para componentes clásicos acostumbraban a tratar los temas con un orden totalmente diferente al que estamos empleando nosotros. Mi experiencia me indica que ese modo de enseñar la electrónica está muerto y enterrado. La electrónica actual requiere una velocidad de aprendizaje que el concepto antiguo no puede adoptar.

En un curso clásico antes de comenzar con los microprocesadores el alumno debía aprender toda la electrónica analógica clásica, es decir que se mencionaban y estudiaban teóricamente todos los componentes activos como los transistores, diodos y circuitos integrados analógicos y recién después se pasaba a mundo de los circuitos digitales como compuertas y microprocesadores programables.

Seguramente los docentes que están siguiendo este curso se estarán quemando las vestiduras pensando a donde quiero llegar con esta forma de enseñar que revierte todo la metodología clásica. Quiero llegar a interesar al alumno, para que haga lo único que no se puede lograr con los métodos clásicos, aprender armando dispositivos que funcionen, que sean útiles y didácticos para aprender trabajando que es la mejor forma de aprender. Y que esa etapa del armado, esté tan al comienzo del curso como sea posible. Así espero evitar deserciones y aumentar el interés de los más jóvenes que son siempre de los más inquietos y deseosos de experimentar.