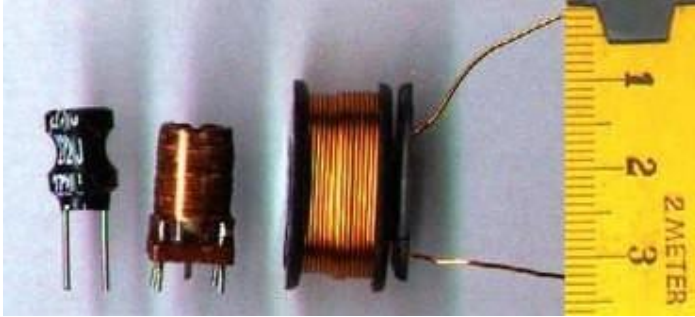


### 3.-Bobinas o inductores



**Figura 1:** Inductores.

Un **inductor** o **bobina** es un componente pasivo de un circuito eléctrico que, debido al fenómeno de la autoinducción, almacena energía en forma de campo magnético.

#### 3.1.-Construcción

Un inductor está constituido usualmente por una bobina de material conductor, típicamente alambre o hilo de cobre esmaltado. Existen inductores con núcleo de aire o con núcleo de un material ferroso, para incrementar su inductancia.

Los inductores pueden también estar contruidos en circuitos integrados, usando el mismo proceso utilizado para realizar microprocesadores. En estos casos se usa, comúnmente, el aluminio como material conductor. Sin embargo, es raro que se construyan inductores dentro de los circuitos integrados; es mucho más práctico usar un circuito llamado "girador" que, mediante un amplificador operacional, hace que un condensador se comporte como si fuese un inductor. El inductor consta de las siguientes partes: Pieza polar: Es la parte del circuito magnético situada entre la culata y el entrehierro, incluyendo el núcleo y la expansión polar. Núcleo: Es la parte del circuito magnético rodeada por el devanado inductor. Devanado inductor: Es el conjunto de espiras destinado a producir el flujo magnético, al ser recorrido por la corriente eléctrica.

Expansión polar: Es la parte de la pieza polar próxima al inducido y que bordea al entrehierro. Polo auxiliar o de conmutación: Es un polo magnético suplementario, provisto o no, de devanados y destinado a mejorar la conmutación. Suelen emplearse en las máquinas de mediana y gran potencia. Culata: Es una pieza de sustancia ferromagnética, no rodeada por devanados, y destinada a unir los polos de la máquina.

También pueden fabricarse pequeños inductores, que se usan para frecuencias muy altas, con un conductor pasando a través de un cilindro de ferrita o granulado.

#### 3.2.-Energía almacenada

La bobina almacena energía eléctrica en forma de campo magnético cuando aumenta la intensidad de corriente, devolviéndola cuando ésta disminuye. Matemáticamente se puede demostrar que la energía,  $\mathcal{E}$ , almacenada por una bobina con inductancia  $L$ , que es recorrida por una corriente de intensidad  $I$ , viene dada por:

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2}LI^2$$

### 3.3.-Fuerza electromotriz autoinducida

Una variación de la intensidad de corriente ( $i(t) = \Delta I / \Delta t$ ) dará como resultado una variación del campo magnético y, por lo mismo, un cambio en el flujo que está atravesando el circuito. De acuerdo con la Ley de Faraday, un cambio del flujo, origina una fuerza electromotriz autoinducida. Esta fuerza electromotriz, de acuerdo con la Ley de Lenz, se opondrá a la causa que lo origina, esto es, la variación de la corriente eléctrica, por ello suele recibir el nombre de **fuerza contraelectromotriz**. Su valor viene dado por la siguiente ecuación diferencial:

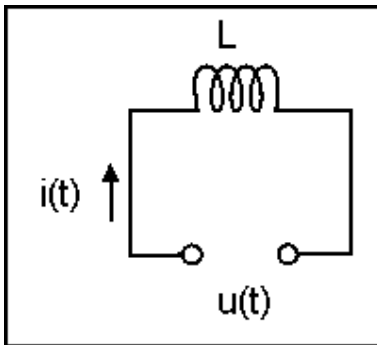
$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = -L\frac{di}{dt}$$

donde el signo menos indica que se opone a la causa que lo origina.

En un inductor ideal, la fuerza contra-electromotriz autoinducida es igual a la tensión aplicada al inductor. La fórmula precedente puede leerse de esta manera: Si uno de los bornes del inductor es positivo con respecto al otro, la corriente que entra por el primero aumenta con el tiempo.

Cuando el inductor no es ideal porque tiene una resistencia interna en serie, la tensión aplicada es igual a la suma de la caída de tensión sobre la resistencia interna más la fuerza contra-electromotriz autoinducida.

### 3.4.-Comportamientos ideal y real



**Figura 2:** Circuito con inductancia.

La bobina ideal (figura 2) puede definirse a partir de la siguiente ecuación:

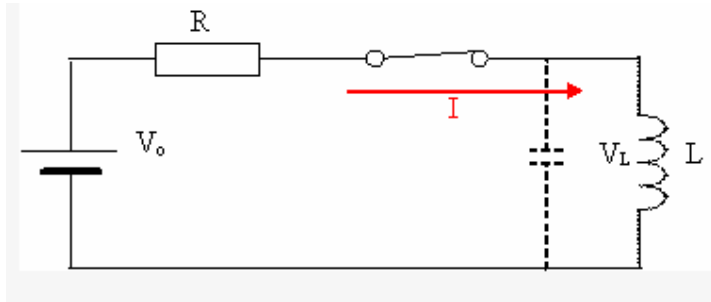
$$u(t) = L\frac{di}{dt}$$

donde,  $L$  es la inductancia,  $u(t)$  es la función diferencia de potencial aplicada a sus bornes e  $i(t)$  la intensidad resultante que circula.

### 3.5.-Comportamiento en corriente continua

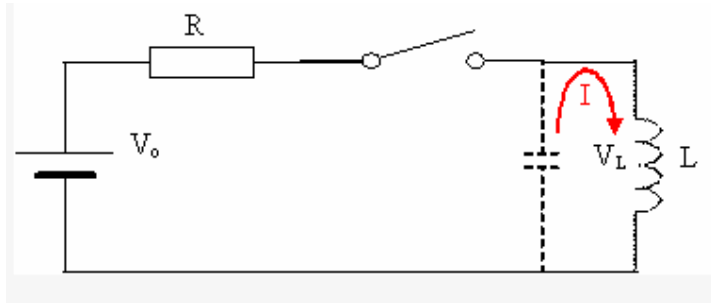
Una bobina ideal en CC se comporta como un cortocircuito (conductor ideal) mientras que la real se comporta como una resistencia cuyo valor  $R_L$  (figura 5a) será el de su devanado. Esto es así en régimen permanente ya que en régimen transitorio, esto es, al conectar o desconectar un circuito con bobina, suceden fenómenos electromagnéticos que inciden sobre la corriente .

### 3.5.1.-Comportamiento a la interrupción del circuito



La alimentación carga el inductor a través la resistencia.

Examinemos el comportamiento práctico de un inductor cuando se interrumpe el circuito que lo alimenta. En el dibujo de derecha aparece un inductor que se carga a través una resistencia y un interruptor. El condensador dibujado en punteado representa las capacidades parásitas del inductor. Está dibujado separado del inductor, pero en realidad forma parte de él, porque representa las capacidades parásitas de las vueltas del devanado entre ellas mismas. Todo inductor tiene capacidades parásitas, incluso los devanados especialmente concebidos para minimizarlas como el devanado en "nido de abejas".

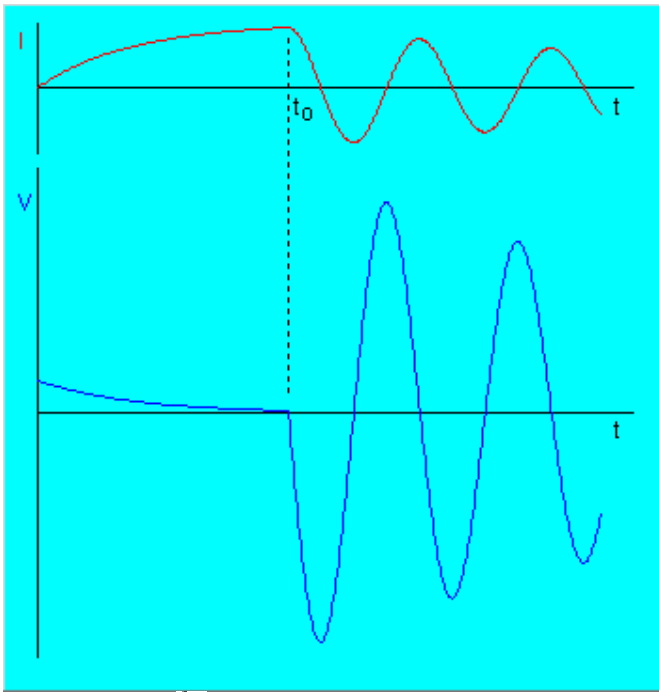


El interruptor se abre. La corriente solo puede circular cargando las capacidades parásitas.

A un cierto momento  $t_0$  el interruptor se abre. Si miramos la definición de inductancia:

vemos que, para que la 
$$V = L \frac{dI}{dt}$$
 corriente que atraviesa el inductor se detenga

instantáneamente, sería necesario la aparición de una tensión infinita, y eso no puede suceder. ¿Qué hace la corriente? Pues continúa pasando. ¿Por donde? Ella "se las arregla" para continuar, bajo la constante universal de que **"la energía ni se crea ni se destruye, se transforma"** Al principio, el único camino que tiene es a través de las capacidades parásitas. La corriente continúa circulando a través la capacidad parásita, cargando negativamente el punto alto del condensador en el dibujo.

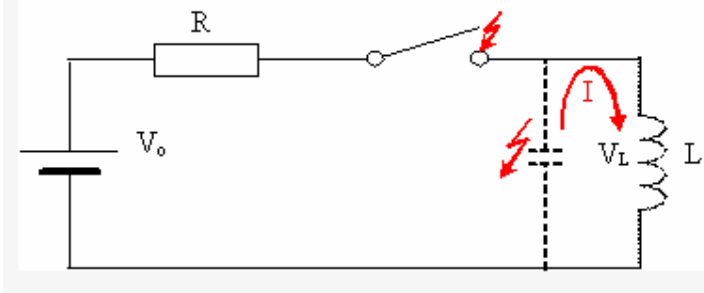


En el instante  $t_0$  el interruptor se abre dejando la inductancia oscilar con las capacidades parásitas.

Nos encontramos con un circuito LC que oscilará a una pulsación:

donde  $C$  es el valor  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  equivalente de las capacidades parásitas. Si los aislamientos del devanado son suficientemente resistentes a las altas tensiones, y si el interruptor interrumpe bien el circuito, la oscilación continuará con una amplitud que se amortiguará debido a las pérdidas dieléctricas y resistivas de las capacidades parásitas y del conductor del inductor. Si además, el inductor tiene un núcleo ferromagnético, habrá también pérdidas en el núcleo. Hay que ver que la tensión máxima de la oscilación puede ser muy grande. Eso le vale el nombre de **sobretensión**. Se comprende que pueda ser grande, ya que el máximo de la tensión corresponde al momento en el cual toda la energía almacenada en la bobina  $\frac{1}{2}LI^2$  habrá pasado a las capacidades parásitas  $\frac{1}{2}CV^2$ . Si estas son pequeñas, la tensión puede ser muy grande y pueden producirse arcos eléctricos entre espiras de la bobina o entre los contactos abiertos del interruptor. Aunque los arcos eléctricos sean frecuentemente perniciosos y peligrosos, otras veces son útiles y deseados. Es el caso de la soldadura al arco, lámparas a arco, alto horno eléctrico y hornos a arco.

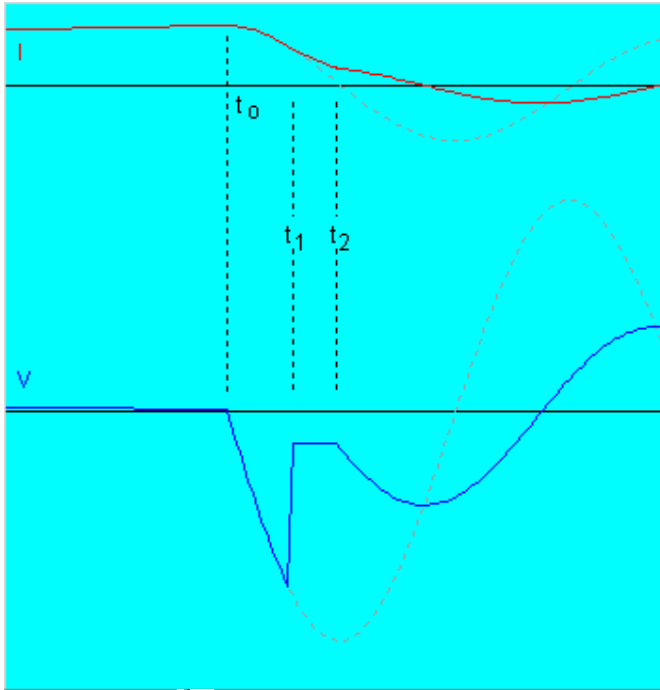
En el caso de la soldadura al arco, el interruptor de nuestro diagrama es el contacto entre el metal a soldar y el electrodo.



Si la tensión es grande pueden producirse arcos en el interruptor o en la bobina.

Lo que sucede cuando el arco aparece depende de las características eléctricas del arco. Y las características de un arco dependen de la corriente que lo atraviesa. Cuando la corriente es grande (decenas de amperios), el arco está formado por un camino espeso de moléculas y átomos ionizados que presentan poca resistencia eléctrica y una inercia térmica que lo hace durar. El arco disipa centenas de vatios y puede fundir metales y crear incendios. Si el arco se produce entre los contactos del interruptor, el circuito no estará verdaderamente abierto y la corriente continuará a circular.

Los arcos no deseados constituyen un problema serio y difícil de resolver cuando se utilizan altas tensiones y grandes potencias.



En el instante  $t_1$  se produce un arco que dura hasta el instante  $t_2$ . A partir de ese momento, la inductancia oscila con las capacidades parásitas. En punteado la corriente y la tensión que habría si el arco no se produjese.

Cuando las corrientes son pequeñas, el arco se enfría rápidamente y deja de conducir la electricidad.

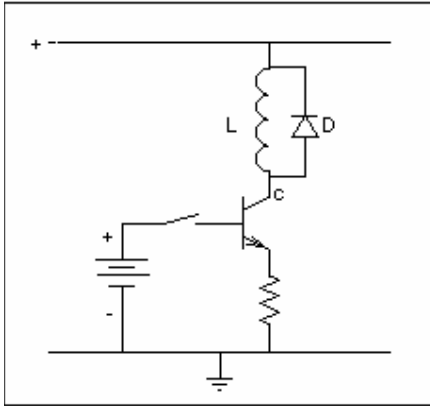
En el dibujo de la derecha hemos ilustrado un caso particular que puede producirse, pero que solo es uno de los casos posibles. Hemos ampliado la escala del tiempo alrededor de la apertura del interruptor y de la formación del arco.

Después de la apertura del interruptor, la tensión a los bornes de la inductancia aumenta (con signo contrario). En el instante  $t_1$ , la tensión es suficiente para crear un arco entre dos vueltas de la bobina. El arco presenta poca resistencia eléctrica y descarga rápidamente las capacidades parásitas. La corriente, en lugar de continuar a cargar las capacidades parásitas, comienza a pasar por el arco. Hemos dibujado el caso en el cual la tensión del arco es relativamente constante. La corriente del inductor disminuye hasta que al instante  $t_2$  sea demasiado pequeña para mantener el arco y este se apaga y deja de conducir. La corriente vuelve a pasar por las capacidades parásitas y esta vez la oscilación continúa amortiguándose y sin crear nuevos arcos, ya que esta vez la tensión no alcanzará valores demasiado grandes.

Recordemos que este es solamente un caso posible.

Se puede explicar por qué puede uno recibir una pequeña descarga eléctrica al medir la resistencia de un bobinado con un simple óhmetro que solo puede alimentar unos miliamperios y unos pocos voltios. La razón es que para medir la resistencia del bobinado, le hace circular unos miliamperios. Si, cuando se desconectan los cables del óhmetro, sigue uno tocando con los dedos los bornes de la

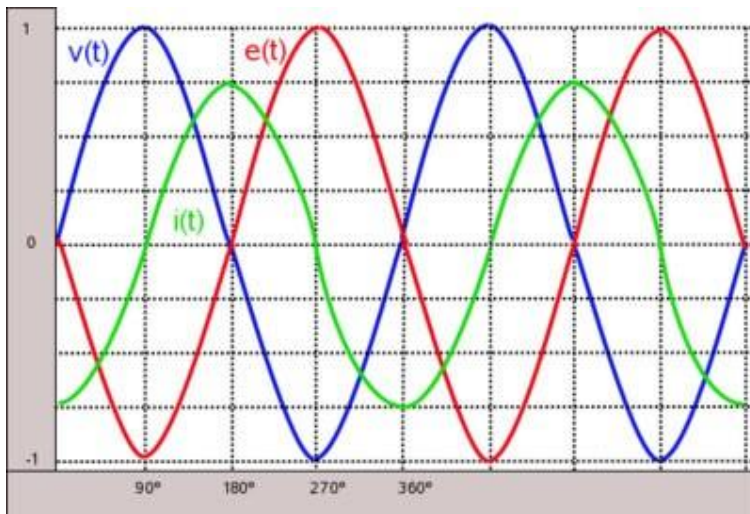
bobina, los miliamperios que circulaban en ella continuaran a hacerlo, pero pasando por los dedos.



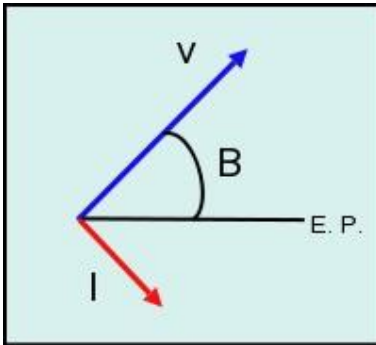
El diodo sirve de camino a la corriente del inductor cuando el transistor se bloquea. Eso evita la aparición de altas tensiones entre el colector y la base del transistor.

La regla es que, para evitar los arcos o las sobretensiones, hay que proteger los circuitos previendo un pasaje para la corriente del inductor cuando el circuito se interrumpe. En el diagrama de la derecha hay un ejemplo de un transistor que controla la corriente en una bobina (la de un relé, por ejemplo). Cuando el transistor se bloquea, la corriente que circula en la bobina carga las capacidades parásitas y la tensión del colector aumenta y puede sobrepasar fácilmente la tensión máxima de la unión colector-base y destruir el transistor. Colocando un diodo, como el diagrama, la corriente encuentra un camino en el diodo y la tensión del colector estará limitada a la tensión de alimentación más los 0,6 V del diodo. El precio funcional de esta protección es que la corriente de la bobina tarda más en disminuir y eso, en algunos casos, puede ser inconveniente. Se puede disminuir el tiempo si, en lugar de un diodo rectificador, se coloca un diodo zener. No hay que olvidar que el dispositivo de protección deberá ser capaz de absorber casi toda la energía almacenada en el inductor.

### 3.6.-Comportamiento en corriente alterna



**Figura 3.-** Diagrama cartesiano de las tensiones y corriente en una bobina.



**Figura 4.** Diagrama vectorial

En CA, una bobina ideal ofrece una resistencia al paso de la corriente que recibe el nombre de **reactancia inductiva**,  $X_L$ , cuyo valor viene dado por el producto de la pulsación ( $\omega = 2\pi f$ ) por la inductancia,  $L$ :

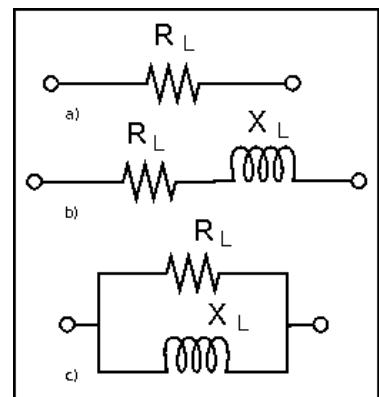
$$X_L = \omega L$$

Si la pulsación está en radianes por segundo (rad/s) y la inductancia en henrios (H) la reactancia resultará en ohmios.

Al conectar una **CA senoidal**  $v(t)$  a una bobina aparecerá una corriente  $i(t)$ , también senoidal, esto es, variable, por lo que, como se comentó más arriba, aparecerá una fuerza contraelectromotriz,  $-e(t)$ , cuyo valor absoluto puede demostrarse que es igual al de  $v(t)$ . Por tanto, cuando la corriente  $i(t)$  aumenta,  $e(t)$  disminuye para dificultar dicho aumento; análogamente, cuando  $i(t)$  disminuye,  $e(t)$  aumenta para oponerse a dicha disminución. Esto puede apreciarse en el diagrama de la figura 3. Entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  la curva  $i(t)$  es negativa, disminuyendo desde su valor máximo negativo hasta cero, observándose que  $e(t)$  va aumentando hasta alcanzar su máximo negativo. Entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$ , la corriente aumenta desde cero hasta su valor máximo positivo, mientras  $e(t)$  disminuye hasta ser cero. Desde  $180^\circ$  hasta los  $360^\circ$  el razonamiento es similar al anterior.

Dado que la tensión aplicada,  $v(t)$  es igual a  $-e(t)$ , o lo que es lo mismo, está desfasada  $180^\circ$  respecto de  $e(t)$ , resulta que la corriente  $i(t)$  queda retrasada  $90^\circ$  respecto de la tensión aplicada.

Consideremos por lo tanto, la  $u(t) = V_0 \cdot \sin(\omega t + \beta)$ , tanto, la bobina  $L$ , como la de la figura 2, a la que se aplica una tensión alterna de valor:



**Figura 5.:** Circuitos equivalentes de una bobina real en CC, a), y en CA, b) y c).

De acuerdo con la ley de Ohm circulará una corriente alterna, retrasada  $90^\circ$  ( $\pi/2$ ) respecto a la

tensión aplicada (figura 4), de valor:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = I_0 \cdot \sin(\omega t + \beta - \frac{\pi}{2}),$$

$$\vec{I} = I \angle \beta - 90^\circ$$

donde  $I_0 = \frac{V_0}{X_L}$ . Si se representa el valor eficaz de la corriente obtenida en forma polar.

Y operando matemáticamente:

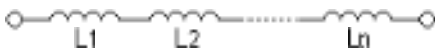
$$\vec{I} = \frac{V}{X_L} \angle \beta - 90^\circ = \frac{V \angle \beta}{X_L \angle 90^\circ}$$

Por lo tanto, en los circuitos de CA, una bobina ideal se puede asimilar a una magnitud compleja sin parte real y parte imaginaria positiva:

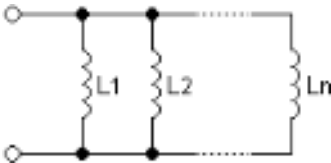
$$\vec{X}_L = 0 + X_L j = X_L \angle 90^\circ$$

En la bobina real, habrá que tener en cuenta la resistencia de su bobinado,  $R_L$ , pudiendo ser su circuito equivalente o modelo, el que aparece en la figura 5b) o 5c) dependiendo del tipo de bobina o frecuencia de funcionamiento, aunque para análisis más precisos pueden utilizarse modelos más complejos que los anteriores.

### 3.7.-Asociaciones comunes



**Figura 6.** Asociación serie general.



**Figura 7.** Asociación paralelo general.

Al igual que la resistencias, las bobinas pueden asociarse en serie (figura 6), paralelo (figura 7) o de forma mixta. En estos casos, y siempre que no exista acoplamiento magnético, la inductancia equivalente para la asociación serie vendrá dada por:

$$L_{AB} = L_1 + L_2 + \dots + L_n = \sum_{k=1}^n L_k$$



y para la paralelo:

$$L_{AB} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{L_k}}$$

*Para la asociación mixta se procederá de forma análoga que con las resistencias.*

*Si se requiere una mayor comprensión del comportamiento reactivo de un inductor, es conveniente entonces analizar detalladamente la "Ley de Lenz" y comprobar de esta forma como se origina una reactancia de tipo inductiva , la cual nace debido a una oposición que le presenta el inductor o bobina a la variación de flujo magnético.*

