Capítulo 2

Campos de baja frecuencia

2.1. Introducción

Abordamos en este tema el estudio de campos que oscilan a baja frecuencia —también llamados *campos CA* de acuerdo a lo visto en el capítulo anterior—, pero que no forman una onda electromagnética radiada, y los campos estáticos o *campos CC*.

El límite de frecuencias por encima del cual se puede considerar que los campos se manifiestan en forma de OEM es de unos 300 kHz; el límite es impreciso[1] y algunos textos pueden sugerir otros valores. En cualquier caso, en este capítulo estaremos más interesados en la parte inferior de esta banda de frecuencia, que abarca desde CC hasta los 300 Hz y es lo que se conoce como *frecuencias industriales*; por antonomasia, entran dentro de este rango los campos producidos por las líneas de alta tensión, electrodomésticos, etc.

2.2. Objetivos

- Tomar conciencia de la importancia de la electricidad en la sociedad tecnológica
- Familiarizarse con las principales fuentes —naturales y artificiales— de los campos de baja frecuencia

2.3. Campo eléctrico de baja frecuencia: detección y medida

Los campos eléctricos que se dan en circuitos se estiman a partir de medidas de potencial —usando la ecuación 1.15— o a partir de corrientes —con la ecuación 1.20—.

El campo eléctrico ambiental es difícil de medir puesto que, como hemos dicho, cualquier objeto conductor que se pretenda usar como sonda alteraría el campo que se pretende medir; los campos alternos CA son más fáciles a medida que la frecuencia es más alta[2]. Los medidores de campo estático, o *electrómetros*, son dispositivos relativamente costosos (a diferencia de los

[1] Como hemos visto, depende del tamaño del circuito que tenga actividad eléctrica a esas frecuencias.

[2] Para frecuencias suficientemente elevadas se pueden usar dispositivos y técnicas similares a las que se usan para OEM de radiofrecuencia.

que miden campo magnético) muchos de los cuales están basados en la medida de potenciales eléctricos (que es mucho más sencilla) y estimación del campo a partir del potencial (ver ecuación 1.15).

Algunos medidores de campo son capaces de medir las tres componentes del mismo en algún sistema de ejes cartesianos; y todos han de ser capaces de mostrar el valor absoluto de intensidad de campo (el módulo). A veces es más sencillo estimar el campo eléctrico ambiental a partir del conocimiento de los potenciales a que están sometidos los conductores cercanos.

Estimación del campo eléctrico de una línea

Este cálculo realmente ya lo hemos presentado mediante la expresión 1.18 que recordemos es válida para un hilo conductor infinito suspendido sobre tierra, y que nos da el campo en la superficie, según la distancia a la perpendicular del hilo. Sin embargo, nos interesa ahora dar el resultado en función del potencial al que se somete la línea, en lugar de la densidad lineal de carga λ.

Todo objeto conductor sometido a un potencial adquiere carga eléctrica, siendo carga y potencial proporcionales. El factor de proporcionalidad[3] depende de la geometría; para un hilo cilíndrico de radio a, suspendido a una altura h de tierra, tenemos que

$$\lambda \simeq 2\pi\varepsilon_o \frac{V}{\ln \frac{2h}{a}}$$

donde V es el potencial al que se somete la línea, que puede ser alterno o continuo. Sustituyendo λ en la expresión 1.18 ésta se transforma en,

$$E = \frac{2V}{\ln \frac{2h}{a}} \frac{h}{h^2 + x^2} \tag{2.1}$$

2.4. Campo magnético de baja frecuencia: detección y medida

El campo magnético variable se puede detectar gracias a la ley de inducción de Faraday: un pequeño circuito hecho de material conductor formando una espira captará la variación de flujo magnético en su interior en forma de f.e.m. que se puede medir con un voltímetro: la amplitud de la f.e.m. inducida. Es necesario que sea pequeño si queremos medir el campo en un punto concreto, de lo contrario el dispositivo nos medirá un valor promedio en todo el área que abarque. Para aumentar la señal, la espira suele ser un bobinado de varias vueltas con lo que el flujo magnético se multiplica. Basta orientar la espira en la dirección deseada para obtener el campo en esa dirección.

También se puede medir el campo mediante una sonda de efecto Hall: establecemos una corriente en un conductor metálico y medimos el potencial transversal a la corriente, que es proporcional al campo eléctrico transversal causado por el efecto Hall (ver pág. 38), que a su vez es proporcional al campo magnético, según la ecuación 1.35. Este método tiene la ventaja de que puede medir tanto el campo magnético estático (p.ej. el campo magnético terrestre) como el alterno, y también capta el campo magnético según una orientación determinada.

[3] Estamos definiendo la *capacidad eléctrica*, $C = Q/V$ y se mide en *faradios* [F].

Las medidas de campo magnético no se ven afectadas por los materiales de que están hechos los detectores, si tenemos la precaución de no usar materiales ferromagnéticos como el hierro o el acero.

2.5. Aplicaciones

La electricidad y el magnetismo aplicados a la ingeniería supusieron la culminación de la Revolución Industrial con el desarrollo de motores y sistemas de iluminación eléctricos. Posteriormente, durante el siglo XX, se desarrollaron otras aplicaciones —radio, televisión, dispositivos de control, computadores, etc— que necesitan de la electricidad para su funcionamiento. Actualmente no se puede concebir la vida en nuestra civilización sin la electricidad

2.5.1. Circuitos CA

Gran parte de las aplicaciones de la electricidad tienen su fundamento en los circuitos eléctricos. Entre éstos, los circuitos de corriente alterna merecen un análisis más extenso porque es la forma de electricidad de nuestros hogares y en la que se basan los dispositivos electrónicos, y porque producen campos que evolucionan con el tiempo.

Electricidad doméstica

Esta descripción se aplica a la forma con que nos llega la electricidad que consumimos habitualmente. La frecuencia de la red[4] es $f_o = 50\,\mathrm{Hz}$. Las tomas de corriente constan de dos terminales: el terminal activo, que está a un potencial alterno igual a la f.e.m. suministrada, y el terminal neutro, que convencionalmente se toma como referencia, además de estar conectado a tierra.

Transporte trifásico

El transporte de la corriente que consumimos desde sus fuentes de producción se realiza mediante largos cables suspendidos de torretas con cables que se les asigna una f.e.m. oscilante tal, que el potencial de cada cable está desfasado con respecto a los otros. El empleo de esta forma de transporte se debe, principalmente, a que la corriente de retorno puede hacerse muy pequeña si todas las fases consumen aproximadamente la misma potencia, como se discute en el apartado 2.6.2; además, sirve de alimentación para los motores trifásicos, que son más eficientes que los motores eléctricos normales.

En muchas circunstancias, se usan cuatro cables[5] para el transporte: uno es el neutro y los otros tres son activos, cada uno de ellos conectado a una fuente de f.e.m. que les proporciona una tensión muy elevada, de igual amplitud y frecuencia para todos —que coincide con la frecuencia de la red doméstica, esto es 50 Hz—, pero cada una desfasada respecto a las demás[6]

[4] En Europa y otros países. En otros, como EEUU, la frecuencia de la red es de 60 Hz.
[5] Lo normal realmente es ver siete cables: el neutro y una pareja por cada fase activa.
[6] Expresado en radianes, $\pm 2\pi/3$.

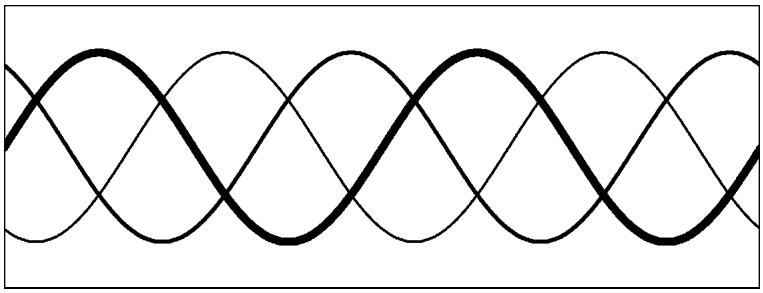

Figura 2.1: Representación de los voltajes en un sistema trifásico, según las fórmulas 2.2.

$\pm 120°$. Esto es,

$$\begin{aligned} V_1(t) &= V_o \cos(\omega_o t) \\ V_2(t) &= V_o \cos\left(\omega_o t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_3(t) &= V_o \cos\left(\omega_o t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \tag{2.2}$$

La frecuencia angular ω_o corresponde a la frecuencia de oscilación de red $f_o = 50\,\mathrm{Hz}$, esto es $\omega_o \simeq 314\,\mathrm{s}^{-1}$. Una representación de los voltajes en un transporte trifásico la podemos ver en la figura 2.1.

Efecto Joule en CA: valor eficaz

Una corriente alterna en un conductor disipa potencia siguiendo la ley de Joule (1.23). Tal y como está formulada, esta expresión nos da la disipación de potencia en un instante, $P(t)$, en función de la corriente en ese mismo instante $I(t)$. Sin embargo, esta información nos es de poca utilidad; es mucho más significativo conocer cuánta potencia disipa **en promedio** el conductor por el que circula una corriente alterna.

$$P = \langle P(t) \rangle = \left\langle I^2(t) \right\rangle R$$

El promedio de una magnitud periódica no es más que su integral a todo un periodo, dividida por el periodo. Teniendo en cuenta que la intensidad sigue la ecuación 1.38, entonces,

$$\left\langle I^2(t) \right\rangle = \frac{I_o^2}{T} \int_0^T \cos^2(\omega t + \varphi)\, dt$$

El resultado de la integral es siempre $T/2$, independientemente de la fase[7], por tanto,

$$\left\langle I^2(t) \right\rangle = \frac{I_o^2}{2}$$

$$P = \frac{1}{2} I_o^2 R$$

[7] Para quien quiera comprobarlo, recuérdese que $T = f^{-1} = 2\pi/\omega$.

Obsérvese que este resultado es también **independiente de la frecuencia** de oscilación. Es habitual expresar este resultado de forma parecida a la que tiene la ecuación 1.23 y para eso se introduce un nuevo parámetro[8], $I_{\text{RMS}} = I_o/\sqrt{2}$, mediante el cual la potencia disipada tiene una forma idéntica a 1.23:

$$P = RI_{\text{RMS}}^2 \tag{2.3}$$

Este parámetro se denomina **valor eficaz** de la corriente.

El concepto de "valor eficaz" puede ser exportado sin penalización a cualquier magnitud oscilante y la forma matemática que hemos calculado se aplica a cualquier función armónica. Dada una función armónica genérica $A(t) = A_o \cos(\omega t + \varphi)$, su valor eficaz o RMS es,

$$A_{\text{RMS}} = \frac{A_o}{\sqrt{2}} \tag{2.4}$$

En particular, podemos aplicar este concepto a la fuerza electromotriz de un generador. De hecho, cuando decimos que "la tensión de la red es de 220 V" estamos diciendo realmente que esos 220 voltios representan la f.e.m. eficaz de que disponemos en un enchufe. Por tanto, la amplitud de la f.e.m. es,

$$\mathcal{E}_o = \sqrt{2}\mathcal{E}_{\text{RMS}} \simeq 1,41 \times 220 \simeq 310\,\text{V}$$

2.5.2. Ley de Faraday en CA

Las corrientes oscilantes armónicas generan campos magnéticos que también oscilan armónicamente, como vimos en la sección 1.6; a su vez, este campo magnético induce f.e.m. al atravesar superficies limitadas por conductores. Es decir, si tenemos un campo magnético de la forma $B_o \cos(\omega t)$ que incide perpendicularmente a una superficie S entonces el flujo magnético es

$$\Phi = SB_o \cos(\omega t)$$

y la f.e.m. inducida a lo largo del circuito que limita la superficie es, aplicando la Ley de Faraday 1.37,

$$\mathcal{E}^{\text{ind}}(t) = \omega SB_o \,\text{sen}(\omega t)$$

es decir, que cuanto mayor es la frecuencia, mayor es la f.e.m. inducida. Igualmente, la corriente que produce esa f.e.m. es también oscilante armónica.

Veamos ahora algunas consecuencias/aplicaciones de la Ley de Faraday, especialmente en su vinculación a circuitos CA.

Corrientes de Foucault

Se denominan así[9] las corrientes que son inducidas por un campo magnético variable en la masa de un conductor. En este caso, cualquier camino cerrado dentro del conductor define una superficie, a través de la cual se establece el flujo de campo magnético oscilante; como estamos en el seno de un conductor, se crean corrientes eléctricas.

[8] Valor cuadrático medio (del inglés *root mean square*).
[9] También se denominan *corrientes de remolino* o, en inglés, *eddy currents*.

Podemos analizar el problema en términos de campos. Supongamos que tenemos un campo magnético armónico y homogéneo que incide perpendicularmente en una superficie conductora; entonces las líneas de los campos eléctricos inducidos forman círculos concéntricos, donde la intensidad de campo va aumentando respecto al centro según la expresión,

$$E_o^{\text{ind}} = \frac{\omega B_o r}{2} \tag{2.5}$$

donde r es el radio del círculo escogido. Si la conductividad del medio es γ, entonces por la ley de Ohm (1.20) tenemos que la amplitud de las corrientes inducidas es,

$$J_o^{\text{ind}} = \frac{\gamma\omega B_o r}{2} \tag{2.6}$$

Estas expresiones son sólo aproximaciones, que no tienen en cuenta que las propias corrientes inducidas también producen campo y flujo magnético que modifican el flujo original, produciendo a su vez unas corrientes inducidas ligeramente distintas a la que nos da la ecuación 2.6. Si la conductividad del medio o la frecuencia de oscilación son bajas entonces las aproximaciones funcionan razonablemente bien.

Si nos fijamos en la expresión 2.6 veremos las principales características de las corrientes inducidas por un campo magnético alterno:

- Además de la conductividad, las corrientes inducidas dependen de la frecuencia: a **mayor frecuencia**, **mayor intensidad de corriente**.
- El otro factor importante es el radio r de la zona de influencia del campo magnético: cuanto mayor es éste, mayor es la corriente.

Ley de Joule en corrientes inducidas Las corrientes inducidas son corrientes verdaderas, en todos los sentidos. También presentan efecto Joule, esto es, calentamiento, de acuerdo con la ley de Joule (1.25 y 1.23). Esta es la base de las cocinas y hornos de inducción: se genera un fuerte campo magnético variable que induce en los fondos de los cazos y ollas corrientes elevadas que producen calor; el material en el que reposan es vitrocerámico que es aislante y por tanto no se calienta por la acción del campo variable.

Efecto diamagnético de las corrientes inducidas Ya hemos comentado que las corrientes inducidas producen su propio flujo magnético que se ha de tener en cuenta en la ecuación de la ley de Faraday (1.37); ya vimos también que este nuevo flujo magnético se opone al cambio de flujo que está teniendo lugar, con lo que el resultado es que las corrientes inducidas son más pequeñas de lo señalado en la ecuación 2.6. Pero otra consecuencia es que el campo magnético total —el aplicado más el producido por las corrientes de inducción— **disminuye** en relación al campo aplicado. Esto lo podemos interpretar como una cierta permeabilidad relativa del medio, μ_r' en presencia de un campo magnético alterno (ver ec. 1.33), de forma tal que $\mu_r' < 1$. De forma aproximada, podemos decir que:

$$\frac{B_{int}}{B_{ext}} = \mu_r' \simeq \frac{1}{\sqrt{1 + (r^2\omega\gamma\mu_o)^2}} \tag{2.7}$$

lo que significa que el efecto diamagnético se nota más con materiales muy buenos conductores y frecuencias elevadas. En definitiva, los buenos conductores suponen una pantalla parcial a los campos magnéticos alternos, que es más eficaz cuanto mayor sea la frecuencia de oscilación.

Transformador

Una aplicación directa de la ley de inducción de Faraday es el dispositivo denominado *transformador eléctrico* cuya función es cambiar la f.e.m. de un generador a otra, generalmente más pequeña. Consiste en dos circuitos llamados *primario* y *secundario*. El circuito primario contiene un generador de f.e.m. $\mathcal{E}_1$ que se conecta a un bobinado de N_1 vueltas; el circuito secundario consiste en un bobinado de N_2 vueltas dispuesto de tal forma que todo el flujo magnético del bobinado primario atraviese el bobinado secundario[10]. Aplicando la ley de Faraday y otras consideraciones para el cálculo de campos con esa geometría el resultado es que se induce una f.e.m. en el circuito secundario, cuyo valor viene dado por la sencilla expresión,

$$\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_1 \frac{N_2}{N_1} \tag{2.8}$$

que es independiente de la frecuencia. Por supuesto, esta fórmula responde a un transformador ideal, sin pérdidas de flujo magnético y sin pérdidas de potencia en el circuito primario. Además, la afirmación de que es "independiente de la frecuencia" es engañosa porque incita a pensar que el transformador también actúa en circuitos CC, lo que no es cierto; es condición fundamental para la existencia de f.e.m. en el secundario que exista una f.e.m. variable en el primario.

Otra forma de "conducir" el flujo magnético desde el primario hasta el secundario es mediante un núcleo formado de material ferromagnético, que ya hemos visto que tienen una elevada permeabilidad magnética, lo cual permite confinar el flujo magnético dentro del material de manera parecida a cómo confinan los conductores la corriente eléctrica. De esta manera se consiguen minimizar las pérdidas de flujo magnético y flexibilizar el diseño del dispositivo. En la figura 2.2 se pueden ver dos ejemplos de transformadores con núcleo ferromagnético.

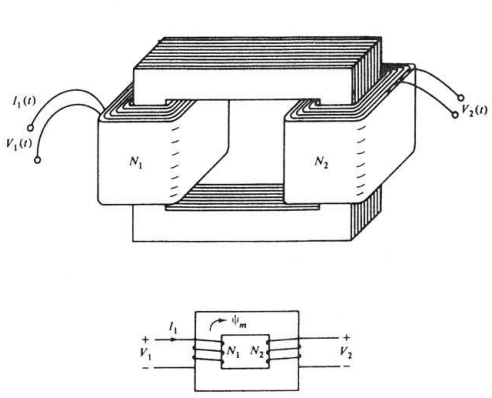

Figura 2.2: Dos representaciones de un mismo transformador cuyos bobinados primario y secundario están enlazados por un núcleo ferromagnético. En la figura inferior el flujo magnético está representado por Ψ_m.

Los transformadores se usan para reducir los altos voltajes de las líneas de transporte eléctrico —que pueden alcanzar 400 kV— hasta voltajes de uso industrial (como el ferrocarril, que usa 25 kV) y los ordinarios 220 V del consumo doméstico. También se usan como paso previo de

[10] Por ejemplo, superponiendo ambos bobinados; aunque hay otras formas como veremos más adelante.

reducción antes de rectificar el voltaje CA de los enchufes en voltaje CC (desde $1,5\,\mathrm{V}$ hasta $24\,\mathrm{V}$) para aparatos electrónicos y pequeños electrodomésticos.

Esta facilidad de la corriente alterna para transformar a voluntad la f.e.m. generada, hizo que ésta desplazara a la corriente continua como fuente estándar de electricidad doméstica e industrial.

2.6. Fuentes de campos ambientales BF

2.6.1. Fuentes naturales

Campo eléctrico

Las principales fuentes naturales de campo eléctrico estático CC son:

- La propia tierra que, en promedio, acumula algo de carga negativa cedida por las descargas de rayos durante las tormentas eléctricas. El campo que produce esta carga toma un valor aproximado de $100\,\mathrm{V}\cdot\mathrm{m}^{-1}$.
- Las nubes, sobre todo durante las tormentas eléctricas. En tiempo tormentoso el campo eléctrico puede alcanzar valores de $\sim 10^6\,\mathrm{V}\cdot\mathrm{m}^{-1}$.
- La electricidad estática por rozamiento, donde los objetos cargados pueden alcanzar potenciales eléctricos del orden de $\sim 10^4\,\mathrm{V}$.

Respecto a la electricidad por rozamiento ya hemos visto por un lado que la materia se puede ionizar de esta manera y, por otro lado, que el aire es muy mal conductor (ver tabla 1.1). Por tanto, el rozamiento de unos objetos con otros puede cargarlos, sin que el medio que los rodea disponga caminos de descarga. También es el rozamiento el responsable de la electricidad de una nube: los cristales de hielo se frotan entre sí, arrastrados por las corrientes ascendentes en la nube, y aquellos cargados positivamente ocupan posiciones más elevadas, quedando la base de la nube cargada negativamente.

A nivel macroscópico, no hay fuentes naturales de campos eléctricos CA.

Campo magnético

Las principales fuentes naturales de campo magnético estático CC son:

- El campo magnético terrestre, cuyo valor oscila según la latitud entre $30\,\mu\mathrm{T}$ y $70\,\mu\mathrm{T}$.
- Los imanes naturales que producen campos magnéticos en su proximidad de $1 \sim 100\,\mathrm{mT}$.

No hay fuentes naturales de campo magnético oscilante.

2.6.2. Fuentes artificiales

Líneas de transporte eléctrico

Esta es la fuente de campos CA más paradigmática y en la que nos detendremos para analizarla en más detalle. Los campos que producen, según el modelo de hilo infinito, vienen dados por las expresiones 2.1 para el campo eléctrico y 1.31 para el campo magnético. Vemos que en cada caso dependen respectivamente del potencial y la corriente de la línea.

Sin embargo, lo más frecuente es que el transporte se realice mediante varias fases, como explicamos en la página 47. Las fases están dispuestas de forma que la suma de sus potenciales **es nula** en todo momento[11]; esto significa que, visto desde cierta distancia, el conjunto se comporta **como si no estuviera cargado**. Estrictamente lo que ocurre es que los campos que se generan decaen con la distancia de forma más abrupta que la que dan las expresiones referidas. Vamos a estudiar este fenómeno de forma separada para los campos eléctrico y magnético.

Campo eléctrico de un sistema de fases En lugar de describir el campo mediante fórmulas matemáticas, lo haremos gráficamente con un ejemplo concreto. En la figura 2.3 se puede ver el campo eléctrico producido por un sistema trifásico, cuyas fases están separadas 1, 3, y 5 metros entre sí; para comparar, se añade la gráfica del campo producido por una sola fase. Se aprecia cómo el efecto compensatorio de las distintas fases es más acentuado

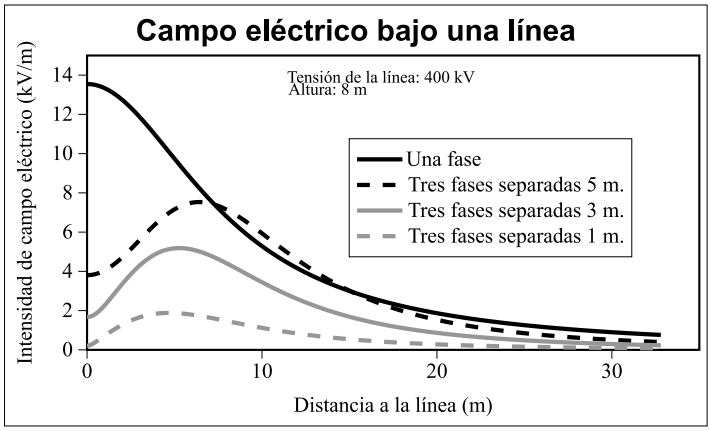

Figura 2.3: Variación del campo eléctrico con la distancia a la vertical de una línea de 400 kV, situada a 8 m de altura. Se dan valores RMS.

cuanto más cerca están unas de otras, y a grandes distancias es casi indistinguible el campo producido por cada disposición de fases; también se aprecia que la tasa de disminución del campo es mayor en los ejemplos trifásicos que con una sola fase.

Campo magnético de un sistema de fases Lo primero que hay que tener en cuenta es que las fases de los voltajes no tienen por qué corresponderse con las fases de las corrientes correspondientes, ni las amplitudes de éstas ser iguales entre sí —condiciones ambas para que

[11] Es fácil comprobar que la suma de las tres ecuaciones 2.2 es 0.

la suma total de las corrientes sea nula—; la corriente depende del consumo que se haga de cada fase en el destino. Sin embargo, lo normal es que haya un equilibrio entre las corrientes[12] y que podamos tomar la suma de todas las corrientes nula. De nuevo recurriremos a la representación gráfica para visualizar el efecto de compensación, aunque esta vez tomaremos un ejemplo más sencillo: sólo dos fases y por cada una circula igual corriente, pero en sentidos opuestos (ver fig. 2.4). Para comparar, se pone el ejemplo de una sola fase. Igual que antes, el efecto de

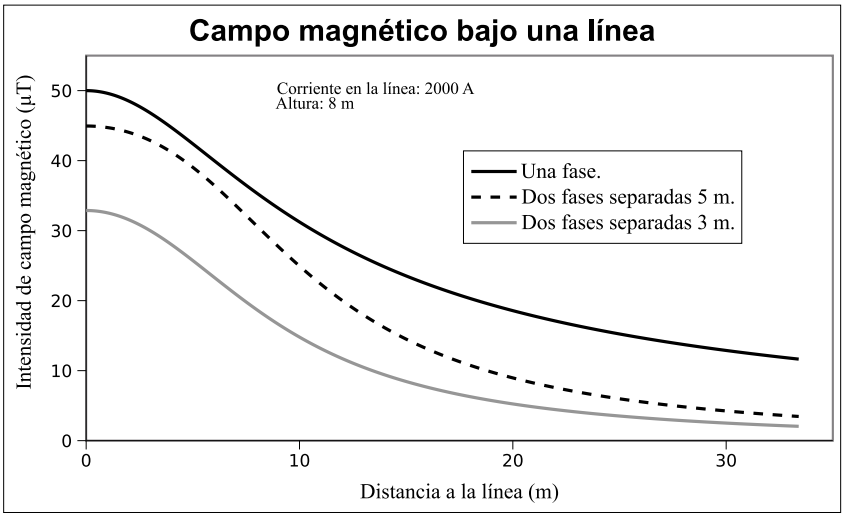

Figura 2.4: Variación del campo magnético con la distancia a la vertical de una línea por la que circulan 2000 A, situada a 8 m de altura. Se dan valores RMS.

compensación es más notable cuanto más cerca están las fases y los campos producidos por éstas son casi indistinguibles a grandes distancias. Y también se aprecia claramente que la tasa disminución del campo es mayor en los ejemplos con dos fases compensadas que con una sola fase.

Otra cuestión que hay que tener en cuenta es que las líneas de más alto voltaje no tienen por qué ser las que transportan corrientes más elevadas. De hecho, generalmente es al revés: las líneas de potenciales más elevados suelen transportar corrientes más pequeñas que las líneas a potenciales más bajos. La razón es justamente las pérdidas por calentamiento en los cables, que es tanto mayor cuanto mayor es la resistencia del mismo y la corriente que circula por él (ver fórmula 1.23); para evitarlas hay que minimizar ambos factores: resistencia del cable y corriente que circula por el mismo.

Para transportar energía eléctrica a grandes distancias, los cables son necesariamente muy largos y, además, hay que fabricarlos muy delgados para ahorrar costes en materiales; con lo cual su resistencia es muy elevada, como se deduce de la fórmula 1.22. Por lo tanto, sólo podemos optimizar el factor intensidad; para disminuir la intensidad que circula por una línea, transportando la misma potencia, hay que incrementar la f.e.m. aplicada a la misma como se deduce de la fórmula 1.24. Por eso, las líneas de transporte a grandes distancias tienen

[12]En algunas disposiciones de cableado, los enganches a la zona de consumo se hacen entre el neutro y cada fase (tres conexiones); si el consumo de las tres conexiones es equilibrado —y por tanto pasa la misma corriente por cada fase— entonces la corriente que circula por el neutro es nula, y se puede diseñar éste para que sea mucho más delgado y ahorrar así material. Por tanto, en estas disposiciones se cuida mucho que las corrientes estén equilibradas.

voltajes elevados y corrientes relativamente pequeñas.

Cuando se distribuye la energía eléctrica a núcleos de población cercanos, los cables son más cortos y se pueden hacer más gruesos, con lo que soportan mayores intensidades de corriente sin sufrir grandes pérdidas por calentamiento; por otra parte, los voltajes de las líneas tienen que ser más reducidos, según van pasando etapas de reducción por distintos transformadores. Por tanto, las líneas de transporte local, con voltajes más pequeños, pueden transportar corrientes elevadas.

Finalmente mencionaremos que hay algunos tramos de electrotrenes cuyas catenarias funcionan con corriente CC de 3 kV; el campo eléctrico producido por una línea de este tipo en su base es aproximadamente de $\sim 250\,\mathrm{V}\cdot\mathrm{m}^{-1}$. Pero el campo magnético puede ser relativamente intenso puesto que la fase neutra son los propios raíles, como vemos en la figura 2.5. El campo en el espacio entre fases es más intenso que el producido por una sola fase, puesto que los campos de una y otra fase se refuerzan en el espacio entre ambas.

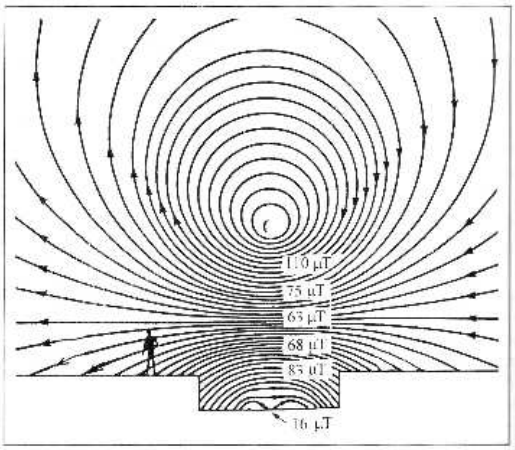

Figura 2.5: Campo magnético CC producido por una catenaria por la que circulan 500 A.

Electricidad doméstica

Los electrodomésticos, dispositivos de uso cotidiano y los cables que transportan la corriente son también fuente de campos eléctricos y magnéticos.

En el caso de los cables, podemos aplicar los mismos razonamientos que en el caso de líneas de transporte de alta tensión, con la diferencia que las corrientes y tensiones son mucho más reducidas, pero también las tenemos más cerca. Los cables producen campo eléctrico sólo con estar conectados al enchufe y sin necesidad de que circule corriente por ellos (véase figura 2.6); no hay efecto de compensación de fases porque sólo hay una fase activa. El campo magnético se produce en los cables de electrodomésticos que estén funcionando (es decir, tiene que pasar corriente por ellos, como muestra la figura 2.6) y sí que hay efecto de compensación de fases distintas, porque el cable neutro siempre transporta la corriente de retorno que es de sentido opuesto a la que circula por el cable activo.

No sólo los cables, sino los distintos elementos que componen los electrodomésticos —especialmente transformadores y motores— producen campos. En general, serán muy pequeños

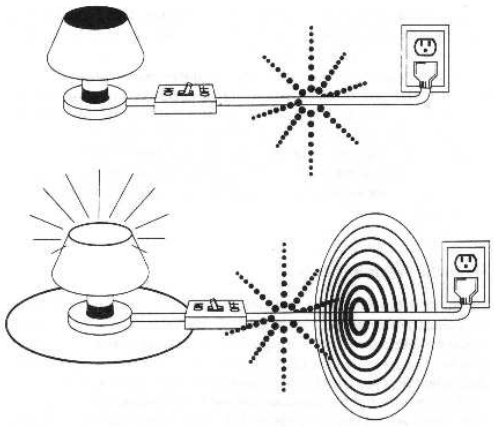

Figura 2.6: Arriba, un dispositivo eléctrico conectado pero apagado sólo produce campo eléctrico. **Abajo**, cuando está en funcionamiento se produce también campo magnético.

y sólo tomaran valores apreciables a muy cortas distancias, decayendo rápidamente. En la figura 2.7 se muestran los campos eléctricos producidos por distintos electrodomésticos (ídem en la figura 2.8 para campos magnéticos).

Vemos que el campo eléctrico más intenso es del orden de $1\,\mathrm{kV}\cdot\mathrm{m}^{-1}$ producido por una manta eléctrica a muy corta distancia. Igualmente, los valores de campo magnético más intensos son poco mayores de 1 mT, producidos por un abrelatas eléctrico a 1 cm de distancia.

Televisores y monitores de tubo de vacío El haz de electrones en un tubo de vacío es la tecnología tradicional de televisores y monitores de cámaras y ordenadores, que está siendo sustituida rápidamente por las pantallas de plasma y TFT. La técnica tradicional consiste en dirigir un haz de electrones mediante campos eléctricos y magnéticos, de forma que incidan en una pantalla fosforescente para producir una imagen. Los campos usados son relativamente débiles y están confinados en el interior del tubo de vacío. Incluso el proceso de barrido del haz, que implica circuitería cuya frecuencia de funcionamiento es del orden de decenas de kHz, apenas produce campos o radiación de esa frecuencia.

Exploración por RMN

La exploración por *resonancia magnética nuclear,* RMN, consiste, en una primera fase, en alinear los dipolos magnéticos nucleares (ver página 35) de los átomos de hidrógeno del material explorado mediante un intenso campo magnético estático de valor $\sim 2\,\mathrm{T}$. Para hacernos una idea de la magnitud de este campo magnético, es necesario saber que el límite tecnológico de producción de campo magnético está en torno a 20 T.

Transformadores

El diseño con núcleos ferromagnéticos produce ciertas pérdidas de flujo magnético. Si estamos hablando de un transformador industrial, donde las corriente de primario son elevadas, estas pérdidas de flujo pueden dar como resultado campos magnéticos relativamente elevados en las cercanías del transformador.

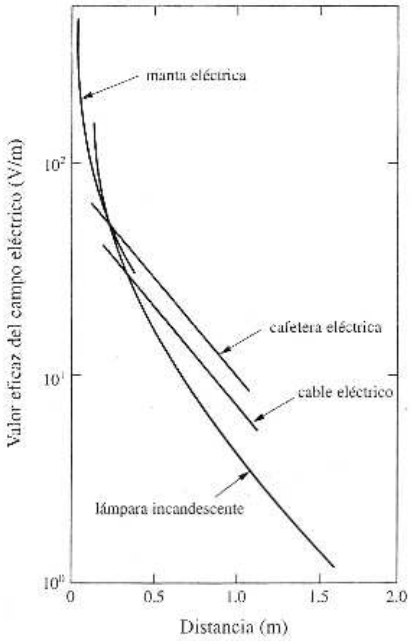

Figura 2.7: Variación de intensidad de campo eléctrico (valores RMS) con la distancia para diversos electrodomésticos.

2.7. Conclusiones

Tras esta detallada exposición de las interacciones entre campos y la materia viva a bajas frecuencias, es necesario recopilar las siguientes conclusiones:

1. El campo magnético estático puede generar campos eléctricos por efecto Hall pero muy débiles. Estas afirmaciones se cumplen tanto para campos ambientales habituales como para aquellos de intensidades extraordinarias.

2. El campo magnético CA induce corrientes de Foucault que tienen una intensidad apreciable para intensidades de campo más elevadas de lo normal. Por tanto, **los campos magnéticos CA** son los que reciben más atención como posible contaminante ambiental.

Autoevaluación

1. Un electrodoméstico se encuentra conectado al enchufe. Los cables producen campos, pero ¿en qué circunstancias?

   a) Producen campos magnéticos y eléctricos siempre.

   b) Producen campos eléctricos siempre, y magnéticos solo cuando se activa el electrodoméstico.

   c) Producen campos eléctricos y magnéticos pero solo cuando se activa el electrodoméstico.

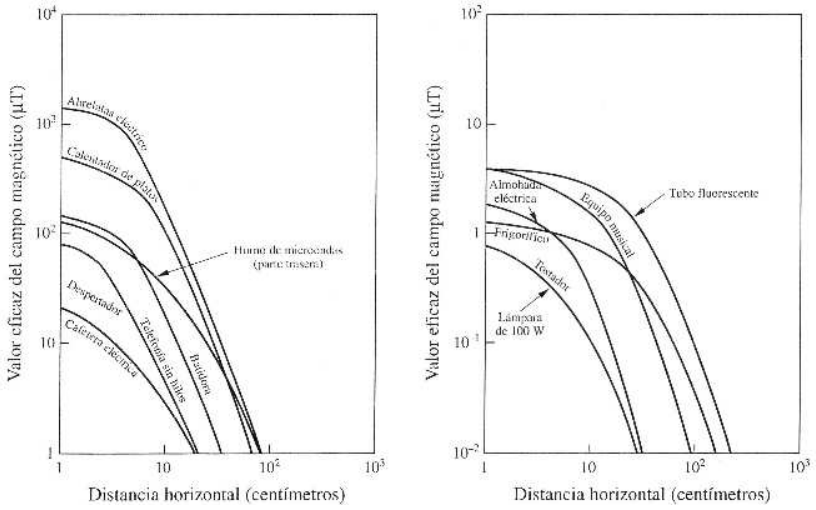

Figura 2.8: Variación de la intensidad de campo magnético con la distancia para diversos electrodomésticos. Los valores de los campos se dan en RMS.

d) Producen campos magnéticos siempre, y eléctricos solo cuando se activa el electrodoméstico.

Soluciones:

1. Un dispositivo eléctrico conectado pero apagado solo produce campo eléctrico, mientras que cuando está en funcionamiento produce campos eléctricos y magnéticos (Respuesta B).