CORRIENTE DE DESPLAZAMIENTO

La ley de Ampere, tal como fue enunciada originariamente, establece que

$$\oint \overline{B} \cdot \overline{dl} = \mu_0 \, i_c \qquad (1)$$

En palabras: la circulación del vector campo magnético alrededor de una trayectoria cerrada es igual a una cierta constante μ_0 -permeabilidad del vacío- multiplicada por la corriente encerrada por dicha trayectoria.
La trayectoria es arbitraria, y cumple como única condición ser cerrada. Puede ser tan sencilla y regular como una circunferencia o absolutamente irregular y antojadiza.
Una vez elegida la trayectoria para aplicar la ley, surge una cuestión no menor: ¿qué interpretamos como corriente encerrada?
Para clarificar el punto, veamos un ejemplo:
La figura 1 muestra un conductor por donde circula una corriente I, conjuntamente con una posible trayectoria para aplicar la ley de Ampere, formada por dos arcos de circunferencia (casi completas) centrados en el conductor, unidos por dos tramos rectos paralelos al conductor.
¿Está la corriente I "encerrada" por la trayectoria?
Es evidente que no está claro cuál es la respuesta, y que se hace necesario un criterio absoluto e indubitable para definir la situación. Ese criterio es el siguiente:

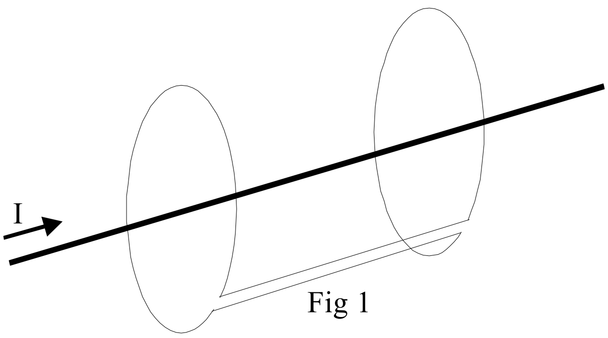

Fig 1

Una corriente está "encerrada" por una trayectoria si atraviesa <u>cualquier</u> superficie que tenga como límite a dicha trayectoria.
Si aplicamos este criterio a nuestro ejemplo, podríamos interpretar la trayectoria como el borde de una página, y se ve inmediatamente que la corriente NO atraviesa esa página, y por lo tanto NO ESTÁ ENCERRADA.
Esto queda corroborado fácilmente si evaluamos, para este recorrido, la integral del primer miembro de la ecuación (1). Aparecerán dos términos nulos (tramos rectos, en donde el campo es normal al desplazamiento), y dos términos de igual magnitud y signos opuestos (tramos circulares, como consecuencia de que son recorridos en sentidos opuestos). Vale decir: la integral da cero, lo cual se corresponde con el hecho de que no hay corriente encerrada.

Veamos ahora otra situación problemática:
La figura 2 sugiere un capacitor plano paralelo (muy fuera de proporciones, para evidenciar lo que se pretende mostrar), que está siendo cargado a través de conductores que llevan una corriente i_c.
Apliquemos ley de Ampere recorriendo una trayectoria C como la mostrada, esto es, una circunferencia centrada en el conductor.
Para conocer cuál es la corriente encerrada por esta trayectoria, se podría tomar, como se dijo, <u>cualquier</u> superficie que tenga como borde a esta circunferencia.
Si tomamos S_1 (círculo definido por C), evidentemente esta superficie está atravesada por la corriente i_c.
Si tomamos la S_2 (superficie abombada que pasa por el interior del capacitor), la corriente i_c no pasa por ella.

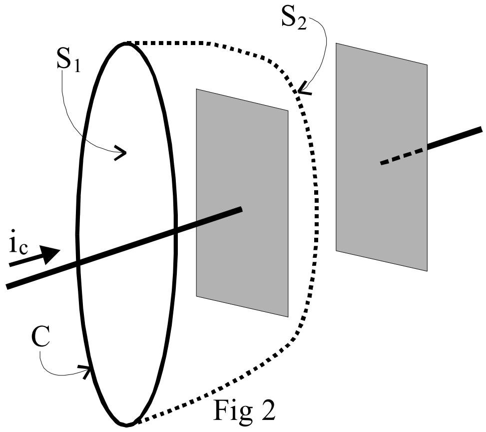

Fig 2

Estamos entonces frente a una situación en donde el valor del segundo miembro de la ecuación de Ampere depende de la superficie que tomemos como referencia, pues nos daría un cierto valor en el primer caso, y cero en el segundo. ESTO ES INADMISIBLE EN UNA LEY FÍSICA, y por lo tanto la invalidaría, al menos en la forma original propuesta por Ampere.

Teniendo en cuenta que éste parece ser un único caso en donde la ley de Ampere presenta una inconsistencia, se planteó la posibilidad de que estuviese incompleta. Recordemos que UNA LEY FÍSICA NO SE DEMUESTRA; SE LA PROPONE, y tiene validez en tanto no aparezca una situación contradictoria, como la mencionada .

Valiéndonos de el mismo capacitor de nuestro ejemplo, recordemos que para un capacitor plano vale:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_o} = \frac{q}{A\,\varepsilon_0}$$

De donde:

$$q = E\,A\,\varepsilon_0$$

Si derivamos respecto a t:

$$\frac{dq}{dt} = \varepsilon_0 \frac{d}{dt}(E\,A) = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \qquad (2)$$

En esta triple igualdad, el primer miembro es la corriente de conducción que llega a la placa del capacitor (i_c):

$$\frac{dq}{dt} = i_c$$

El último término tendrá también dimensiones de corriente, y es por eso que se la denominó CORRIENTE DE DESPLAZAMIENTO (i_d):

$$\varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} = i_d$$

El nombre ha perdurado históricamente, aunque quizás no sea el más apropiado, en la medida que <u>no hay un desplazamiento real de cargas</u> (una corriente en el sentido convencional que le damos a la palabra).
En nuestro ejemplo queda claro que esta corriente está asociada a lo que sucede en el interior del capacitor. Sin embargo, en su expresión no aparece ningún parámetro particular de este dispositivo. Esto nos indica que la expresión es general, y tendrá valor EN CUALQUIER CASO EN QUE HAYA UN CAMPO ELÉCTRICO VARIABLE, aunque no haya un capacitor involucrado.

Después de hacer estas consideraciones, Maxwell propuso agregar este nuevo término a la expresión original de la ley de Ampere, dándole su forma completa, tal como la enunciamos en la actualidad:

$$\oint \overline{B} \cdot \overline{dl} = \mu_0 \left(i_c + \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$$

Al aplicar ahora la ley a la situación planteada en la figura 2, comprobamos que la superficie S_1 está siendo atravesada por i_c; en tanto que S_2 lo es por i_d, y ambas corrientes son iguales, de acuerdo a (2), con lo que el resultado sería el mismo para ambas superficies, y se ha salvado la inconsistencia original.

<u>OBSERVACIÓN</u>:
En el ejemplo analizado de un capacitor en carga, se tiene a los dos tipos de corriente circulando en forma exclusiva e independiente por distintas partes del circuito. Sin embargo, no siempre la situación es esa, y es perfectamente posible la coexistencia de ambas circulando simultáneamente por el mismo sitio, como sería el caso, por ejemplo, si el capacitor en cuestión no tuviese un dieléctrico ideal, y circulase entre sus placas, una "corriente de pérdidas" además de la de desplazamiento.