

CAPÍTULO 1

Definición del
electromagnetismo

1 - 1 DESCRIPCIÓN GENERAL *El electromagnetismo* es el estudio de los fenómenos eléctricos y magnéticos causados por cargas eléctricas en reposo o en movimiento. La existencia de cargas eléctricas fue descubierta hace más de 2500 años por el astrónomo y filósofo griego Tales de Mileto, quien observó que una vara de ámbar, después de ser frotada con seda o lana, atraía paja y pequeños pedazos de tela. Atribuyó esta propiedad misteriosa a la vara de ámbar. La palabra griega que significa ámbar es *elektron*, de la cual se derivaron las palabras *electrón*, *electrónica*, *electricidad*, etcétera.

Dos tipos de
cargas: positivas y
negativas

Campo:
distribución
espacial de una
cantidad

A partir de la física elemental sabemos que hay dos tipos de cargas: positivas y negativas. Ambos tipos de carga son fuentes de un campo eléctrico. Las cargas en movimiento producen una corriente, la cual origina un campo magnético. Aquí hablamos provisionalmente de un campo eléctrico y un campo magnético de manera general; después presentaremos un significado más definitivo de ambos términos. Un **campo** es la distribución espacial de una cantidad, la cual puede o no ser función del tiempo. Un campo eléctrico variable con el tiempo está acompañado por un campo magnético, y viceversa. En otras palabras, los campos eléctricos y magnéticos variables con el tiempo están acoplados, produciendo un campo electromagnético. En determinadas condiciones, los campos electromagnéticos variables con el tiempo producen ondas que radian de la fuente.

Los campos y las
ondas ayudan a
explicar la acción a
distancia.

El concepto de los campos y las ondas es esencial en la explicación de la acción a distancia. Por ejemplo, en la mecánica elemental aprendimos que las masas se atraen. Es por esto que los objetos caen a la superficie de la Tierra. Sin embargo, puesto que no hay hilos elásticos que conecten la Tierra con un objeto en caída libre, ¿cómo se explica este fenómeno? El fenómeno de acción a distancia se explica postulando



El modelo electromagnético

la existencia de un campo gravitacional. De forma similar, la comunicación por satélite y la recepción de señales desde una sonda espacial a millones de kilómetros de distancia sólo puede explicarse postulando la existencia de campos eléctricos y magnéticos y ondas electromagnéticas. En este libro, *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*, estudiaremos las leyes fundamentales del electromagnetismo y algunas de sus aplicaciones en ingeniería.

La teoría de circuitos no puede explicar la comunicación con teléfonos móviles.

La necesidad de los conceptos de los campos electromagnéticos puede ilustrarse con un sencillo ejemplo. En la figura 1-1 se muestra un teléfono móvil conectado a una antena. Al transmitir, una fuente en la base alimenta a la antena con una corriente portadora del mensaje, usando una frecuencia portadora apropiada. Desde la perspectiva de la teoría de circuitos, la fuente alimenta un circuito abierto, ya que la punta superior de la antena no está conectada a ningún objeto físico; por consiguiente, la corriente no podría circular y no sucedería nada. Por supuesto, esta perspectiva no puede explicar por qué se establece la conexión entre unidades telefónicas móviles. Para esto hay que usar los conceptos del electromagnetismo. En el capítulo 10 veremos que cuando la longitud de la antena es una parte apreciable de la longitud de onda de la portadora, circulará una corriente no uniforme por la antena con extremo abierto. Esta corriente radia un campo electromagnético en el espacio, variable con el tiempo, que se propaga como onda electromagnética e induce corrientes en otras antenas a distancia. El mensaje se detecta después en la unidad receptora.

Construcción de un modelo

En este primer capítulo comenzaremos la tarea de construir un modelo electromagnético, a partir del cual desarrollaremos el tema del electromagnetismo para ingeniería.

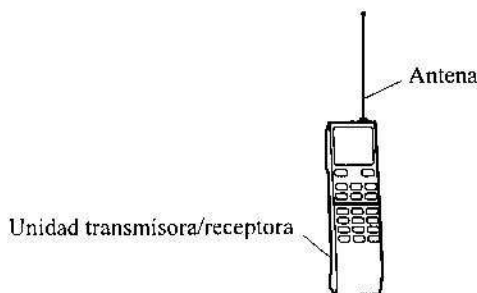


FIGURA 1-1 Teléfono móvil.

1-2 EL MODELO ELECTROMAGNÉTICO

Enfoques inductivo y deductivo

Hay dos enfoques para el desarrollo de un tema científico: el enfoque inductivo y el deductivo. En el enfoque inductivo se sigue el desarrollo histórico del tema, comenzando por la observación de experimentos sencillos y derivando de ellos leyes y teoremas. Es un proceso de razonamiento que parte de fenómenos particulares para llegar a principios generales. Por otra parte, en el enfoque deductivo se postulan algunas relaciones fundamentales para un modelo idealizado. Las relaciones postuladas son axiomas de los cuales se pueden derivar leyes y teoremas específicos. La validez del modelo y los axiomas se verifica con su capacidad para predecir consecuencias que puedan comprobarse con observaciones experimentales. En este libro hemos preferido usar el enfoque deductivo o axiomático porque es más conciso y permite desarrollar el tema del electromagnetismo de forma ordenada.

En la construcción de una teoría basada en un modelo idealizado hay tres pasos esenciales:

Pasos para desarrollar una teoría a partir de un modelo idealizado

PASO 1 Definir algunas cantidades básicas aplicables al tema de estudio.

PASO 2 Especificar las reglas de operación (las matemáticas) de estas cantidades.

PASO 3 Postular algunas relaciones fundamentales. (Estos postulados o leyes por lo general se basan en numerosas observaciones experimentales realizadas en condiciones controladas y sintetizadas por mentes muy brillantes.)

El modelo de circuito

Un ejemplo familiar es la teoría de circuitos, basada en un *modelo de circuito* formado por fuentes ideales y resistencias, inductancias y capacitancias puras. Las cantidades básicas en este caso son voltajes (V), corrientes (I), resistencias (R), inductancias (L) y capacitancias (C); las reglas de las operaciones son las del álgebra, las ecuaciones diferenciales ordinarias y la transformación de Laplace; y los postulados fundamentales son las leyes del voltaje y de la corriente de Kirchhoff. A partir de este modelo bastante sencillo podemos derivar varias relaciones y fórmulas y determinar las

Los tres pasos para desarrollar una teoría electromagnética a partir de un modelo electromagnético

Cantidades básicas del modelo electromagnético: cantidades de fuente y cantidades de campo

Cargas eléctricas

Unidad de carga: coulomb (C)

respuestas de redes bastante complejas. La validez y el valor del modelo se han demostrado ampliamente.

Es posible construir una teoría electromagnética de forma similar, con base en un modelo electromagnético apropiado. En esta sección daremos el primer paso para definir las cantidades básicas del electromagnetismo. El segundo paso, las reglas de operación, abarca el álgebra vectorial, el cálculo vectorial y las ecuaciones diferenciales parciales. Los fundamentos del álgebra y el cálculo vectorial se analizarán en el capítulo 2 (Análisis vectorial), y las técnicas de resolución de ecuaciones diferenciales parciales se presentarán cuando aparezcan estas ecuaciones en el libro. El tercer paso, los postulados fundamentales, se presentará en tres subetapas cuando veamos los campos eléctricos estáticos, los campos magnéticos estáticos y los campos electromagnéticos, respectivamente.

Las cantidades de nuestro modelo electromagnético pueden dividirse en dos categorías generales: cantidades de fuente y cantidades de campo. La fuente de un campo electromagnético siempre consiste en cargas eléctricas en reposo o en movimiento. Sin embargo, un campo electromagnético puede ocasionar una redistribución de las cargas, lo cual a su vez modificará el campo; por esto no siempre es muy clara la separación entre la causa y el efecto.

Usaremos el símbolo q (en ocasiones Q) para denotar la *carga eléctrica*. La carga eléctrica es una propiedad fundamental de la materia y únicamente existe en múltiplos enteros positivos o negativos de la carga de un electrón, $-e$.

$$e = 1.60 \times 10^{-19} \quad (\text{C}), \quad (1-1)$$

donde C es la abreviatura de la unidad de carga, el coulomb.[†] Se llama así en honor del físico francés Charles A. de Coulomb, quien formuló la ley de Coulomb en 1785 (analizaremos la ley de Coulomb en el capítulo 3). Un coulomb es una unidad muy grande para la carga eléctrica, pues se requieren $1 / (1.60 \times 10^{-19}) = 6.25$ millones de billones de electrones para formar $-1(\text{C})$. Es más, dos cargas de 1C a un metro de distancia ejercerán entre sí una fuerza de aproximadamente un millón de toneladas. En el apéndice B-2 se listan otras constantes físicas del electrón.

El principio de la *conservación de la carga eléctrica*, como el principio de conservación de la energía, es un postulado fundamental o ley de la física. Establece que la carga eléctrica se conserva; es decir, no se crea ni se destruye. Es una ley de la naturaleza y no puede derivarse de otros principios o relaciones.

Las cargas eléctricas pueden moverse de un lugar a otro y redistribuirse bajo la influencia de un campo electromagnético, pero la suma algebraica de las cargas negativas

[†] Analizaremos el sistema de unidades en la sección 1-3.

La conservación de la carga eléctrica es un postulado fundamental de la física.

y positivas en un sistema cerrado (aislado) no cambia. *El principio de conservación de la carga eléctrica debe satisfacerse en todo momento y en todas las circunstancias.* Cualquier formulación o solución de un problema electromagnético que viole el principio de la conservación de la carga eléctrica *siempre* será incorrecta.

Aunque en el sentido microscópico la carga eléctrica existe o no existe en un punto de manera discreta, estas variaciones abruptas a escala atómica no tienen importancia al considerar el efecto electromagnético de grandes conjuntos de cargas. Al construir una teoría electromagnética macroscópica o a gran escala, encontramos que se obtienen resultados muy buenos al usar la densidad media alisada. (Este mismo enfoque se emplea en la mecánica, donde se define una función de densidad alisada de masa a pesar de que la masa se relaciona únicamente con partículas elementales de una forma discreta a escala atómica.) Definimos una *densidad volumétrica de carga*, ρ_v , como una cantidad fuente, de la siguiente manera:

$$\rho_v = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta v} \quad (\text{C/m}^3), \quad (1-2)$$

donde Δq es la cantidad de carga en un volumen muy pequeño Δv . ¿Cuán pequeño debe ser Δv ? Debe ser lo suficientemente pequeño para representar una variación precisa de ρ_v , pero lo suficientemente grande como para contener gran número de cargas discretas. Por ejemplo, un cubo elemental con lados tan pequeños como 1 micra (10^{-6} m o $1 \mu\text{m}$) tiene un volumen de $10^{-18}(\text{m}^3)$, el cual contiene unos 10^{11} (100 000 millones) átomos. Es de esperar que una función alisada de las coordenadas espaciales, ρ_v , definida con una Δv tan pequeña, produzca resultados macroscópicos precisos para casi todos los fines prácticos.

En algunas situaciones físicas podemos identificar una cantidad de carga Δq con un elemento de superficie Δs o un elemento de línea $\Delta \ell$. En estos casos será más apropiado definir una *densidad superficial de carga*, ρ_s , o una *densidad lineal de carga*, ρ_ℓ :

$$\rho_s = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta s} \quad (\text{C/m}^2), \quad (1-3)$$

$$\rho_\ell = \lim_{\Delta \ell \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta \ell} \quad (\text{C/m}). \quad (1-4)$$

Excepto en algunas situaciones especiales, las densidades de carga varían de un punto a otro; por consiguiente, ρ_v , ρ_s y ρ_ℓ son, en términos generales, *funciones puntuales* de las coordenadas espaciales.

La corriente es la razón de cambio de la carga con respecto al tiempo; es decir,

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (\text{C/s o A}), \quad (1-5)$$

donde la propia I también puede depender del tiempo. La unidad de corriente es el coulomb por segundo (C/s), lo cual equivale a un ampere (A). Una corriente debe fluir

Densidades volumétrica, superficial y lineal de carga: densidades medias en el sentido macroscópico

Las densidades de carga son funciones puntuales.

La corriente no es una función puntual, pero sí la densidad de corriente.

Las cuatro cantidades fundamentales del campo electromagnético: E , B , D , H

Sobre la importancia de \vec{E} , \vec{D} , \vec{B} y \vec{H}

a través de un área finita (por ejemplo, un alambre conductor con área transversal finita); por lo tanto, no se trata de una función puntual. En el electromagnetismo se define una función puntual vectorial **densidad de corriente**, \mathbf{J} , que mide la cantidad de corriente que fluye por un área unidad normal a la dirección del flujo de la corriente. La letra en negritas \mathbf{J} es un vector cuya magnitud es la corriente por unidad de área (A/m^2) y su dirección es la del flujo de corriente.

En el electromagnetismo hay cuatro cantidades de campo *vectoriales* fundamentales: **intensidad de campo eléctrico** E , **densidad de flujo eléctrico** (o **desplazamiento eléctrico**) D , **densidad de flujo magnético** B e **intensidad de campo magnético** H . Explicaremos con detalle la definición y la importancia física de estas cantidades cuando se presenten más adelante. Por el momento sólo queremos establecer lo siguiente: la intensidad de campo eléctrico E es el único vector necesario al analizar la electrostática (los efectos de cargas eléctricas estacionarias) en el espacio libre; se define como la fuerza eléctrica por unidad de carga de prueba. El vector de desplazamiento eléctrico D es útil en el estudio de campos eléctricos en medios materiales, como veremos en el capítulo 3. De forma parecida, la densidad de flujo magnético B es el único vector necesario al analizar la magnetostática (los efectos de corrientes eléctricas estacionarias) en el espacio libre, y se relaciona con la fuerza magnética que actúa sobre una carga que se mueve con determinada velocidad. El vector de intensidad de campo magnético H es útil en el estudio de campos magnéticos en medios materiales. En el capítulo 5 veremos la definición y la importancia de B y H .

En la tabla 1-1 se presentan las cuatro cantidades fundamentales del campo electromagnético, así como sus unidades. En la tabla 1-1, V/m es volt por metro y T representa un tesla o volt-segundo por metro cuadrado. Si no hay variación temporal (como en los casos estáticos o estacionarios), las cantidades de campo eléctrico E y D y las cantidades de campo magnético B y H forman dos pares vectoriales separados. Sin embargo, en los casos dependientes del tiempo, las cantidades de campos eléctricos

TABLA 1-1 CANTIDADES FUNDAMENTALES DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

Símbolos y unidades para las cantidades del campo	Cantidad de campo	Símbolo	Unidad
Eléctrico	Intensidad de campo eléctrico	E	V/m
	Densidad de flujo eléctrico (desplazamiento eléctrico)	D	C/m ²
Magnético	Densidad de flujo magnético	B	T
	Intensidad de campo magnético	H	A/m

y magnéticos están acopladas; es decir, si \mathbf{E} y \mathbf{D} son variables con el tiempo producirán \mathbf{B} y \mathbf{H} , y viceversa. Las cuatro cantidades son funciones puntuales. Las propiedades de los materiales (o medios) determinan las relaciones entre \mathbf{E} y \mathbf{D} y entre \mathbf{B} y \mathbf{H} . Estas relaciones se denominan **relaciones constitutivas** de un medio y las veremos más adelante.

El objetivo principal del estudio del electromagnetismo es comprender la interacción entre cargas y corrientes a distancia, con base en el modelo electromagnético. Los campos y las ondas (campos dependientes del tiempo y del espacio) son las cantidades conceptuales básicas de este modelo. Los postulados fundamentales, que enunciaremos en capítulos subsecuentes, relacionarán \mathbf{E} , \mathbf{D} , \mathbf{B} , \mathbf{H} y las cantidades fuente; además, las relaciones derivadas nos llevarán a la explicación y la predicción de los fenómenos electromagnéticos.

Hasta acá los axiomas. Tiembla Euclides

1-3 UNIDADES EN EL SI Y CONSTANTES UNIVERSALES

La medición de una cantidad física debe expresarse como un número seguido por una unidad. De esta manera podemos hablar de una longitud de tres metros, una masa de dos kilogramos y un periodo temporal de diez segundos. Para que un sistema de unidades sea útil, debe basarse en unidades fundamentales de tamaño conveniente (práctico). Todas las cantidades en la mecánica pueden expresarse en términos de tres unidades básicas (de longitud, masa y tiempo). En el electromagnetismo se requiere una cuarta unidad básica (de corriente). El **SI** (*Sistema internacional de unidades*) es un **sistema MKSA** elaborado a partir de las cuatro unidades fundamentales listadas en la tabla 1-2. Todas las otras unidades usadas en el electromagnetismo, incluyendo las que aparecen en la tabla 1-1, son unidades derivadas que se expresan en función de *metros*, *kilogramos*, *segundos* y *amperes*. Por ejemplo, la unidad de carga, coulomb (C), es ampere-segundo ($A \cdot s$); la unidad de intensidad de campo eléctrico (V/m) es $kg \cdot m/A \cdot s^3$; la unidad de densidad de flujo magnético, tesla (T), es $kg/A \cdot s^2$. En el apéndice A se presentan tablas más completas de las unidades de diversas cantidades.

En nuestro modelo electromagnético hay tres constantes universales, además de las cantidades de campo de la tabla 1-1. Estas constantes se relacionan con las propiedades

Unidades del SI o
MKSA

TABLA 1-2 UNIDADES DEL SI FUNDAMENTALES

Cantidad	Unidad	Abreviatura
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Tiempo	segundo	s
Corriente	ampere	A

Tres constantes universales del modelo electromagnético

del espacio libre (vacío) y son: **velocidad de la onda electromagnética** (incluyendo la luz) en el espacio libre, c ; **permitividad** del espacio libre, ϵ_0 ; y **permeabilidad** del espacio libre, μ_0 . Se han realizado muchos experimentos para medir con precisión la velocidad de la luz, hasta varias cifras decimales. Para nuestros fines basta recordar que

$$c \cong 3 \times 10^8 \quad (\text{m/s}), \quad (\text{en el espacio libre}) \quad (1-6)$$

Las otras dos constantes, ϵ_0 y μ_0 , se relacionan con los fenómenos eléctricos y magnéticos, respectivamente: ϵ_0 es la constante de proporcionalidad entre la densidad de flujo eléctrico \mathbf{D} y la intensidad de campo eléctrico \mathbf{E} en el espacio libre, de manera que

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}; \quad (\text{en el espacio libre}) \quad (1-7)$$

μ_0 es la constante de proporcionalidad entre la densidad de flujo magnético \mathbf{B} y la intensidad de campo magnético \mathbf{H} en el espacio libre, de manera que

$$\mathbf{B} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{H}. \quad (\text{en el espacio libre}) \quad (1-8)$$

¿y de dónde vienen estos números?

Los valores de ϵ_0 y μ_0 se determinan de acuerdo con el sistema de unidades elegido y no son independientes. En el **sistema SI**, adoptado de manera casi universal para el trabajo electromagnético, se elige la permeabilidad del espacio libre como

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad (\text{H/m}), \quad (\text{en el espacio libre}) \quad (1-9)$$

donde H/m representa henry por metro. Con los valores de c y μ_0 establecidos en las ecuaciones (1-6) y (1-9), el valor de la permitividad del espacio libre se obtiene de las siguientes relaciones:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (\text{m/s}), \quad (\text{en el espacio libre}) \quad (1-10)$$

o sea

$$\epsilon_0 = \frac{1}{c^2 \mu_0} \cong \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \cong 8.854 \times 10^{-12} \quad (\text{F/m}), \quad (\text{en el espacio libre}) \quad (1-11)$$

H/m y F/m y todo muy parecido

TABLA 1-3 CONSTANTES UNIVERSALES EN UNIDADES DEL SI

Constantes universales	Símbolo	Valor	Unidad
Velocidad de la luz en el espacio libre	c	3×10^8	m/s
Permeabilidad del espacio libre	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m
Permitividad del espacio libre	ϵ_0	$\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$	F/m

donde F/m es la abreviatura de farad por metro. En la tabla 1-3 se resumen las tres constantes universales y sus valores.

Ahora que hemos definido las cantidades básicas y las constantes universales del modelo electromagnético, podemos desarrollar los temas del electromagnetismo. Sin embargo, antes de hacerlo, debemos contar con las herramientas matemáticas apropiadas. En el capítulo que sigue analizaremos las reglas de operación básicas del álgebra y el cálculo vectoriales.

RESUMEN

En este capítulo se sentaron las bases para nuestro estudio del electromagnetismo para ingeniería. Adoptamos un enfoque deductivo o axiomático y construimos un modelo electromagnético. Se definieron las cantidades fuente básicas (carga, densidad de carga, densidad de corriente) y las cantidades de campo (\mathbf{E} , \mathbf{D} , \mathbf{B} , \mathbf{H}); se especificó el sistema de unidades (SI) y se indicaron las tres constantes universales del espacio libre (μ_0 , c , ϵ_0). Con base en este esquema podemos desarrollar los diversos temas presentando los postulados fundamentales en los capítulos sucesivos; lo haremos gradualmente, pero antes necesitamos estar familiarizados con las matemáticas que usaremos para relacionar las distintas cantidades. Es indispensable un conocimiento sólido del análisis vectorial y por ello se presenta en el capítulo 2 el material necesario sobre álgebra vectorial y cálculo vectorial.

PREGUNTAS DE REPASO

P.1-1 ¿Qué es el electromagnetismo?

P.1-2 Describa dos fenómenos o situaciones, aparte del teléfono móvil de la figura 1-1, que no puedan explicarse adecuadamente con la teoría de circuitos.

P.1-3 ¿Cuáles son los tres pasos esenciales para elaborar un modelo idealizado para el estudio de un tema científico?

P.1-4 ¿Cuáles son las cantidades fuente del modelo electromagnético?

- P.1-5** ¿Qué significa una *función puntual*? ¿La densidad de carga es una función puntual? ¿La corriente es una función puntual?
- P.1-6** ¿Cuáles son las cuatro unidades SI fundamentales del electromagnetismo?
- P.1-7** ¿Cuáles son las cuatro unidades de campo fundamentales del modelo electromagnético? ¿Cuáles son sus unidades?
- P.1-8** ¿Cuáles son las tres constantes universales del modelo electromagnético y cuáles son sus relaciones?