El campo eléctrico

En los capítulos anteriores se estudiaron minuciosamente los conceptos de fuerza y movimiento. Normalmente se utilizaron las leyes de movimiento de Newton para analizar las consecuencias de las fuerzas de *contacto*. Si se reflexiona un momento acerca del universo entero se concluirá que hay un número enorme de objetos que *no* están en contacto.

Un proyectil que experimenta una fuerza hacia abajo no puede explicarse en términos de su interacción con partículas de aire; los planetas giran continuamente a través del espacio que rodea al Sol y este experimenta una fuerza que lo hace girar en una trayectoria elíptica por fuerzas que no lo tocan. Incluso a nivel atómico, no hay "cuerdas" que mantengan a los electrones en sus órbitas alrededor del núcleo.

Si realmente quiere comprenderse al universo en que vivimos, deben desarrollarse leyes para predecir la magnitud y dirección de las fuerzas que no se transmiten por contacto. Dos de estas leyes ya han sido estudiadas:

1. *Ley de Newton de la gravitación universal:*

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad (31\text{-}1)$$

2. *Ley de Coulomb de las fuerzas electrostáticas:*

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad (31\text{-}2)$$

La ley de Newton predice la fuerza mutua que existe entre dos masas separadas por una distancia r; la ley de Coulomb trata con la fuerza electrostática, como se estudió en el capítulo 30. Al aplicar estas leyes se encuentra que es útil desarrollar ciertas propiedades del espacio que rodea a las masas o a las cargas.

31-1 CONCEPTO DE CAMPO

Tanto la fuerza eléctrica como la gravitacional son ejemplos de *fuerzas de acción a distancia* que resultan extremadamente difíciles de visualizar. A fin de resolver este hecho, los físicos de antaño postularon la existencia de un material invisible llamado éter, que se suponía llenaba todo el espacio. De este modo eso podría explicarse la fuerza de atracción gravitacional como debida a esfuerzos en el éter causadas por la presencia de varias masas. Ciertos experimentos de óptica han demostrado que la teoría del éter es insostenible (véase Sec. 24-2), y esto obligó a considerar si el espacio por sí mismo poseía propiedades de interés para el físico.

Puede afirmarse que la presencia de una masa altera el espacio que la rodea de tal modo que produce una fuerza gravitacional sobre otra masa cercana. Se describe esta alteración de las propiedades del espacio por medio de la introducción del concepto de *campo gravitacional* que rodea todas las masas. Un campo de este tipo puede decirse que existe en cualquier región del espacio donde una masa testigo o de prueba experimentará una fuerza gravitacional. La intensidad del campo en cualquier punto sería proporcional a la fuerza que experimenta cierta masa dada en dicho punto. Por ejemplo, en cualquier punto cercano a la Tierra, el campo gravitacional podría representarse cuantitativamente por:

$$g = \frac{F}{m} \qquad (31\text{-}3)$$

donde g = aceleración gravitacional debida a la fuerza de gravedad
F = fuerza gravitacional
m = masa testigo o de prueba (véase Fig. 31-1)

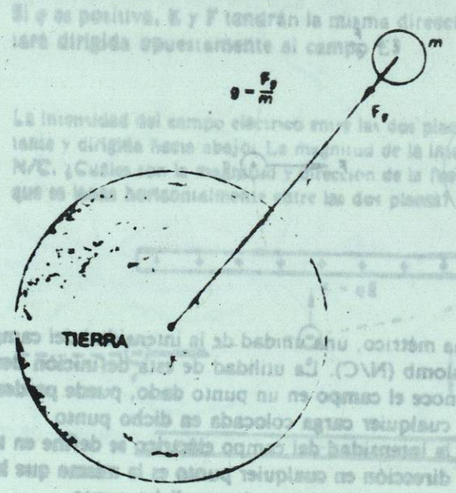

Fig. 31-1 El campo gravitacional en cualquier punto por encima de la Tierra puede representarse por la aceleración gravitacional g que una pequeña masa m experimentaría si fuera colocada en ese punto.

Si se conoce g en cualquier punto por encima de la Tierra, la fuerza F que actúa sobre cierta masa m colocada en dicho punto puede determinarse a partir de la ecuación (31-3).

El concepto de un campo también puede aplicarse a objetos cargados eléctricamente. El espacio que rodea un objeto cargado se altera por la presencia de un *campo eléctrico* en ese espacio.

Se dice que un campo eléctrico existe en una región del espacio en la que una carga eléctrica experimenta una fuerza eléctrica.

Esta definición suministra una prueba para la existencia de un campo eléctrico. Simplemente se coloca una carga en el punto en cuestión. Si se observa una fuerza eléctrica, en ese punto existe un campo eléctrico.

De la misma manera que la fuerza por unidad de masa proporciona una definición cuantitativa de un campo gravitacional, la intensidad de un campo eléctrico puede representarse mediante la fuerza por unidad de carga. Se define la intensidad del campo eléctrico E en un punto en términos de la fuerza F experimentada por una carga positiva pequeña $+q$ cuando se coloca en dicho punto. (Véase Fig. 31-2.) La magnitud de la intensidad del campo eléctrico es dada por

$$\boxed{E = \frac{F}{q}} \qquad (31\text{-}4)$$

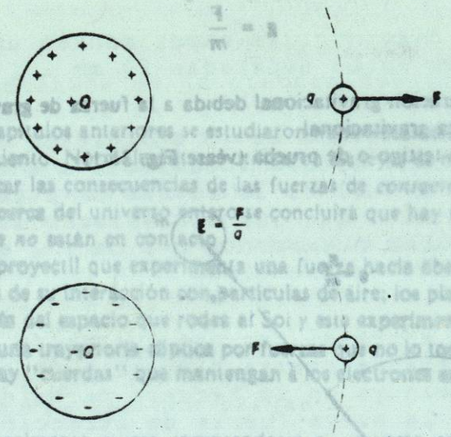

Fig. 31-2 La dirección de la intensidad del campo eléctrico en un punto es la misma que corresponde a la dirección del movimiento de una carga positiva $+q$ cuando se coloca en ese punto; su magnitud es la fuerza por unidad de carga (F/q).

En el sistema métrico, una unidad de la intensidad del campo eléctrico es el newton por coulomb (N/C). La utilidad de esta definición descansa en el hecho de que si se conoce el campo en un punto dado, puede predecirse la fuerza que actuará sobre cualquier carga colocada en dicho punto.

Ya que la intensidad del campo eléctrico se define en términos de una carga *positiva*, su dirección en cualquier punto es la misma que la fuerza electrostática sobre una carga positiva de prueba en dicho punto.

La dirección (y sentido) de la intensidad del campo eléctrico **E** *en un punto del espacio, es la misma que la dirección (y sentido) en la cual una carga positiva se movería si fuera colocada en dicho punto.*

Sobre esta base, el campo eléctrico en la vecindad de una carga positiva $+Q$ será hacia afuera, o alejándose de la carga, como se indica por la figura 31-3*a*. En la vecindad de una carga negativa $-Q$, la dirección, será hacia adentro, o sea, dirigido hacia la carga (Fig. 31-3*b*).

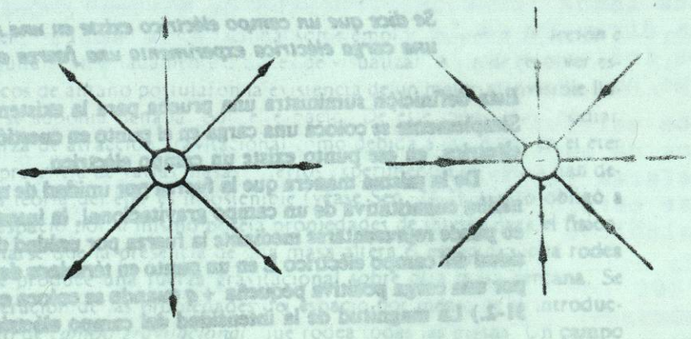

Fig. 31-3 *a)* El campo en la vecindad de una carga positiva está dirigido radialmente hacia afuera a cualquier punto. *b)* El campo está dirigido hacia adentro o hacia una carga negativa.

Debe recordarse que la intensidad del campo eléctrico es una propiedad que se asocia con el *espacio* que rodea al cuerpo cargado. Un campo gravitacional existe alrededor de la Tierra y no depende de que haya o no una masa en el seno de ésta. De manera similar, existe un campo eléctrico en la vecindad de un cuerpo cargado, independientemente de si se coloca o no una carga en el campo. Si se coloca una carga en el campo, experimentará una fuerza F dada por

$$F = qE \qquad (31\text{-}5)$$

donde E = intensidad del campo eléctrico
q = magnitud de la carga colocada en el campo

Si q es positiva, **E** y **F** tendrán la misma dirección; si q es negativa, la fuerza **F** estará dirigida opuestamente al campo **E**.

EJEMPLO 31-1 La intensidad del campo eléctrico entre las dos placas mostradas en la figura 31-4 es constante y dirigida hacia abajo. La magnitud de la intensidad del campo eléctrico es 6×10^4 N/C. ¿Cuáles son la magnitud y dirección de la fuerza eléctrica ejercida sobre un electrón que se lanza horizontalmente entre las dos placas?

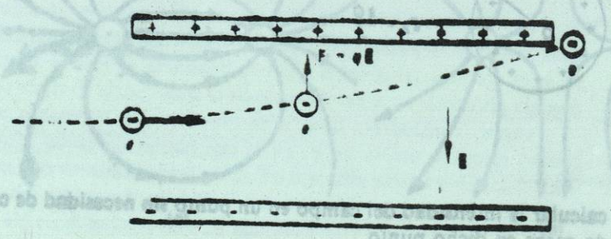

Fig. 31-4 Un electrón proyectado dentro de un campo eléctrico de intensidad constante.

Solución Ya que la dirección de la intensidad del campo **E** se define en términos de una carga positiva, la fuerza sobre un electrón actuará hacia arriba, u opuesta a la dirección del campo. La carga del electrón es -1.6×10^{-19} C. Así que la fuerza eléctrica está dada por la ecuación (31-5).

$$F = qE = (1.6 \times 10^{-19}\ \text{C})(6 \times 10^{4}\ \text{N/C})$$
$$= 9.6 \times 10^{-15}\ \text{N} \quad \text{hacia arriba}$$

Recuérdese que se utiliza el valor absoluto de la carga. Las direcciones de **F** y **E** son las mismas para cargas positivas, y opuestas para cargas negativas.

31-2 CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO

Ya se ha estudiado un método para medir la magnitud de la intensidad del campo eléctrico en un punto del espacio; se coloca una carga conocida en un punto, y se mide la fuerza resultante que actúa sobre ella. La fuerza por unidad de carga es una medida de la intensidad del campo eléctrico en dicho punto. La desventaja de este método es que no sustenta una relación obvia con la carga Q, la cual crea el campo. Mediante la experimentación se demuestra rápidamente que la magnitud del campo eléctrico que rodea a un cuerpo cargado es directamente proporcional a la cantidad de carga en el cuerpo. También puede demostrarse que en los puntos más y más alejados de una carga Q, una carga testigo q experimentará cada vez fuerzas menores. La relación exacta es derivada de la ley de Coulomb.

$$F = \frac{kQq}{r^2} \qquad (31\text{-}6)$$

Si este valor se sustituye para F en la ecuación (31-4), se tiene

$$E = \frac{F}{q} = \frac{kQq/r^2}{q}$$

$$\boxed{E = \frac{kQ}{r^2}} \qquad (31\text{-}7)$$

donde k es igual que 9×10^9 N·m²/C². El sentido del campo es opuesto a Q si Q es positiva y hacia Q si Q es negativa. Ahora ya se tiene la relación que permite

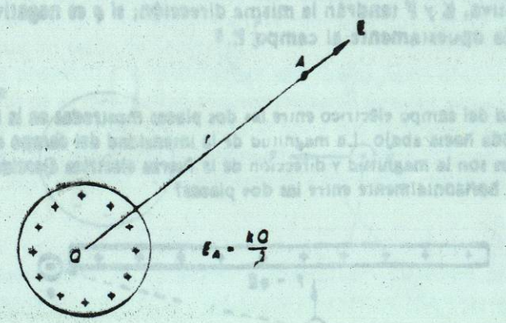

Fig. 31-5 Cálculo de la intensidad del campo eléctrico a una distancia r del centro de una carga sola Q.

calcular la intensidad del campo en un punto sin necesidad de colocar una segunda carga en dicho punto.

31-3 LINEAS DEL CAMPO ELÉCTRICO

Michael Faraday (1791-1867) introdujo una forma muy ingeniosa para facilitar la visualización de los campos eléctricos, en sus trabajos iniciales sobre electromagnetismo. El método consiste en representar tanto la dirección (como el sentido) de un campo eléctrico mediante líneas imaginarias llamadas *líneas del campo eléctrico*.

Las líneas del campo eléctrico son líneas imaginarias dibujadas de tal modo que su dirección (y sentido) en cualquier punto es la misma que la dirección y sentido de la intensidad del campo eléctrico en dicho punto.

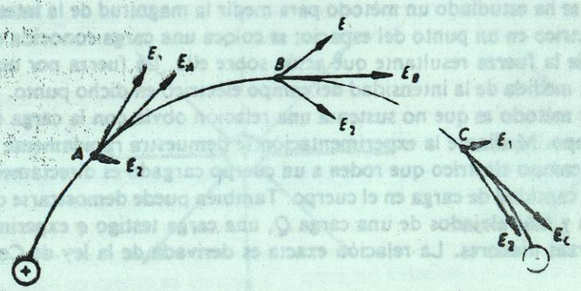

Fig. 31-6 La dirección de una línea de campo eléctrico en cualquier punto es la misma que la dirección de la intensidad del campo eléctrico resultante en dicho punto.

Por ejemplo, las líneas dibujadas radialmente hacia afuera de la carga positiva de la figura 31-3*a*, representan la dirección del campo en cualquier punto sobre la línea. Las líneas del campo eléctrico en la vecindad de una carga eléctrica negativa serían radiales y estarían dirigidas hacia la carga, como en la figura 31-3*b*. Más adelante se verá que la densidad de esas líneas, en cualquier región del espacio, una medida de la *magnitud* de la intensidad del campo en esa región.

En general, la dirección del campo eléctrico en una región del espacio suele variar de un punto a otro. De aquí que normalmente las líneas sean curvas. Por ejemplo, considérese la construcción de una línea de campo eléctrico en la región entre una carga positiva y una carga negativa, como se muestra en la figura 31-8.

La dirección de la línea de campo eléctrico en cualquier punto es la misma que la dirección del vector de campo eléctrico resultante en dicho punto. Deben seguirse dos reglas al construir las líneas del campo eléctrico:

1. La dirección de la línea de campo en cualquier punto es la misma que la dirección en la cual se movería una carga positiva si fuera colocada en ese punto.

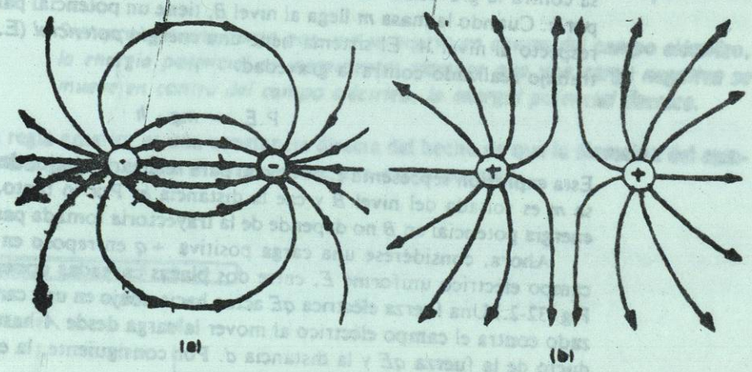

Fig. 31-9 *a)* Representación gráfica de las líneas de campo eléctrico en los alrededores de un dipolo. *b)* Las líneas de campo eléctrico entre dos cargas positivas.

2. El espaciado de las líneas del campo debe ser de tal modo que estén más juntas donde se tiene un campo fuerte y alejadas entre sí donde el campo es débil.

Si se siguen estas reglas muy generales, se pueden construir las líneas del campo eléctrico para dos casos comunes mostrados en la figura 31-9. Como una consecuencia de la manera en la que se dibujan las líneas, *éstas siempre divergen de las cargas positivas y convergen en las cargas negativas*. La líneas no pueden originarse o finalizar en el espacio, aunque el extremo de una línea eléctrica pueda proseguir al infinito.

Potencial eléctrico

Muchos de los problemas estudiados en mecánica se simplificaron notablemente al introducir el concepto de energía. La conservación de la energía mecánica permitió definir ciertas cosas en relación con los estados inicial y final de los sistemas sin necesidad de analizar el movimiento entre estados. El concepto de transformación de la energía potencial en energía cinética evita el problema de las fuerzas variables.

En electricidad, pueden resolverse muchos problemas si se consideran los cambios de energía que experimenta una carga en movimiento; por ejemplo, si se requiere cierta cantidad de trabajo para mover una carga en contra de fuerzas