

CURSO OCW

# FUNDAMENTOS DE TRANSITORIOS EN REDES ELÉCTRICAS

Mónica Alonso Martínez

Juan Carlos Burgos Díaz

M<sup>a</sup> Ángeles Moreno López de Saá



Tema 2.  
Elementos básicos de un circuito eléctrico

## Índice

1. Elementos básicos de un circuito eléctrico	2
2. Fuentes de tensión	2
3. Fuentes de corriente	3
4. Resistencias	3
5. Condensadores	4
6. Bobinas	7
7. Origen de los transitorios electromagnéticos	8

## 1. Elementos básicos de un circuito eléctrico

En un circuito eléctrico cabe distinguir **elementos activos** (fuentes de tensión o de corriente) y **elementos pasivos** (resistencias, condensadores y bobinas). En los apartados que siguen se describen brevemente las particularidades de cada uno de estos elementos, que serán vistos en más detalle en la asignatura Fundamentos de Ingeniería Eléctrica. Otros elementos pasivos no lineales de los circuitos son los formados por material semiconductor (diodos, transistores, tiristores, etc.), que se estudiarán en la asignatura Fundamentos de Ingeniería Electrónica.

## 2. Fuentes de tensión

Una fuente de tensión proporciona una diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos (A y B en la figura 2.1) que sigue una ley temporal predeterminada. Las dos leyes temporales más utilizadas industrialmente son la constante y la sinusoidal, aunque también pueden seguir otras leyes tales como la triangular, diente de sierra, trenes de pulsos, etc.

Si la tensión en bornas de la fuente es constante se dice que la fuente de tensión es de corriente continua (en inglés DC) mientras que si la tensión en bornas de la fuente evoluciona de forma sinusoidal en el tiempo se dice que la tensión es de corriente alterna (AC).

Una fuente de tensión puede ser ideal o real. Se dice que una fuente de tensión es ideal cuando la tensión en bornas no depende de la corriente consumida por la carga conectada a la fuente. Por el contrario, en una fuente real la tensión depende de la corriente consumida por la carga. Una fuente real se puede modelar como la asociación en serie de una fuente ideal y un elemento pasivo (frecuentemente una bobina, como se verá en próximas asignaturas del grado).

La representación de una fuente de tensión se muestra en la figura 2.1.

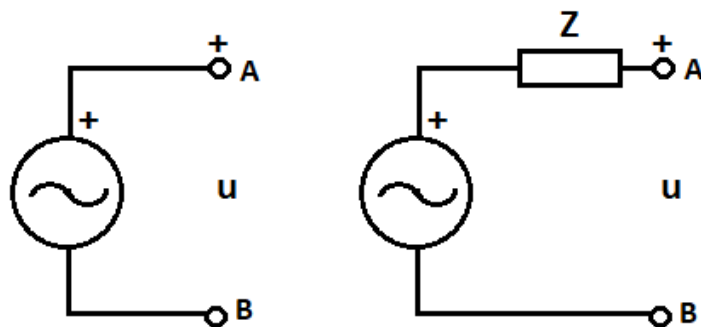


Figura 2.1: Fuente de tensión AC ideal (izquierda) y fuente de tensión AC real (derecha).

Las fuentes de tensión pueden ser independientes, si su valor no depende de ninguna otra variable del circuito, y dependientes, si el valor de la tensión es función de alguna otra variable del circuito. En esta asignatura sólo se utilizarán fuentes independientes.

A lo largo de estos apuntes se utilizará letra minúscula para denotar el valor de una magnitud en cualquier instante de tiempo; en este sentido  $u$  tiene el mismo significado que  $u(t)$ . Se utilizarán letras mayúsculas para indicar algún valor característico de una magnitud (por ejemplo, el valor máximo o el valor eficaz, cuyo significado se verá en la asignatura Fundamentos de Ingeniería Eléctrica).

Las fuentes de tensión son las fuentes más comúnmente utilizadas en un circuito eléctrico.

### 3. Fuentes de corriente

Una fuente de corriente (llamada en ocasiones *fente de intensidad*) proporciona al circuito al que alimenta una corriente que sigue una ley determinada.

Casi todo lo dicho para las fuentes de tensión es aplicable a las fuentes de corriente con pequeñas modificaciones. Así, en la figura 3.1. se muestra una fuente de corriente ideal (la corriente de la fuente no depende del circuito externo) y una fuente de corriente real (la corriente de la fuente depende del circuito externo).

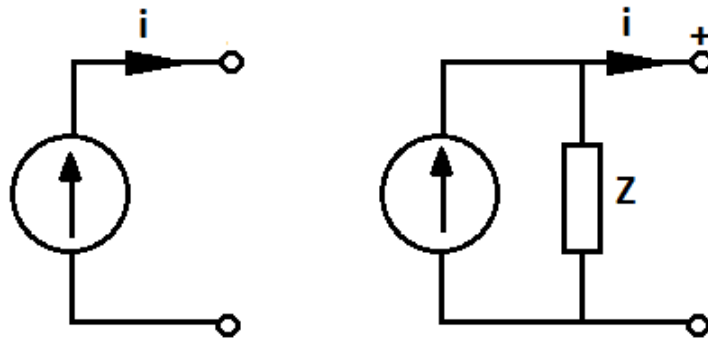


Figura 3.1: Fuente de corriente ideal (izquierda) y fuente de corriente real (derecha).

En una instalación real no es frecuente que se tengan fuentes de corriente. Se puede construir una fuente de corriente mediante un circuito electrónico y un sistema de regulación (como se verá en próximas asignaturas). No obstante, aunque las fuentes de corriente no se den mucho en la práctica, sí que son muy útiles como una herramienta para resolver problemas eléctricos que serían más difíciles de resolver de otro modo. Aunque sólo fuera por eso, el estudio de fuentes de corriente merece la pena.

### 4. Resistencias

Una resistencia es un elemento eléctrico en el que la relación entre la tensión entre sus extremos y la corriente que circula a través de ella viene definida por la siguiente ecuación, denominada Ley de Ohm

$$u = R \cdot i. \quad (4.1)$$

El valor de  $R$  también recibe el nombre de *resistencia* y puede ser constante (como ocurre en la mayoría de los problemas) o variable. En cualquier caso, el admitir que la resistencia es constante es una simplificación, ya que, cuando menos, la resistencia depende de la temperatura.

Si a una resistencia se le aplica una tensión  $u$  (excitación al problema), la resistencia responde consumiendo una corriente  $i$  que depende del valor de la resistencia. En este sentido, se puede interpretar la resistencia como la oposición de un circuito al paso de corriente eléctrica.

La resistencia se mide en *ohmios* ( $\Omega$  o, en ocasiones, Ohm), y en las representaciones gráficas de los circuitos eléctricos una resistencia se puede dibujar como un diente de sierra o como un rectángulo de color blanco (figura 4.1).

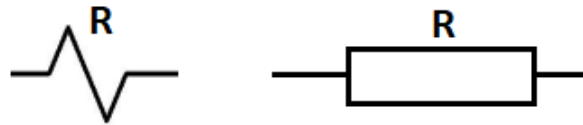


Figura 4.1: Representación de una resistencia en los esquemas gráficos de circuitos.

En un conductor con una sección  $s$  y una longitud  $l$ , si se admite que la corriente se reparte uniformemente en toda la sección recta del conductor, la resistencia viene dada por la expresión:

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (4.2)$$

En la ecuación (4.2),  $\rho$  es la resistividad del medio, que se mide en  $\Omega/\text{m}$ , aunque en ocasiones, por comodidad, se emplea el  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$  y es una propiedad característica de un material.

## 5. Condensadores

Un condensador está formado por dos electrodos metálicos (también llamados armaduras) con una cierta geometría (por ejemplo, dos rectángulos planos paralelos o dos cilindros concéntricos) separados por un dieléctrico (material aislante). El símbolo del condensador en las representaciones gráficas de los circuitos eléctricos son dos líneas paralelas cortas (figura 5.1).

Cuando se conectan los electrodos a una fuente, independientemente de si esa fuente es de corriente continua o de corriente alterna, hay una circulación de corriente entre la fuente y las armaduras del condensador que hace que en las armaduras quede una carga atrapada (figura 5.1).

Dado que la relación entre intensidad y carga es

$$i = \frac{dq}{dt}, \quad (5.1)$$

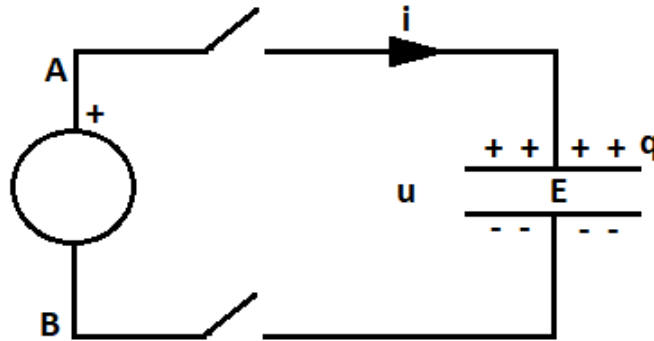


Figura 5.1: Corriente, carga, campo eléctrico y tensión (diferencia de potencial) en un condensador.

la carga atrapada en las armaduras será

$$q = \int i \cdot dt. \quad (5.2)$$

La carga atrapada en las armaduras crea un campo eléctrico en el seno del dieléctrico. El valor del campo eléctrico depende de la geometría del condensador, pero en el caso más simple de un condensador de placas planas paralelas, despreciando el efecto de borde, el campo eléctrico será:

$$E = \varepsilon \frac{q}{S_A} \quad (5.3)$$

donde  $\varepsilon$  es la permitividad del dieléctrico y  $S_A$  es la superficie de una de las armaduras.

En condensadores con geometrías más complejas, la expresión (5.3) puede ser bastante más complicada, pero siempre existe una relación de proporcionalidad entre el campo eléctrico y la carga atrapada.

La diferencia de potencial entre las armaduras se obtendrá integrando el campo eléctrico

$$u = - \int \vec{E} \cdot d\vec{l}. \quad (5.4)$$

Y entre (5.3) y (5.4) se llega a

$$u = E \cdot d = \varepsilon \cdot \frac{d}{S_A} \cdot q. \quad (5.5)$$

Las ecuaciones (5.3) y (5.5) son solamente aplicables a condensadores de placas planas paralelas, separadas una distancia  $d$ , en los que el efecto borde sea despreciable, pero la conclusión que se puede extraer de la ecuación (5.5) sí que tiene carácter general: en un condensador la diferencia de potencial es proporcional a la carga. Por ello definiremos *capacidad*  $C$  como la carga almacenada en un condensador por unidad de tensión aplicada entre sus electrodos

$$C = \frac{q}{u}. \quad (5.6)$$

La capacidad de un condensador se mide en *faradios* (F); no obstante, un condensador con una capacidad de faradios debería tener unas armaduras con una superficie muy grande, por lo que para los condensadores reales es más frecuente usar submúltiplos, como son los *milifaradios* (mF) o los *microfaradios* ( $\mu\text{F}$ ).

De las ecuaciones (5.1) y (5.6) se llega a

$$i = C \cdot \frac{du}{dt}. \quad (5.7)$$

Para obtener la expresión de la energía almacenada en el campo eléctrico del condensador se parte de un condensador inicialmente descargado. La energía consumida por el condensador de la fuente de alimentación entre dos instantes de tiempo infinitamente próximos es

$$dW_e = u \cdot i \cdot dt = u \cdot C \cdot \frac{du}{dt} \cdot dt = C \cdot u \cdot du. \quad (5.8)$$

Si el condensador se carga hasta una tensión final  $U$ , la energía almacenada será numéricamente igual a la energía tomada de la fuente

$$W_e = \int_0^U C \cdot u \cdot du = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2. \quad (5.9)$$

Los condensadores reales presentan ciertas diferencias respecto a los ideales (que se han estudiado hasta aquí). En un condensador ideal el dieléctrico es perfectamente aislante, mientras que en un condensador real el dieléctrico presenta una resistencia muy elevada, pero no infinita. Otro fenómeno de menor importancia es que en un condensador ideal los electrodos tienen una resistencia nula, mientras que en uno real los electrodos presentan una cierta resistencia al paso de corriente. Por eso, el circuito equivalente de un condensador real se representa como una asociación de un condensador ideal y dos resistencias (figura 5.2).

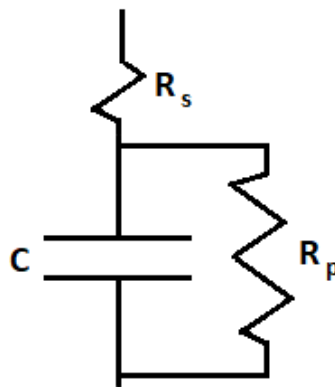


Figura 5.2: Circuito equivalente de un condensador real.

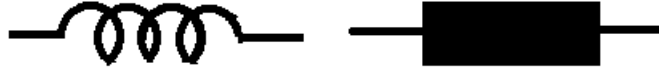


Figura 6.1: Representación de una bobina en los esquemas gráficos de circuitos.

## 6. Bobinas

Una bobina está formada por un hilo conductor arrollado en un soporte. Las bobinas serán estudiadas en más detalle en la asignatura de tercer curso “Circuitos Magnéticos y Transformadores”. El símbolo de la bobina utilizado en las representaciones gráficas de los circuitos eléctricos es un conjunto de segmentos de circunferencia unidos entre sí o bien un rectángulo de color negro, como se muestra en la figura 6.1.

Cuando circula una corriente por un conductor eléctrico, se crea un campo magnético. El hecho de que haya muchos conductores arrollados potencia el valor del campo magnético. El núcleo sobre el que está arrollada la bobina puede estar formado de material ferromagnético o de material no ferromagnético. En el primero de los casos se tiene una relación no lineal entre el flujo magnético y la corriente que lo crea, lo que añade bastante complejidad al estudio<sup>1</sup>. En el caso de que el núcleo esté formado por material no ferromagnético existe una relación lineal entre el flujo magnético  $\Phi$  y la corriente  $i$  que lo crea

$$\Phi = k \cdot i. \quad (6.1)$$

Es sabido que cuando una bobina es atravesada por un flujo variable en el tiempo se crea una fuerza electromotriz

$$u = N \cdot \frac{d\Phi}{dt}. \quad (6.2)$$

Y teniendo en cuenta la ecuación (6.1) queda

$$u = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (6.3)$$

donde la inductancia  $L$  es el número de enlaces de flujo por amperio

$$L = \frac{(N \cdot \Phi)}{i} \quad (6.4)$$

Llamaremos a  $L$  inductancia propia de la bobina, y se mide en *henrios* (H); no obstante, en las bobinas que se tienen en la práctica es más frecuente usar submúltiplos, como son los *milihenrios* (mH).

Para obtener la expresión de la energía almacenada en el campo magnético de la bobina, se parte de una bobina inicialmente descargada (corriente nula). La energía consumida por la bobina de la fuente de alimentación entre dos instantes de tiempo infinitamente próximos es

$$dW_m = u \cdot i \cdot dt = L \frac{di}{dt} \cdot i \cdot dt = L \cdot i \cdot di. \quad (6.5)$$

<sup>1</sup>Este caso será estudiado en la asignatura Circuitos Magnéticos y Transformadores.



Si la bobina se carga hasta una intensidad final  $I$ , la energía almacenada en el campo magnético será numéricamente igual a la energía tomada de la fuente

$$W_m = \int_0^I L \cdot i \cdot di = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (6.6)$$

En muchas ocasiones se tienen dos o más bobinas arrolladas en un mismo núcleo. En ese caso la ecuación (6.1) ya no rige, pues el flujo es creado por la acción conjunta de las corrientes de todas las bobinas. Ese caso será estudiado en las asignaturas Fundamentos de Ingeniería Eléctrica y Circuitos Magnéticos y Transformadores, y se sale del alcance de esta asignatura.

## 7. Origen de los transitorios electromagnéticos

Como se vio en este capítulo, los elementos pasivos básicos son tres: resistencias, bobinas y condensadores. Las bobinas y condensadores se caracterizan por su capacidad para almacenar energía, de tipo magnético en las bobinas y de tipo eléctrico en los condensadores. La energía magnética almacenada en una bobina es función de la corriente instantánea,  $i$ . La energía eléctrica almacenada en un condensador es función de la tensión instantánea en sus terminales,  $u$ . Por el contrario, una resistencia disipa energía al ambiente. La energía disipada depende de la corriente que atraviesa la resistencia. Debe tenerse en cuenta que la energía almacenada puede recuperarse posteriormente, mientras que la disipación de energía es algo irreversible.

Para comprender el motivo de los transitorios electromagnéticos de forma simple imagínese que se tiene un circuito alimentado en corriente continua, en el cual las tensiones e intensidades son invariables en el tiempo.

En condiciones de régimen permanente, la energía almacenada en los elementos del circuito (bobinas y condensadores) es constante. En este proceso habrá pérdidas, debidas a las resistencias, que serán suministradas por las fuentes.

Sin embargo, cuando ocurre un cambio brusco en un circuito, se produce una redistribución de energía para adecuarse a las nuevas condiciones y es precisamente esta redistribución de energía la que se estudia en el análisis del proceso transitorio. ¿Por qué no puede producirse la redistribución de energía de forma instantánea? Existen dos razones:

- En primer lugar, variar la energía almacenada en una bobina de forma brusca exige un cambio brusco en la corriente, pero para ello, según (6.3), la tensión debería hacerse infinita. Como esto es imposible, la corriente no puede variar bruscamente en una bobina y por tanto, tampoco la energía almacenada en la bobina.
- En segundo lugar, variar de forma brusca la energía almacenada en el condensador exigiría un cambio brusco de su tensión, pero para ello, según (5.7), debería circular una corriente infinita, lo que es físicamente imposible, por lo que la tensión en un condensador no puede variar bruscamente y, por lo tanto, tampoco la energía almacenada en el condensador.

Por todo ello, la redistribución de energía en un circuito requiere un tiempo finito y el proceso que tiene lugar durante ese intervalo de tiempo está gobernado por el *principio de conservación de la energía*:

$$W_{generada} = W_{almacenada} + W_{disipada}. \quad (7.1)$$

Si en el circuito no hay generación, el principio de conservación de la energía se podría expresar como:

$$W_{almacenada, inicial} - W_{almacenada, final} = W_{disipada}. \quad (7.2)$$

Se puede concluir que para entender bien los procesos transitorios hay que tener presentes tres factores:

1. La corriente en una bobina no puede variar bruscamente.
2. La tensión en un condensador no puede cambiar de forma brusca.
3. Debe cumplirse el principio de conservación de la energía.