

**DIFICULTADES CONCEPTUALES EN LA PRESENTACIÓN DE LA LEY DE AMPÈRE:
ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y PROPUESTA PARA LA ENSEÑANZA UNIVERSITARIA**

**CONCEPTUAL DIFFICULTIES IN AMPÈRE'S LAW PRESENTATION: BIBLIOGRAPHIC
ANALYSIS AND PROPOSAL FOR UNIVERSITY TEACHING**

Hugo A. Kofman y Sonia B. Concari

*GIDEAF - Departamento de Física - Facultad de Ingeniería Química - UNL - Stgo. del Estero 2829
(3000) Santa Fe – Argentina - Fax: 54 342 4571162*

hkofman@fiqus.unl.edu.ar sconcari@fiqus.unl.edu.ar

Resumen:

El presente estudio consiste en una investigación sobre el tratamiento que recibe la ley de Ampère en libros de texto universitarios, relativa a la validez y aplicabilidad de la misma. Sobre la base de los resultados de dicho análisis fue desarrollada una simulación computacional para la resolución de un problema de inducción que podría ser utilizado como ejemplo para esclarecer los conceptos involucrados en la ley y sus condiciones de aplicabilidad, ausentes o escasamente discutidas en los textos.

Palabras clave:

ley de Ampère; campo magnético; análisis bibliográfico; simulación; dificultades conceptuales

Abstract

The present study consists of an investigation about the treatment that Ampère's law receives in university textbooks, related to its validation and application. Based on the results of the analysis a computational simulation for the resolution of an inducement problem was developed. It would be used as an example to explain the concepts involved in the law and the conditions of application which are absent or scarcely discussed in the texts.

Keywords

INTRODUCCIÓN

La ley de Ampère es enseñada en los cursos básicos de física en la universidad como una de las leyes fundamentales del electromagnetismo. En su forma integral, la misma es un instrumento que simplifica la evaluación del campo magnético producido por distribuciones de corriente que presentan simetrías con módulo constante en las líneas de campo.

La enseñanza del tema en la práctica docente permitió a los autores detectar algunos problemas relativos a la aplicación de esta ley, en lo que hace a la identificación del circuito de corriente que origina el campo magnético. Algo similar ha ocurrido con relación al cálculo de campos y flujos magnéticos creados por corrientes variables, situaciones que generaban dudas a los alumnos en cuanto al significado de corrientes estacionarias o cuasi estacionarias que se establecen como condiciones de validez de esa ley. Ninguno de estos dos aspectos está claramente explicitado en la bibliografía de los cursos básicos de electromagnetismo.

El libro de texto es una guía tanto para el alumno como para el docente de ciencias. El aprendizaje y su relación con el libro de texto ha sido frecuente objeto de estudio, como lo reseñan Alexander y Kulikowich (1994). Dentro del grupo de innumerables estudios relativos a contenidos específicos, podemos destacar el análisis de textos universitarios sobre contenidos relativos a energía, calor y temperatura, sobre las propiedades de los gases, el rozamiento, modelos atómicos, y física moderna. Sobre la ley de Ampère, no se han encontrado estudios bibliográficos.

Luego de plantear el problema y formular el marco teórico, este artículo trata el tema en tres partes. En la primera se presenta un estudio sobre el tratamiento dado a la ley de Ampère en libros de texto universitarios, en la segunda, se muestra una simulación computacional propuesta como recurso didáctico para poner en evidencia la validez de la ley de Ampère en casos de interés que no son expuestos ni comentados en los textos, y en la tercera se propone un criterio para determinar si una corriente cumple con la condición de cuasi estacionaria.

La ley de Ampère

La ley de Ampère, en su forma más usual también conocida como ley o teorema circuital de Ampère, o forma integral de la ley de Ampère, se expresa según la relación (1) que indica que la circulación del campo magnético \mathbf{B} producido por una espira de corriente, a lo largo de una curva C concatenada con la espira, es μ_0 veces la corriente I de la espira. A tal curva se la denomina curva de Ampère, o curva amperiana.

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I \quad (1)$$

La expresión completada por Maxwell, adiciona a la intensidad I , la llamada Corriente de Desplazamiento, que es proporcional a la derivada temporal del flujo del campo eléctrico a través de una superficie apoyada en la curva amperiana.

La forma (1) de la ley es válida para corrientes enlazadas o concatenadas con la curva amperiana, es decir, el campo es el creado por todo el circuito cerrado en el cual circula la corriente. Algunos textos utilizados en la enseñanza del tema en los cursos universitarios, como se detalla más adelante, no explicitan claramente esta condición, refiriéndose a la de corriente total que “atraviesa” la superficie encerrada por la curva, o corrientes “totalmente rodeadas” por la curva.

Como ejemplo de la dificultad que conlleva esta condición, se describe una situación que se plantea frente a un problema concreto: el cálculo del campo magnético en el centro de una espira cuadrada. Algunos alumnos intentan resolver el problema aplicando la ley de Ampère, tomando una curva amperiana alrededor de cada uno de los cuatro conductores rectos que forman la espira y aplicando el principio de superposición para hallar el campo total con la ecuación (2).

$$\oint_{C_1} \mathbf{B}_1 \cdot d\mathbf{l}_1 = \mu_0 I \quad (2)$$

Como se muestra en la Figura 1 (ver abajo) , intentan calcular \mathbf{B}_1 aplicando la ley de Ampère con la expresión (2) y, aprovechando la simetría cilíndrica, calculan del mismo modo \mathbf{B}_2 , \mathbf{B}_3 y \mathbf{B}_4 , eligiendo trayectorias de integración similares para los otros tres conductores. Finalmente, obtienen el campo resultante por suma vectorial de estas cuatro componentes. El resultado (incorrecto) que así se obtiene es $2^{1/2}$ veces superior al encontrado aplicando la ley de Biot y Savart, ya que de hecho se está calculando el campo producido por cuatro conductores rectilíneos infinitos.

Un primer nivel de crítica al procedimiento radica en que en la espira cuadrada los conductores rectilíneos no son de longitud infinita y que por lo tanto la ley de Ampère no es aplicable. Esto es cierto, pero no resulta suficiente, ya que hay casos de aplicación de la ley a conductores no infinitos, tales como los que componen un solenoide lineal o toroidal.

El planteo correcto, realizado en los textos de mayor nivel a los utilizados en los cursos básicos, que contempla todos los casos, es que la ley de Ampère, considerada en su expresión integral, se refiere a corrientes concatenadas o enlazadas con la trayectoria de integración. La ley establece que la integral curvilínea cerrada del campo magnético es proporcional a la corriente enlazada con la trayectoria de integración, y que el campo que interviene en esa expresión es el creado por toda la *corriente enlazada (cerrada)*.

El error conceptual que se comete al pretender resolver el problema de la espira cuadrada con la ley de Ampère, es considerar que el campo magnético de la integral (2) es creado sólo por un sector del conductor, y no por la espira cerrada, enlazada con la trayectoria de integración. Ese error no se comete para un conductor rectilíneo infinito, aunque el mismo se presente como un conductor abierto, ya que se puede considerar que dicho conductor es parte de una espira enlazada con la trayectoria de Ampère, que se cierra por un lazo a distancia infinita. De esta forma, sólo la parte rectilínea tiene influencia en la conformación del campo. En ese caso, las leyes de Ampère y de Biot y Savart dan resultados idénticos.

En la Figura 2 (ver abajo) se muestra el planteo general de la ley de Ampère y se dan las expresiones correspondientes, que la relacionan con la ley de Biot y Savart.

$$\mathbf{B}_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_{c_1} \frac{d\mathbf{l}_1 \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (3)$$

$$\oint_{c_2} \mathbf{B}_1 \cdot d\mathbf{l}_2 = \mu_0 I \quad (4)$$

$$\oint_{c_2} \left(\frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_{c_1} \frac{d\mathbf{l}_1 \times \mathbf{r}}{r^3} \right) \cdot d\mathbf{l}_2 = \mu_0 I \quad (5)$$

Con respecto a la dificultad conceptual planteada frente al problema de la espira, se ha considerado la posibilidad de que la misma esté relacionada con ciertas imprecisiones en el tratamiento del tema en los textos, y también con el enfoque limitado que el docente podría haber dado en la clase con esa bibliografía. Sobre esta base, se realizó un estudio del tratamiento que recibe la ley de Ampère en textos universitarios de distintos niveles.

Metodología

El estudio sobre el tratamiento de la ley de Ampère en los textos fue realizado empleando el análisis de contenido (Bardin, 1996). Dicho análisis abarcó tres etapas: el preanálisis, el análisis propiamente dicho del material y la elaboración e interpretación de los resultados.

El preanálisis consistió en la selección de una muestra de libros, la exploración del material, y la formulación de las categorías que guiaron el análisis del tema objeto de estudio. La muestra incluyó seis textos de uso corriente en los cursos de electromagnetismo en ciclos básicos de carreras de ingeniería, denominados textos de nivel básico, y tres textos empleados en cursos avanzados de electromagnetismo, identificados como de nivel avanzado. Las secciones exploradas corresponden a los apartados en los que se trata la ley de Ampère en cada libro.

El análisis del material fue realizado teniendo en cuenta las siguientes categorías y valores correspondientes:

1. Formas de presentación de la ley: por definición, por deducción de un caso particular, por demostración en general, por analogía con la ley de Gauss de la electrostática.
2. Explicitación de los límites de validez de la ley: corrientes y la curva amperiana concatenadas, corrientes infinitas (corrientes en un conductor infinitamente largo) que atraviesan la superficie limitada por la curva, corrientes estacionarias, corrientes encerradas por la curva amperiana, no explícita.
3. Tipos de problemas resueltos y/o propuestas de aplicación de la ley: circuitos cerrados concatenados con la curva amperiana, conductores infinitos, corrientes no estacionarias, otros.

Resultados

En las Tablas I y II se presentan los resultados del análisis de los textos sobre la base de las categorías definidas.

Como puede verse en la Tabla I, en la mayoría de los textos de la muestra se deduce la forma integral de la ley de Ampère, para el caso particular de un conductor recto de corriente constante, infinitamente largo, y se generaliza su validez a corrientes "constantes", "estacionarias" o "estables", "encerradas", "envueltas" o "enlazadas" por la curva C . En general, también se pone énfasis en la analogía entre la ley de Ampère para campos magnéticos y la ley de Gauss para campos eléctricos. No se explica que las corrientes deben ser cerradas ni se habla de corrientes cuasiestacionarias.

En la mayoría de los textos también se explica que la aplicabilidad de la ley de Ampère (como la ley de Gauss) se limita a casos de simetría del campo. Tipler (1978) discute casos en los que la ley se aplica fácilmente debido a la simetría del campo, y casos en los que la ley no es aplicable (pero sí es válida) por falta de simetría, como los casos de espira y circuito finito que contiene un segmento de corriente, y el caso de un flujo momentáneo de carga, para el que explica que la ley no es válida pues la corriente no es constante.

| Texto (nivel bás.) | Presentación de la ley | Validez de la ley | Problemas de aplicación de la ley |
|---------------------------|--|---|--|
| Alonso (1987) | Deduce la relación (2) para el caso particular del " <i>campo magnético de una corriente rectilínea</i> " (pág. 617). | La corriente debe estar enlazada por la curva amperiana. | Bobina toroidal; cilindro. |
| Gettys (1994) | Obtiene la ley para el caso particular de una corriente en un alambre largo y recto. | La corriente está " <i>enhebrada o enlazada por el camino cerrado</i> " (pág. 708). Es aplicable para el cálculo de campos de distribuciones de corrientes con un alto grado de simetría. | Conductor largo y recto tomando curvas cerradas no circulares; cilindro; solenoide cilíndrico ideal; bobina toroidal; coaxil infinito. |
| Halliday et al. (1996) | Presenta la expresión de la ley (2) por analogía con la ley de Gauss para campos eléctricos. | En el lado derecho de la ecuación (2), <i>I "es la corriente total 'encerrada' por el anillo"</i> (pág. 195). Y agrega que eso es la corriente total que pasa por los alambres que perforan la superficie encerrada por el anillo amperiano y que la integral de <i>B dl</i> en el anillo no depende de las corrientes externas. | Conductores rectos infinitos; solenoide toroidal; cable coaxil infinito. |
| Mc Kelvey y Grotch (1981) | Introduce la ley como análoga a la ley de Gauss y la deduce para el caso de un conductor largo y recto con corriente constante. | a <i>I</i> es la corriente total que fluye a través de la trayectoria cerrada arbitraria de integración. Explica que es útil cuando la distribución de corriente permite la evaluación simple de la integral de <i>B.dl</i> . | Conductor cilíndrico macizo y hueco infinitamente largo de densidad de corriente uniforme; cilindro infinito con hueco descentrado; bobina toroidal; solenoide largo. |
| Serway (1993) | Analiza fenomenológicamente el campo creado por la corriente de un alambre largo, ubicando brújulas en un círculo alrededor del alambre. Calcula la integral del campo sobre ese círculo utilizando el valor del campo calculado antes por la ley de B-S y arriba al resultado expresado como ley de Ampère. | El teorema es válido sólo para corrientes estables. En la ley de Ampère, <i>I</i> es la corriente estable total que pasa a través de cualquier superficie limitada por la trayectoria cerrada. Aclara que la ley se utiliza sólo para el cálculo de campos de configuraciones de cte. con alto grado de simetría, como la ley de Gauss. | Cilindro largo de corriente uniforme; bobina toroidal; placa infinita de densidad de corriente uniforme; solenoide |
| Tipler (1978) | Calcula la integral del campo (calculado antes) sobre un círculo alrededor de un conductor rectilíneo y generaliza el resultado como ley de Ampère. | Válida para cualquier corriente estacionaria envuelta por la curva cerrada. La ley es válida aún si no existen simetrías (como la ley de Gauss), pero en esos casos no sirve para calcular el campo magnético. Como ejemplo considera una espira de corriente enlazada con la curva. | Conductor rectilíneo largo de cte. uniform. distribuida; segmento de cte. de longitud <i>L</i> (c/ ej. de aplicación no correcta de la ley, por falta de simetría del campo); flujo momentáneo de carga (c/ ej. de no validez de la ley para cte. no constante); solenoide finito; |

| | |
|--|----------------|
| | imán en barra. |
|--|----------------|

Tabla I: Formas de presentación de la ley, explicitación de los límites de validez de la ley y tipos de problemas de aplicación de la ley en los textos de nivel básico.

| Texto (nivel av.) | Presentación de la ley | Validez de la ley | Problemas de aplicación de la ley |
|-----------------------------|--|---|--|
| Reitz et al. (1986) | Deduce la forma local del teorema circuital de Ampère de la condición $\text{div} \mathbf{J} = 0$ y posteriormente la expresión (2) con I expresada como la integral de la densidad de corriente \mathbf{J} en la superficie encerrada por la curva amperiana. | Para corrientes constantes, es decir que satisfagan $\text{div} \mathbf{J} = 0$. | Alambre largo recto; discute el caso de distribuciones de corriente de gran simetría. |
| Rodríguez Trelles (1984) | Deduce la relación (2) para el caso particular del campo \mathbf{B} producido por una espira de corriente, a lo largo de una curva concatenada con la espira, como la integral de línea del campo \mathbf{B} aplicando la ley de Biot y Savart. Demuestra que la circulación es μ_0 veces la corriente de una espira enlazada con la curva y que es nula si la espira y la curva cerrada no están enlazadas. | La validez del teorema se limita al caso magnetostático, cuando todos los procesos son estacionarios (I , \mathbf{J} , \mathbf{B} constantes en el tiempo). Lo demuestra a partir de la Ecuación de Continuidad y aclara que esa condición " <i>implica que las líneas de corriente deben ser cerradas</i> " (pág. 174). | Ninguno. |
| Wangness (1997) | Deduce la ley circuital de Ampère de la relación (1). | I es la corriente total que pasa a través de la superficie encerrada por la curva C . La integral de $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}$ es cero si la trayectoria de integración no encierra una corriente (si no está enlazada por la curva). | Corriente recta infinitamente larga; plano infinito de corriente uniforme; solenoide ideal infinitamente largo; bobina toroidal. |

Tabla II: Formas de presentación de la ley, explicitación de los límites de validez de la ley y tipos de problemas de aplicación de la ley en los textos de nivel avanzado.

Los problemas a los que se aplica la ley de Ampère, son prácticamente los mismos en todos los textos, incluyendo conductores cilíndricos infinitos, solenoide toroidal y bobina.

A diferencia de los textos del nivel básico, en los de nivel avanzado se deduce la ley de Ampère para el caso de una espira, a través de un cálculo relativamente complejo. Rodríguez Trelles (1984) y Wangness (1997) demuestran la ley de Ampère a partir de la ley de Biot y Savart en un caso general de una espira de corriente.

Como se representa en la Figura 2, el cálculo de la inducción magnética en un punto de la curva de Ampère C_2 debida a la corriente I que circula en la espira C_1 requiere reemplazar \mathbf{B} expresado por la ley de Biot y Savart de la ecuación (3) sobre la curva C_1 , en la ecuación (5) y luego operar con las dos integrales curvilíneas en conjunto, las que se extienden a curvas distintas. Esta demostración está lejos de presentar la simplicidad y transparencia con que se demuestra por ejemplo, la ley de Gauss. En ese tratamiento, se deduce que las corrientes deben ser *cerradas y enlazadas* por la trayectoria de Ampère C_2 .

Análisis de los resultados

La discusión relativa a la condición de corrientes cerradas y enlazadas no está planteada, al menos en estos términos, en los textos de nivel básico analizados, lo cual dificulta la conceptualización por parte de los alumnos. Pareciera que la ley de Ampère se aplica a veces a conductores abiertos, como el conductor recto infinito, y otras a conductores cerrados, como en el caso de un solenoide. Pero no se suelen unificarse esos tratamientos.

Quizás la causa que motiva esta limitación de los libros de texto se encuentre en la dificultad matemática para demostrar la ley de Ampère a partir de la ley de Biot y Savart en un caso general, tal como se hace en los textos de nivel avanzado. Por ese motivo, quizás, se justifica la presentación de la ley de Ampère a partir del cálculo del campo producido por la corriente transportada por un conductor rectilíneo infinito con la ley de Biot y Savart. Se consigue así un procedimiento notablemente más sencillo, pero que deja a oscuras un hecho central: el campo **B** de la expresión (1) debe ser el producido por una espira cerrada y concatenada (o enlazada) con la trayectoria de Ampère.

Una simulación computacional que ayuda a comprender el problema de las corrientes concatenadas

Con el propósito de ejemplificar sobre el problema de las corrientes concatenadas con la curva de Ampère, se plantea el siguiente problema particular: el cálculo del campo en el interior de un cable coaxial de longitud comparable a su diámetro y que conduce una corriente cerrada, de manera que la intensidad transportada por el conductor central es la misma que la que circula en sentido contrario por el conductor cilíndrico exterior. El coaxil tiene dos tapas circulares, por las que la corriente circula radialmente, tal como se indica en la Figura 3a.

Se propone resolver el problema aplicando la ley de Ampère y la de Biot y Savart, ésta última para estudiar las contribuciones de los distintos sectores al campo magnético total y poner en evidencia que el origen del campo magnético se encuentra en toda la corriente enlazada con la trayectoria de integración, lo cual incluye al cilindro exterior y los dos discos.

Para el cálculo se modelaron las distintas partes del coaxil mediante conductores filiformes: un conductor central que lleva una corriente I entre Z_2 y Z_1 , N conductores laterales verticales, cada uno con una corriente I/N entre Z_1 y Z_2 , e igual número de conductores radiales superiores e inferiores, con corrientes divergentes y convergentes respectivamente. En la Figura 3b se indica el campo **B** en el punto P de la curva amperiana circular que rodea al conductor central.

En la Tabla III se presentan los resultados de esta simulación, para los valores seleccionados. En el cálculo se encontraron coincidencias hasta en 12 cifras decimales entre los valores de \mathbf{B} calculados aplicando la ley de Ampère y la de Biot y Savart respectivamente.

Los resultados obtenidos, naturalmente son coincidentes, poniéndose en evidencia que el campo \mathbf{B} calculado con tanta simplicidad mediante la ley de Ampère (con la trayectoria circular indicada en la Figura 3) se origina en todos los tramos de corriente presentes. Se puede comprobar, por ejemplo que en coaxiales muy largos sólo tiene incidencia el conductor central, mientras que para cables muy cortos prevalece el aporte de las tapas con corrientes radiales.

| Variable | Valor asignado/calculado |
|--|---------------------------------------|
| Radio exterior del coaxil | 1,00 m |
| Posición (y) del punto P | 0,50 m |
| Altura del coaxil ($Z_2 - Z_1$) | 0,70 m |
| Distancia del punto P a la parte superior del coaxil | 0,50 m |
| Número de conductores de la simulación | 1000 |
| Intensidad de corriente | 1000 A |
| \mathbf{B} calculado mediante la ley de Ampère | $4,000 \cdot 10^{-4} \text{ T } (-i)$ |
| Contribución a \mathbf{B} del conductor central | $2,157 \cdot 10^{-4} \text{ T } (-i)$ |
| Contribución a \mathbf{B} del cilindro externo | $1,661 \cdot 10^{-5} \text{ T } (-i)$ |
| Contribución a \mathbf{B} del disco superior | $4,821 \cdot 10^{-5} \text{ T } (-i)$ |
| Contribución a \mathbf{B} del disco inferior | $1,195 \cdot 10^{-4} \text{ T } (-i)$ |
| Total de las contribuciones (Biot-Savart) | $4,000 \cdot 10^{-4} \text{ T } (-i)$ |

Tabla III: Resultados del cálculo del campo \mathbf{B} en el interior de un cable coaxil de longitud comparable a su diámetro.

Con este ejemplo se puede considerar una analogía interesante con la ley de Gauss: la carga encerrada por la superficie en la ley de Gauss es equivalente a la corriente cerrada, enlazada por la curva amperiana y la carga exterior a la corriente no enlazada. En la ley de Gauss, el campo eléctrico es función de todas las cargas presentes, pero el *flujo* sólo depende de la carga encerrada por la superficie. En la ley de Ampère, el campo magnético es función de todas las corrientes presentes, pero su *circulación* depende sólo del valor de la corriente cerrada, concatenada con la curva amperiana.

La ley de Ampère para corrientes variables cuasi estacionarias

Como puede verse en la Tabla I, en algunos libros se establece la condición de corriente I estacionaria. Cuando la velocidad de las cargas que componen la corriente es constante, no se producirá radiación de ondas electromagnéticas (OEM). Su valor, para velocidades no relativistas, puede calcularse mediante la ley de Biot y Savart y en consecuencia a través de la ley de Ampère. Esto incluye el caso del cálculo del campo magnético entre las placas de un condensador que se está cargando con una corriente constante, debiéndose considerar sólo la corriente de desplazamiento, la cual también sería constante en el tiempo.

En cambio, cuando las cargas están aceleradas, como en el caso de corrientes alternas, se produce emisión de ondas. Eso implica la aparición de otros componentes de los campos eléctrico y magnético. Dado que el cálculo del campo magnético con la ley de Biot y Savart (y de Ampère) involucra sólo la velocidad de las cargas, y que el componente del campo magnético correspondiente a la OEM depende de la aceleración, la ley de Ampère no resulta estrictamente correcta para calcular el valor total del campo magnético.

La ley en su forma (1) resulta aplicable al caso de corrientes cuasiestacionarias, es decir que varían “lentamente”. En general en la bibliografía esta condición no está cuantificada, y en muchos casos ni mencionada. A pesar de esto la ley de Ampère es aplicada ampliamente en fenómenos donde intervienen corrientes variables, tal como en el caso de la autoinducción.

A continuación se analizará esta condición, mediante el cálculo de cada una de las contribuciones al campo magnético: el movimiento con velocidad \mathbf{v} y con aceleración \mathbf{a} de una carga puntual. Consideremos para ello una carga q , perteneciente a la corriente, con movimiento rectilíneo, con velocidad \mathbf{v} , y aceleración \mathbf{a} , como se muestra en la Figura 4. ver abajo

En el punto P se pueden calcular dos componentes del campo magnético: uno vinculado con la velocidad (la que tiene en cuenta la ley de Ampère) y otro con la aceleración de la carga. Este último corresponde a la OEM irradiada. Las mismas se pueden obtener con las expresiones (6) (Sears et al, 1988, P.706) y (7) (Eisberg et al, 1994, P.771).

$$B_v = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{qv \sin \theta}{r^2} \quad (6)$$

$$B_a = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{qa \sin \theta}{cr} \quad (7)$$

Ambos componentes tienen dirección y sentido coincidentes. Dividiendo miembro a miembro la (6) y la (7) se obtiene la relación entre ellas:

$$\frac{B_a}{B_v} = \frac{ar}{cv} \quad (8)$$

La presencia de la velocidad de la luz en el denominador nos habla ya de la pequeñez del campo de la OEM frente al campo magnético de la ley de Ampère, para pequeños valores de la aceleración y distancia r . La ecuación (8) muestra que el campo de la OEM disminuye más lentamente con la distancia que el campo de Ampère, lo cual no es de ninguna manera sorprendente.

Para tener una idea cuantitativa de la expresión anterior, se puede considerar que la carga q forma parte de una corriente alterna de frecuencia angular ω . Se puede demostrar fácilmente que la relación entre la aceleración y la velocidad de la carga es igual al cociente entre la derivada temporal y el valor de la intensidad de corriente. De aquí se deduce que:

$$\frac{B_a}{B_v} = \frac{\omega r}{c} = \frac{2\pi f r}{c} \quad (9)$$

Para una corriente alterna domiciliaria, de 50 Hz , a una distancia de 10 cm , la relación entre B_a y B_v es de $3,14 \cdot 10^{-7}$, lo cual hace despreciable al campo de la OEM. Para una corriente alterna de 1 Mz , a la misma distancia, la relación es de $6,28 \cdot 10^{-3}$. Para esta última frecuencia, a 10 m de distancia, la relación es de 6,28 veces. De modo que a bajas frecuencias, del orden de los Hz o los kHz , la ley de Ampère puede utilizarse para calcular el campo magnético como función del tiempo. En cambio, a frecuencias muy altas (orden de los MHz) y a grandes distancias no resulta aplicable en su forma clásica.

La expresión (9) puede tener una utilidad práctica para el estudio de los campos eléctricos y magnéticos provenientes de diversas fuentes. Es así que en las líneas de transmisión de energía eléctrica (de 50 o 60 Hz), el campo magnético de la OEM se puede despreciar, con lo cual también se desprecia su campo eléctrico asociado. De modo que los campos magnéticos y eléctricos de una línea de este tipo pueden tratarse como cuasi estáticos y totalmente separables entre sí. Esta situación no se verifica en el caso de las radiaciones producidas por las antenas de microondas, en las cuales son mucho más significativos los campos de las OEM, a causa de lo cual los campos magnético y eléctrico resultan inseparables. Estas situaciones son tenidas en cuenta en los diseños tecnológicos y en la evaluación de los riesgos que pudieran significar esos campos para la salud humana.

Conclusiones

La investigación realizada confirma la hipótesis inicial acerca de la limitación que contiene el tratamiento de la ley de Ampère en los textos básicos de electromagnetismo, lo cual estaría generando dificultades conceptuales a los alumnos, en particular cuando intentan utilizarla para resolver cierto tipo de problemas. La complejidad matemática que representa la demostración de la ley de Ampère a partir de la ley de Biot y Savart para el caso general de una espira cerrada con corriente, no justificaría la forma simplificada con que se la está enseñando. En todo caso, lo más correcto sería formular el planteo general, mostrando su resultado, y dejar la demostración matemática para un eventual curso más avanzado.

La simulación computacional presentada podría utilizarse como recurso didáctico para poner en evidencia cuáles son las corrientes que originan el campo magnético que interviene en la ley de Ampère. De manera similar, sin mayores detalles matemáticos, se podría incluir el estudio del grado de validez de la ley para corrientes cuasiestacionarias.

Los resultados de este estudio pueden ser útiles a docentes e investigadores con relación al tratamiento y enseñanza del tema en los primeros cursos de la universidad.

Bibliografía

ALEXANDER, P. A. y KULIKOWICH, J. M. Learning from physics text: a synthesis of recent research. *Journal of Research in Science Teaching*. 31 9: 895-911, 1994.

ALONSO, M. *Física* Tomo 2. Addison-Wesley Iberoamericana. Wilmington, EUA, 1987.

BARDIN, L. *Análisis de contenido*. Akal. Madrid, 1996.

EISBERG, R. Y RESNICK, R. *Física Cuántica*, Ed. Limusa. México, 1994.

GETTYS, W. E., KELLER, F. J. y SKOVE, M. J. *Física clásica y moderna*. McGraw Hill. España, 1994.

HALLIDAY D., RESNICK, R. y KRANE, K. *Física*. 4ta. ed. Vol 2. CECSA. México, 1996.

MCKELVEY, J. P. & GROATCH, H. *Física para ciencias e ingeniería. Tomo II*. Harla. México 1981.

REITZ, J.R., MILFORD, F.J. & CHRISTY, R. *Foundations of Electromagnetic Theory*. USA. Addison-Wesley Iberoamericana, 1986.

RODRÍGUEZ TRELLES, F. *Temas de electricidad y magnetismo*. Eudeba. Buenos Aires, 1984.

SERWAY, R. A. F. *Física. Tomo II*. McGraw Hill. México, 1993.

SEARS, F, ZEMANSKY, M, YOUNG, H. *Física*, Addison-Wesley Iberoamericana. Wilmington, EUA, 1988.

TIPLER, P. A. *Física. Tomo II*. Reverté. España, 1978.

WANGSNESS, R. K. *Campos electromagnéticos*. Limusa. México, 1997.

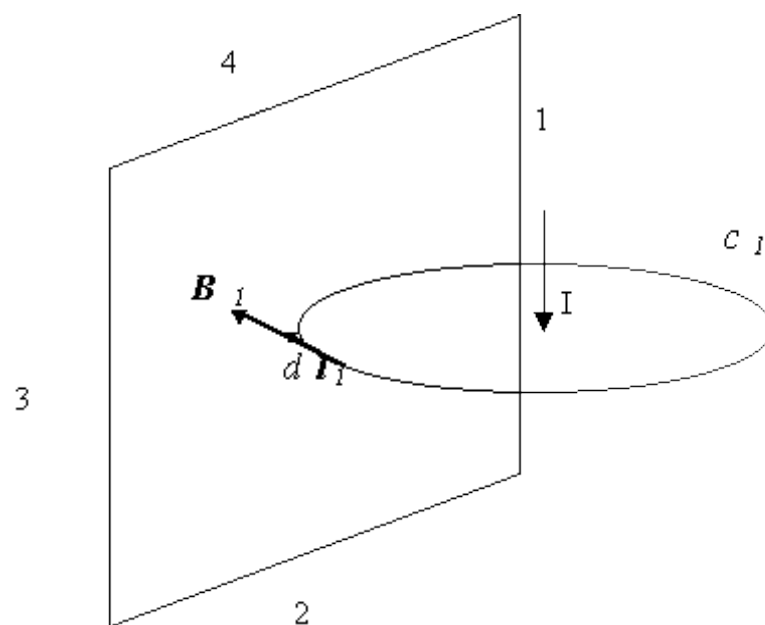


Figura 1: Campo de una espira cuadrada

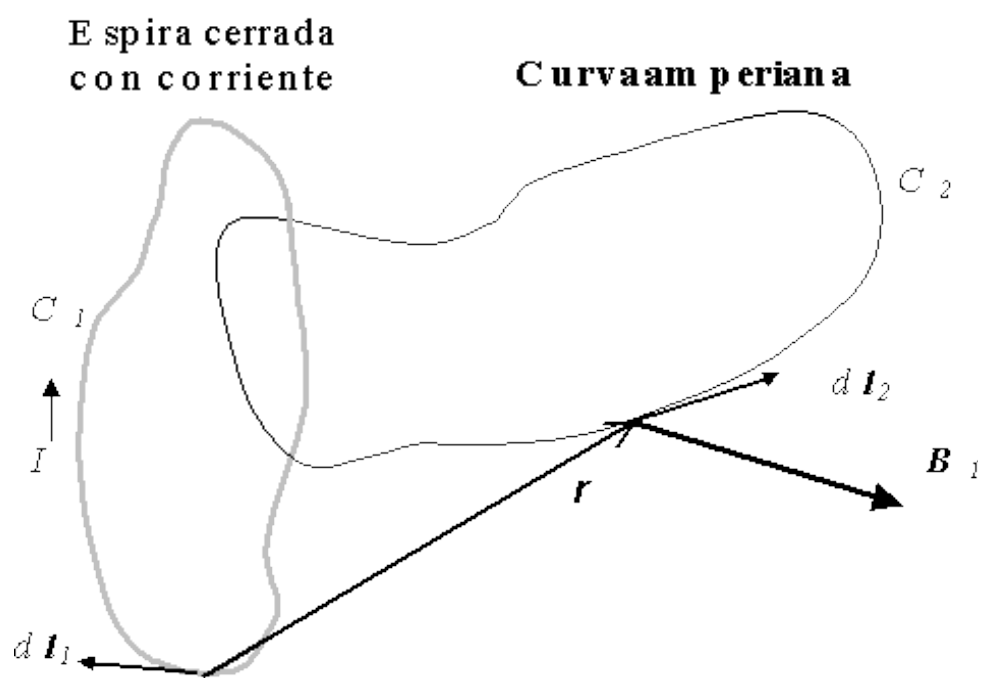


Figura 2: Planteo general de la ley de Ampère

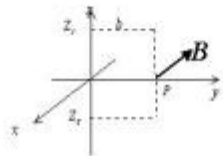
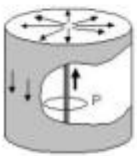


Figura 3: Cable coaxial de longitud finita con corrientes cerrada

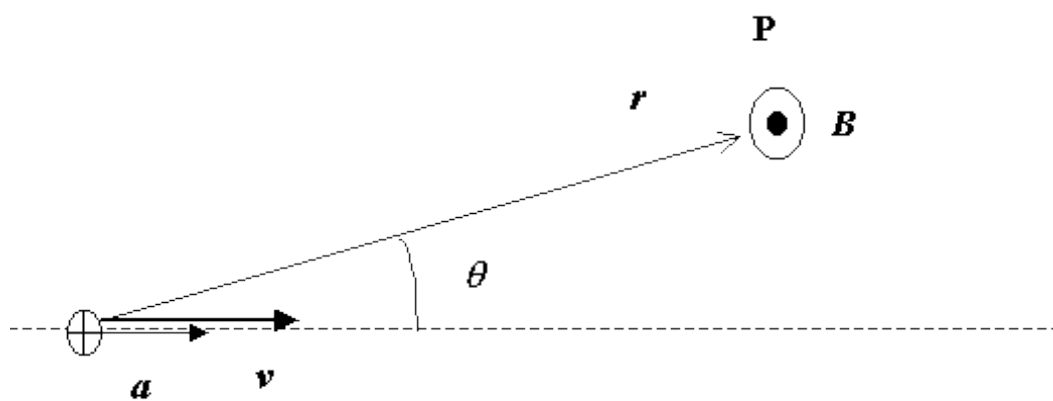


Figura 4: Campo magnético creado por una carga con movimiento rectilíneo