
Índice general

Unidad didáctica 1

1. Fundamentos de los circuitos eléctricos	15
1.1. ¿Qué estudia la Teoría de Circuitos?	17
1.1.1. Definiciones: intensidad, tensión y potencia	18
1.1.2. El circuito eléctrico	23
1.2. Referencias de polaridad	25
1.3. Elementos del circuito	29
1.3.1. Fuentes de excitación. Formas de onda	30
1.3.2. Resistencia	35
1.3.3. Bobina	36
1.3.4. Condensador	37
1.3.5. Impedancia y admitancia operacional	38
1.3.6. Elementos reales	40
1.3.7. Aparatos de medida	46
1.4. Ejercicios de autocomprobación	47
2. Circuitos en continua	49
2.1. Definiciones topológicas	52
2.2. Las dos leyes fundamentales: las Leyes de Kirchhoff	56
2.3. Análisis de circuitos	59
2.3.1. Asociación de elementos pasivos. Divisores de tensión y de intensidad	60
2.3.2. La rama generalizada. Ramas equivalentes	64
2.3.3. Método de análisis por mallas	66
2.3.4. Método de análisis por nudos	71
2.3.5. Conversión de fuentes y modificación de la topología del circuito	76
2.3.6. El balance de potencias en continua	85

2.4.	Teoremas fundamentales	87
2.4.1.	Teorema de superposición	87
2.4.2.	Teorema de linealidad o de proporcionalidad	89
2.4.3.	Teorema de sustitución	90
2.4.4.	Teoremas de Thevenin y de Norton	91
2.4.5.	Teorema de la máxima transferencia de potencia (en continua)	97
2.4.6.	Transformación estrella-triángulo	100
2.5.	Ejercicios de autocomprobación	103
3.	Circuitos en alterna	109
3.1.	La forma de onda senoidal	112
3.1.1.	Valores característicos	113
3.1.2.	Fasores y números complejos	117
3.2.	Los elementos del circuito en corriente alterna	120
3.2.1.	Fuentes de tensión y de intensidad	120
3.2.2.	Resistencia, bobina y condensador	121
3.2.3.	Impedancia y admitancia	124
3.3.	Ánálisis de circuitos en corriente alterna	128
3.3.1.	Análisis por mallas y por nudos	129
3.3.2.	Asociación de elementos	132
3.3.3.	Diagrama vectorial de tensiones e intensidades	135
3.4.	Potencia en corriente alterna	138
3.4.1.	La potencia compleja. Definiciones	138
3.4.2.	El factor de potencia	151
3.4.3.	El vatímetro	154
3.5.	Algunos teoremas más	161
3.5.1.	Teorema de superposición	163
3.5.2.	Teorema de Boucherot. El balance de potencias	167
3.5.3.	Teorema de la máxima transferencia de potencia	170
3.6.	Bobinas acopladas magnéticamente	172
3.6.1.	Ecuaciones de definición	176
3.6.2.	Ánálisis de circuitos con bobinas acopladas.....	182
3.7.	El transformador ideal	187
3.7.1.	Ecuaciones de definición	188
3.7.2.	El transformador ideal como adaptador de impedancias	191
3.8.	Ejercicios de autocomprobación	196

4. Circuitos trifásicos	201
4.1. Definiciones	203
4.1.1. Generación de un sistema trifásico de tensiones equilibrado ...	203
4.1.2. Magnitudes eléctricas de fase y de línea	205
4.1.3. Secuencia de fases	207
4.1.4. Las cargas trifásicas	210
4.2. Análisis de sistemas trifásicos equilibrados	214
4.2.1. El circuito monofásico equivalente fase-neutro	215
4.2.2. El circuito monofásico equivalente fase-fase	218
4.2.3. Potencia en sistemas trifásicos equilibrados	221
4.2.4. Corrección del factor de potencia	225
4.3. Medida de potencia en sistemas trifásicos equilibrados	228
4.3.1. Medida de la potencia activa	229
4.3.2. Medida de la potencia reactiva	230
4.3.3. El método de los dos vatímetros	232
4.4. Ejercicios de autocomprobación	239

Unidad didáctica 2

5. Principios generales de las máquinas eléctricas	247
5.1. El magnetismo en la materia	250
5.1.1. Materiales ferromagnéticos	255
5.1.2. Energía almacenada por un campo magnético	257
5.1.3. Pérdidas en los núcleos magnéticos	259
5.2. El circuito magnético	260
5.2.1. Electroimanes y relés	262
5.3. Las máquinas eléctricas	264
5.3.1. Desde el electromagnetismo	264
5.3.2. Clasificación de las máquinas eléctricas	271
5.3.3. Aspectos constructivos	276
5.4. Ejercicios de autocomprobación	280
6. El transformador	283
6.1. Aspectos constructivos	286
6.2. El transformador monofásico	290
6.2.1. El circuito equivalente	290
6.2.2. Valores nominales o asignados	292

6.2.3. El ensayo en vacío	293
6.2.4. El ensayo de cortocircuito	294
6.3. Funcionamiento en carga	298
6.4. El transformador trifásico	302
6.4.1. El circuito monofásico equivalente fase-neutro	304
6.4.2. Símbolo de acoplamiento e índice horario	308
6.5. Ejercicios de autocomprobación	311
7. La máquina asíncrona o de inducción	313
7.1. Aspectos constructivos	316
7.2. El motor asíncrono	319
7.2.1. Principio de funcionamiento	319
7.2.2. El circuito equivalente	320
7.2.3. El balance de potencias	322
7.2.4. Ensayos	328
7.3. El funcionamiento del motor en carga	336
7.3.1. La curva par-velocidad	337
7.3.2. Arranque del motor	341
7.4. Zonas de funcionamiento de la máquina asíncrona	345
7.5. Ejercicios de autocomprobación	348
8. Instalaciones eléctricas de baja tensión	351
8.1. Instalaciones eléctricas de baja tensión	354
8.2. Conductores	356
8.3. Aparamenta	359
8.3.1. Función de mando y maniobra	359
8.3.2. Función de protección	361
8.3.3. Montaje de conjuntos y esquemas	367
8.4. Tipos de distribución del neutro	368
8.4.1. Esquema TT	369
8.4.2. Esquema TN	371
8.4.3. Esquema IT	373
8.4.4. Aplicación de los tres esquemas de neutro	376
8.5. Puestas a tierra	376
8.5.1. Sistema de puesta a tierra	377
8.5.2. Receptores	378
8.6. Instalación de enlace	379
8.7. Instalación receptora o interior	382

8.8. Cálculo de la sección de los conductores	383
8.8.1. Caída de tensión en un conductor	384
8.8.2. Selección de conductores	385
8.9. Ejercicios de autocomprobación	390

Apéndices

A. Soluciones a los ejercicios propuestos	395
B. Relaciones trigonométricas	483
C. El Sistema Internacional de Unidades	487
D. Bibliografía	493

Introducción y objetivos

La Ingeniería Eléctrica es el área de conocimiento dentro de la Ingeniería que estudia todos los aspectos relacionados con la generación, el transporte, la distribución y el consumo de la energía eléctrica. También estudia los distintos equipos eléctricos y electrónicos que hay conectados en las instalaciones eléctricas y entre ellos, muy especialmente, las máquinas eléctricas.

Los contenidos del área de Ingeniería Eléctrica (y las asignaturas de este área) se organizan habitualmente en tres bloques: uno de ellos corresponde a los sistemas eléctricos (generación, transporte y distribución de la energía eléctrica), otro a las instalaciones eléctricas (distribución en baja tensión y los elementos que hay en esas instalaciones para permitir el consumo y la utilización de la energía eléctrica) y el tercero a las máquinas eléctricas (el elemento eléctrico más propio del área y más utilizado en la industria y en nuestra vida diaria, para la generación y el consumo de energía eléctrica ya que permite transformarla fácilmente desde/en energía mecánica). Estos tres bloques están firmemente unidos por la Teoría de Circuitos eléctricos, que es la base de todos ellos ya que desarrolla las herramientas y los métodos de cálculo y análisis necesarios para entender y trabajar con todos los contenidos del área y de las áreas afines como la Electrónica.

Los objetivos de este capítulo, que el lector deberá tener al finalizar su estudio, son:

- Entender qué es un circuito eléctrico, cuál es el objeto de la Teoría de Circuitos y qué tipo de circuitos y estudios se abordan en este libro.
- Saber las definiciones y el significado físico de las tres magnitudes eléctricas básicas: intensidad, tensión y potencia.
- Entender y saber aplicar las referencias de polaridad y los criterios de signos que se utilizan para analizar y resolver los circuitos eléctricos.
- Entender los conceptos de impedancia y admitancia operacional y su utilización en el análisis de circuitos eléctricos.
- Conocer los elementos básicos que hay en los circuitos eléctricos, así como los aparatos de medida que se utilizan en ellos para medir las magnitudes eléctricas.

1.1. *¿Qué estudia la Teoría de Circuitos?*

La **Teoría de Circuitos** es la parte de la Ingeniería Eléctrica que aborda el estudio de los circuitos eléctricos y de las propiedades que les son inherentes a todos ellos, independientemente de su dimensión o complejidad. Este estudio se realiza a

partir de un conjunto de leyes experimentales que se aceptan como axiomas fundamentales, de teoremas que permiten abordar ese estudio de una forma sistemática y general, y de métodos de análisis que permiten y simplifican su resolución.

1.1.1. Definiciones: intensidad, tensión y potencia

La figura 1.1 muestra el campo eléctrico \vec{E} creado por una carga eléctrica fija en el espacio y una carga q en su interior. El campo eléctrico \vec{E} ejerce sobre la carga q una fuerza que viene dada por la expresión:

$$\vec{F} = q \vec{E} \quad (1.1)$$

Si la carga q es libre, es decir, no está fija en una posición determinada en el espacio, la carga se desplaza debido a esa fuerza en la dirección de las líneas del campo eléctrico y con el sentido dado por la disminución de la intensidad del campo.

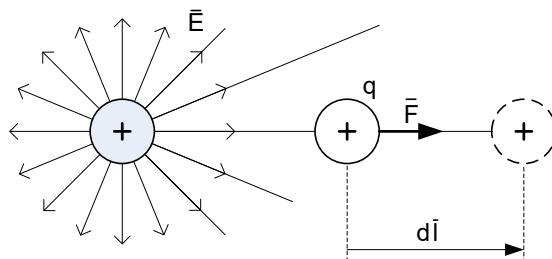


Figura 1.1

Por otro lado, como ya conoce, en la física clásica se considera que la materia está constituida por átomos, en los que se distinguen el núcleo, que tiene fundamentalmente la masa del átomo y que está cargado positivamente, y los electrones, con carga eléctrica negativa y que se encuentran situados alrededor del núcleo en movimiento en ciertas capas o zonas posibles denominadas bandas de energía. El conjunto, el átomo, es estable y eléctricamente neutro. Los electrones de la última capa del átomo, la más externa, se denominan electrones de valencia y según la fuerza con la que estos electrones están ligados al núcleo se podrán o no desplazar de un átomo al contiguo con mayor o menor facilidad.

Supongamos ahora un material que está en equilibrio electrostático (por lo que el campo eléctrico en su interior es cero ya que si no las cargas eléctricas libres que hubiera dentro de él se moverían). Si ese material se sitúa dentro de un campo eléctrico \vec{E} externo, conforme a la ecuación (1.1), ese campo ejerce una fuerza $q\vec{E}$ sobre cada carga q que se encuentra libre, lo que hace que se acelere y se mueva en el interior del material en la dirección de \vec{E} . Esta capacidad que tiene el campo eléctrico de mover las cargas libres existentes en ciertos materiales, permite una clasificación de los materiales en dos grandes grupos: conductores y aislantes.

Los materiales **conductores**, que son fundamentalmente los metales, están formados por átomos en los que los electrones de valencia están poco ligados al núcleo por lo que fácilmente se desplazan de un átomo a otro con tal de que exista un pequeño campo eléctrico. El cobre es un ejemplo de buen conductor. En una pieza de cobre metálico el enlace de los electrones de la capa más externa de cada átomo se debilita debido a la interacción de los átomos próximos de la red metálica del cobre y a la fuerza de repulsión que ejercen los electrones de las capas más internas, lo que hace que esos electrones externos puedan moverse libremente por todo el metal.

Los materiales **aislantes**, al contrario, tienen los electrones de valencia fuertemente ligados al núcleo atómico por lo que son necesarias campos eléctricos intensos para poder arrancarlos de éste y permitir su movimiento. El vidrio y el PVC (polícloruro de vinilo) son dos ejemplos de buenos aislantes muy utilizados en la industria eléctrica.

Entre esos dos grandes grupos de materiales, conductores y aislantes, existe un tercer grupo de materiales intermedio entre ambos, que son los **semiconductores**. En un material semiconductor los electrones de valencia están más ligados al núcleo que en el caso de los conductores, pero basta con aportar una pequeña cantidad de energía para que se comporten como éstos, liberando los electrones más externos que ya podrán desplazarse de un átomo a otro si existe un campo eléctrico. Además, sus propiedades eléctricas se pueden modificar de forma significativa agregando pequeñas cantidades de otros materiales. El silicio y el germanio son dos ejemplos de materiales semiconductores y constituyen la base de la industria electrónica.

Este modelo clásico de la estructura atómica de la materia y del movimiento de cargas en su interior debido a la presencia de un campo eléctrico exterior es válido a nivel macroscópico y es el que permite la definición de las tres magnitudes básicas de los circuitos eléctricos: la intensidad de corriente, la tensión y la potencia.

• Definición de corriente eléctrica

La figura 1.2 representa un segmento de un material conductor de sección transversal A por el que circula un flujo de cargas positivas. La **corriente eléctrica** se define como el flujo de cargas eléctricas que atraviesan una sección transversal del material, que puede ser sólido (el conductor de un cable) o no (un relámpago en el aire o un haz de partículas cargadas en el espacio). Y de la misma forma, se define también la **intensidad de corriente eléctrica**, I , como la carga total ΔQ que atraviesa la superficie A en un tiempo Δt :

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1.2)$$

Si el flujo de cargas varía en el tiempo, la corriente eléctrica también variará en el tiempo y, en consecuencia, se define la **intensidad de corriente eléctrica instantánea** como:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.3)$$

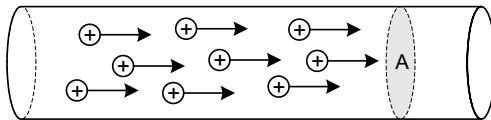


Figura 1.2

La unidad en el SI de la intensidad de corriente eléctrica es el **amperio** y su símbolo es A :

$$1 \text{ A} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ s}}$$

A partir de la expresión (1.2), se denomina **densidad de corriente**, J , a la intensidad de corriente por unidad de superficie y su unidad es el A/m^2 :

$$J = \frac{I}{A} = \frac{\Delta Q}{A \Delta t} \quad (1.4)$$

Es importante tener clara la diferencia entre el fenómeno físico del movimiento de cargas eléctricas, que se denomina **corriente eléctrica**, y su cuantificación en la unidad de tiempo conforme a la expresión (1.2) que es la **intensidad de corriente eléctrica**. Sin embargo, la práctica habitual se refiere de la misma forma a ambos conceptos (al fenómeno físico y a su cuantificación), por lo que es normal que se utilicen de forma general e indistinta los términos corriente eléctrica e intensidad de corriente o, más simple aún, corriente e intensidad.

Como se ha explicado antes, las cargas que se mueven en el conductor son los electrones libres de sus átomos. Por tanto, la corriente eléctrica en el conductor corresponde al flujo de electrones que circula por él y, debido a la carga negativa del electrón, este flujo se mueve en el sentido de la intensidad del campo creciente o, dicho coloquialmente, “va de $-$ a $+$ ”. Sin embargo, por convenio se define y se acepta que el sentido de circulación de la corriente eléctrica es el contrario al del movimiento real de los electrones o, dicho de otra forma, es el sentido del movimiento de las cargas ideales positivas y, por tanto, es el que se representa en la figura 1.3.

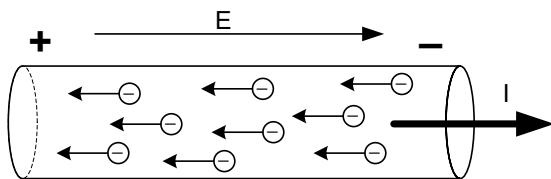


Figura 1.3

Este convenio, que no afecta en nada al estudio y la comprensión de la electrotecnia y la electrónica, tiene una explicación histórica. En el inicio del estudio de

la electricidad se observó que los cuerpos cargados presentaban dos tipos diferentes de comportamiento (de atracción y de repulsión) lo que permitió, a finales del siglo XVIII, clasificarlos en dos grandes grupos a los que se les dio los nombres de *positivos* y *negativos*. Más tarde, cuando a finales del siglo XIX se descubrió el electrón, se observó que su carga correspondía a la de los cuerpos negativos. Para ser coherentes con lo que se entiende como lógico para el movimiento, “ir de + a -”, se adoptó el convenio anterior para definir el sentido positivo de circulación de la corriente eléctrica.

En cualquier caso y para solventar el “inconveniente” creado por el signo negativo de la carga del electrón y su relación con el signo positivo de la intensidad, se habla en su lugar y de forma general de **portadores de carga** (o, más exactamente, de partículas libres portadoras de carga) lo que, en consecuencia, permite definir y entender la corriente eléctrica como *el flujo de portadores de carga, cuyo sentido positivo corresponde al del movimiento de los portadores de carga positiva*.

• Definición de tensión

Volvamos al caso de la figura 1.1. La fuerza que el campo eléctrico ejerce sobre la carga q viene dada por la ecuación (1.1). Esta fuerza es conservativa lo que permite definir y asociarle una función $W_p(x, y, z)$, denominada, **energía potencial electrostática**, que cumple:

$$\vec{F} = \frac{\partial W_p}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial W_p}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial W_p}{\partial z} \hat{z} = \nabla W_p \quad (1.5)$$

Dese cuenta de que esta definición es totalmente análoga a la fuerza gravitatoria (que también es una fuerza conservativa) y a la energía potencial asociada a ella. Esta característica de la fuerza eléctrica permite trabajar con su energía potencial electrostática asociada en lugar de hacerlo con ella. Así, cuando la carga q experimenta un desplazamiento $d\vec{l}$ dentro del campo eléctrico \vec{E} , la variación de energía potencial electrostática es:

$$dW_p = -q \vec{E} \circ d\vec{l} \quad (1.6)$$

El trabajo realizado por la fuerza eléctrica hace disminuir la energía potencial electrostática de la carga. Ésta se acelera en la dirección del campo (figura 1.1) con lo que su energía cinética aumenta en la misma cantidad en que disminuye su energía potencial, conforme al principio de conservación de la energía (obsérvese la semejanza con una masa que se deja caer desde una cierta altura). Así, las líneas de campo eléctrico apuntan en la dirección en la que disminuye el potencial electrostático.

Para una carga positiva q que se desplaza desde un punto a hasta otro b , la variación de la energía potencial electrostática de la carga es:

$$\Delta W = W_b - W_a = \int_a^b dW = -q \int_a^b \vec{E} \circ d\vec{l} \quad (1.7)$$

De las expresiones anteriores se observa que la variación de la energía potencial es proporcional a la carga q que se mueve. Así, para una carga unidad se denomina

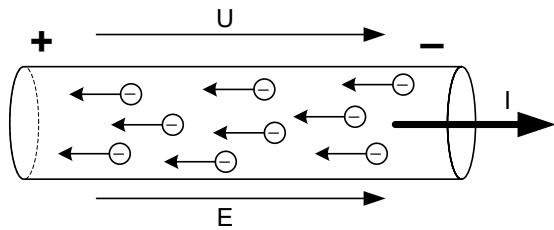


Figura 1.4

potencial eléctrico o, simplemente, **potencial**, dU , a la variación de la energía potencial por unidad de carga:

$$dU = \frac{dW}{q} = -\vec{E} \circ d\vec{l} \quad (1.8)$$

De esta forma, para un desplazamiento entre dos puntos a y b , se define la **diferencia de potencial** como:

$$\Delta U = U_b - U_a = \frac{\Delta W}{q} = - \int_a^b \vec{E} \circ d\vec{l} \quad (1.9)$$

Esta expresión indica que la diferencia de potencial entre dos puntos a y b es el valor con signo negativo del trabajo por unidad de carga realizado por un campo eléctrico cuando una carga positiva unidad se desplaza desde el punto a al punto b . Así, en el caso representado en la figura 1.1, el campo eléctrico hace que el movimiento de la carga q positiva sea hacia potenciales menores ($U_b < U_a$). Conforme a esta conclusión, la figura 1.3 también puede dibujarse como la figura 1.4 en la que se indican los signos positivos de la intensidad I y de la diferencia de potencial U .

La unidad del potencial eléctrico en el SI es el **voltio** y su símbolo es V. El voltio corresponde a una energía por unidad de carga:

$$1 \text{ V} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ C}}$$

Aunque la definición dada por la expresión (1.9) corresponde a la diferencia de potencial entre dos puntos, en muchas ocasiones es interesante o necesario conocer el potencial de un punto. Para esto se necesita tomar un potencial de referencia o potencial cero. Por ejemplo, si se toma como referencia de potencial el punto a (con lo que $U_a = 0$), la diferencia de potencial entre otro punto b y a es U_b y a este valor se le denomina **tensión** de b . Definido el punto de potencial cero, se denomina **caída de tensión** a la diferencia de potencial entre dos puntos y corresponde a la diferencia entre los potenciales o las tensiones de esos dos puntos.