

12

Inducción electromagnética. Síntesis electromagnética

EJERCICIOS PROPUESTOS

- 12.1** Cuando circula una corriente eléctrica constante por un solenoide fijo, próximo a una espira también fija, ¿se induce una corriente eléctrica en la espira? ¿Por qué?

No, porque no hay variación del flujo de campo magnético por el circuito.

- 12.2** Una espira se mueve hacia un solenoide, estando ambos desconectados de toda fuente de electricidad. ¿Se inducirá una corriente eléctrica en la espira? ¿Y en el solenoide? ¿Por qué?

No. Al no circular corriente por el solenoide, no existe ningún campo magnético generado por él. En ausencia de campos magnéticos, no puede manifestarse el fenómeno de la inducción.

- 12.3** Halla el flujo magnético que atraviesa una espira circular de 6 cm de radio situada perpendicular a un campo magnético uniforme de 0,20 T.

La superficie de la espira es:

$$S = \pi R^2 = \pi \cdot 0,06^2 = 3,6\pi \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

El flujo magnético que atraviesa la espira es:

$$\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos 0^\circ = BS \Rightarrow \Phi = 0,20 \cdot 3,6\pi \cdot 10^{-3} = 2,26 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

- 12.4** Calcula el flujo magnético que atraviesa una espira cuadrada de 20 cm de lado, situada en un campo magnético uniforme de 2 T, si el eje de la espira es perpendicular al campo.

Si el eje de la espira es perpendicular al campo, el ángulo α es 90° . Por tanto:

$$\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos 90^\circ = 0$$

- 12.5** Calcula la *fem* inducida en una espira si el flujo que la atraviesa pasa de 0,12 Wb a 0,18 Wb en 0,5 s.

La *fem* calculada como la derivada del flujo de campo magnético es:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{0,18 - 0,12}{0,5} = -0,12 \text{ V}$$

- 12.6** Argumenta qué sentido tiene la corriente inducida que recorre la espira del ejercicio anterior.

El sentido de la corriente inducida se opone a la variación de flujo que la produce. Como hay un aumento de flujo, la corriente inducida circulará en el sentido en que cree un campo que se oponga a esta variación, es decir, que se oponga al campo que genera el flujo.

- 12.7** Calcula la fuerza electromotriz inducida máxima en una bobina compuesta por 200 espiras circulares de 20 cm de diámetro cuando gira en un campo magnético uniforme de 0,2 T con una velocidad angular de 314 rad s^{-1} .

La superficie de cada espira es: $S = \pi R^2 = \pi \cdot 0,10^2 = \pi \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$

La fuerza electromotriz inducida máxima que puede generarse será:

$$\varepsilon_0 = NBS\omega = 200 \cdot 0,2 \cdot \pi \cdot 10^{-2} \cdot 314 = 395 \text{ V}$$

- 12.8** Calcula qué frecuencia de giro, en un campo magnético de 0,25 T, debe tener una bobina formada por 600 espiras circulares de 40 cm de diámetro para generar una fuerza electromotriz máxima de 10 000 V.

La superficie de cada espira es: $S = \pi R^2 = \pi \cdot 0,20^2 = 0,04\pi \text{ m}^2$

La fuerza electromotriz será:

$$\varepsilon_0 = NBS\omega \Rightarrow \omega = \frac{\varepsilon_0}{NBS} = \frac{10\,000}{600 \cdot 0,25 \cdot 0,04\pi} = 531 \text{ rad s}^{-1}$$

La frecuencia de giro será:

$$\omega = 2\pi\nu \Rightarrow \nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{531}{2\pi} = 84,4 \text{ Hz}$$

- 12.9** Busca información sobre el funcionamiento de las centrales eléctricas, en la siguiente dirección:

www.e-sm.net/f2bach48

Después contesta a estas preguntas.

- ¿Por qué las centrales fotovoltaicas no utilizan turbinas ni alternadores?
- ¿Cuál es el voltaje promedio que genera una célula fotovoltaica?
- ¿Qué función tiene el condensador en las centrales eléctricas convencionales y en las nucleares?
 - Porque convierten directamente la energía solar en energía eléctrica.
 - Normalmente se encuentra en el entorno de 0,5 V.
 - Sirve para enfriar el vapor de agua y convertirlo en agua líquida, y así continuar el ciclo de funcionamiento de la central.

- 12.10** Investiga en internet sobre el consumo energético en España:

www.e-sm.net/f2bach49

Después contesta a estas preguntas.

- ¿Qué porcentaje de la energía consumida en España procede de fuentes no renovables?
 - ¿Qué porcentaje de la energía consumida en España procede de la fuente eólica?
 - ¿Cuál es el consumo energético medio de un hogar español en un año?
 - En 2006 fue del 93%, aunque esta cantidad disminuye poco a poco cada año.
 - En 2006 fue del 1,3%.
 - Se consume 1,1 ktep.
- 12.11** Calcula la tensión de salida de un transformador, que tiene 200 vueltas en el primario y 600 en el secundario, al aplicarle a la bobina primaria una tensión alterna de 110 V.

Aplicando la ecuación de los transformadores y sustituyendo, se tiene:

$$V_2 = \frac{n_2}{n_1} V_1 = \frac{600}{200} 110 = 330 \text{ V}$$

- 12.12** ¿Cuál es la relación de vueltas entre el secundario y el primario de un transformador que se utiliza para reducir tensiones de 5000 V a 380 V.

Aplicando la ecuación de los transformadores y sustituyendo, se tiene:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{380}{5000} = 0,076$$

12.13 En un plazo de varias décadas no es posible conseguir que la energía eléctrica consumida provenga en un 50% de fuentes renovables. ¿Por qué?

La energía eléctrica consumida proviene en un porcentaje muy pequeño de fuentes renovables. No es posible a medio plazo sustituir las actuales fuentes no renovables por renovables hasta alcanzar un 50% debido a que las actuales fuentes renovables tienen un coste más elevado que el de las fuentes convencionales.

12.14 Argumenta por qué, aunque aumente el consumo, la potenciación de la producción de energía eléctrica de fuentes renovables reduce la dependencia energética.

La producción de energía eléctrica de fuentes renovables utiliza fuentes autóctonas, con lo que la necesidad de importar energía del exterior se reduce.

12.15 Argumenta si las siguientes afirmaciones son o no correctas.

- a) **Las primeras investigaciones sistemáticas sobre los fenómenos magnéticos se deben a William Gilbert.**
 - b) **Charles Coulomb introdujo el concepto de fuerza eléctrica en el siglo XVIII.**
 - c) **La comunidad científica tardó bastante tiempo en percatarse de la importancia del experimento de Oersted.**
 - d) **El experimento de Oersted tiene una gran importancia por sus aplicaciones tecnológicas.**
- a) Correcta. El primer científico que estudió sistemáticamente los fenómenos eléctricos y magnéticos fue William Gilbert (1544-1603). Este físico inglés precisó con claridad la diferencia entre los fenómenos eléctricos, como la atracción del ámbar, y los fenómenos magnéticos, como la atracción de la magnetita; también introdujo los conceptos de fuerza eléctrica, atracción eléctrica y polo magnético.
- b) No es correcta. El concepto de fuerza eléctrica fue utilizado por Gilbert en el siglo XVI.
- c) No es correcta. A diferencia de otros acontecimientos científicos que tardan tiempo en divulgarse y aceptarse por la comunidad científica, la experiencia de Oersted tuvo un impacto inmediato porque se comprendió claramente que relacionaba dos tipos de fenómenos físicos hasta entonces independientes: los fenómenos eléctricos y los fenómenos magnéticos.
- d) Correcta. La comunidad científica comprendió, acertadamente, que el experimento de Oersted abría un campo con importantes repercusiones tecnológicas.

12.16 Argumenta si las siguientes afirmaciones son o no correctas.

- a) **Las investigaciones sobre el fenómeno de la inducción electromagnética se iniciaron antes del experimento de Oersted.**
 - b) **Las líneas de fuerza para representar el campo fueron ideadas por Joseph Henry.**
 - c) **Faraday propuso que todo campo magnético se debe a corrientes eléctricas.**
 - d) **Las investigaciones de Faraday facilitaron una síntesis unitaria de los fenómenos eléctricos y magnéticos.**
- a) No es correcta. Faraday y Henry iniciaron las investigaciones sobre la inducción electromagnética después del experimento de Oersted.
- b) No es correcta. Fue Faraday quien las propuso.
- c) Es correcto. Faraday propuso que incluso en los imanes naturales el campo magnético se genera por corrientes internas en los materiales.
- d) Es correcto. Las contribuciones de Faraday fueron básicas para el desarrollo del electromagnetismo.

12.17 ¿Por qué se dice que las ecuaciones de Maxwell representan para el electromagnetismo lo que las ecuaciones de Newton representan para la mecánica?

Igual que las leyes de la mecánica se pueden deducir de las ecuaciones de Newton, las leyes del electromagnetismo se pueden deducir de las ecuaciones de Maxwell.

12.18 ¿Qué científicos anteriores a Maxwell habían puesto de manifiesto las relaciones entre la electricidad y el magnetismo?

Entre otros, Oersted, Henry, Faraday, Ampère, Biot y Savart.

12.19 ¿En qué se diferencian las ondas electromagnéticas de las ondas mecánicas? ¿Qué es lo que vibra en una onda electromagnética?

Las ondas electromagnéticas pueden propagarse en el vacío; las ondas mecánicas necesitan un medio material para su propagación.

12.20 Calcula la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas a partir de los valores de la constante dieléctrica del vacío ($\epsilon_0 = 8,9 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$) y de la permitividad magnética del vacío ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$).

La velocidad de la luz será:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8,9 \cdot 10^{-12} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

12.21 Señala las principales aportaciones de Hertz a la teoría electromagnética.

Hertz confirmó las predicciones de Maxwell al producir y detectar por primera vez en el laboratorio ondas electromagnéticas, y reformuló las teorías de Maxwell y llegó a una expresión más clara e inteligible de las mismas.

12.22 Enumera algunas aplicaciones de las ondas electromagnéticas en la vida cotidiana actual.

Radio, televisión, telefonía móvil, hornos de microondas, radar, radiografías, etc.

12.23 Calcula la longitud de onda emitida por una emisora de radio de 106,1 MHz.

Utilizando la ecuación que relaciona la velocidad con la longitud de onda y la frecuencia de una onda, se tiene:

$$\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{106,1 \cdot 10^6} = 2,83 \text{ m}$$

12.24 Calcula la frecuencia de una microonda de 1,5 cm de longitud de onda.

Utilizando la ecuación que relaciona la velocidad con la longitud de onda y la frecuencia de una onda, se tiene:

$$\nu = \frac{v}{\lambda} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{1,5 \cdot 10^{-2}} = 2,0 \cdot 10^{10} \text{ Hz}$$

12.25 Argumenta si las siguientes afirmaciones son correctas o no.

- Las ecuaciones de Maxwell se pueden aplicar a campos que sean constantes con el tiempo.**
 - La ley de Lenz está incluida en las ecuaciones de Maxwell.**
 - La ley de Gauss del magnetismo se basa en la evidencia experimental de la existencia de cargas eléctricas aisladas.**
- a) Correcta. Las ecuaciones de Maxwell no tienen ninguna restricción temporal y se pueden aplicar a campos que sean constantes con el tiempo.
- b) Correcta. Todas las leyes del electromagnetismo, incluida la ley de Lenz, se pueden deducir de las ecuaciones de Maxwell.
- c) No es correcta. La ley de Gauss del magnetismo se basa en la evidencia experimental de que es imposible aislar polos magnéticos.

12.26 Argumenta si las siguientes afirmaciones son correctas o no.

- a) Las ondas electromagnéticas son ondas longitudinales.
 - b) Los vectores \vec{E} y \vec{B} están en fase en una onda electromagnética.
 - c) Los vectores \vec{E} y \vec{B} tienen módulos iguales en una onda electromagnética.
 - d) Los rayos X se propagan a la velocidad de la luz.
- a) No es correcta. Las ondas electromagnéticas son ondas transversales.
 b) Correcta. Los vectores \vec{E} y \vec{B} en una onda electromagnética oscilan siempre en fase.
 c) No es correcta. Tienen unidades diferentes y, además, en unidades del SI el campo magnético es $3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ menor.
 d) Correcta. Todas las ondas electromagnéticas se propagan a la velocidad de la luz.

EJERCICIOS Y PROBLEMAS

LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

12.27 Calcula el flujo magnético a través de una espira de 400 cm^2 de superficie situada en un plano perpendicular a un campo magnético uniforme de $0,2 \text{ T}$.

Si la espira está en un plano perpendicular al campo, el ángulo α es 0° . Por tanto:

$$\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos 0^\circ = BS = 0,2 \cdot 400 \cdot 10^{-4} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

12.28 Un solenoide, de 20 cm de longitud, está formado por 1200 espiras de 6 cm de diámetro por las que circula una corriente eléctrica de 300 mA . Calcula el flujo magnético en el solenoide.

La superficie de cada espira es: $S = \pi R^2 = \pi \cdot 0,03^2 = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

El número de espiras por unidad de longitud es: $n = \frac{N}{L} = \frac{1200}{0,20} = 6000 \text{ espiras} \cdot \text{m}^{-1}$

El campo en el interior del solenoide será: $B = \mu_0 n I = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 6000 \cdot 0,300 = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ T}$

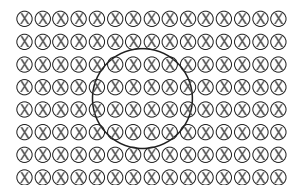
El flujo magnético en el solenoide será: $\Phi = BS = 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot 2,8 \cdot 10^{-3} = 6,4 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$

12.29 Calcula la fuerza electromotriz inducida en una espira si el flujo que la atraviesa disminuye uniformemente $0,05 \text{ Wb}$ cada segundo.

Aplicando la ley de Faraday–Henry, se tiene:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{-0,05}{1} = 0,05 \text{ V}$$

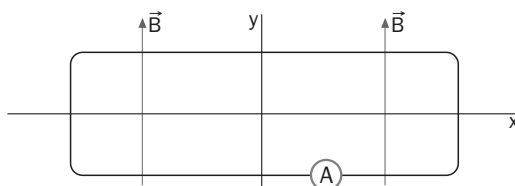
12.30 La espira circular de la figura adjunta está situada en el seno de un campo magnético uniforme.



Explica si existe fuerza electromotriz inducida en los siguientes casos.

- a) La espira se desplaza hacia la derecha.
 - b) El valor del campo magnético aumenta linealmente con el tiempo.
- a) No, porque no varía el flujo que atraviesa la espira.
 b) Al aumentar el valor del campo magnético, aumenta el flujo que atraviesa la espira y, por tanto, se induce una fuerza electromotriz.

12.31 Una espira rectangular está situada en un campo magnético uniforme, representado por las flechas de la figura.



Razona si el amperímetro indicará paso de corriente:

- Si la espira gira alrededor del eje y .
 - Si gira alrededor del eje x .
 - Si se desplazara a lo largo de cualquiera de los dos ejes x o y .
- Como las líneas del campo son paralelas al eje y , no hay variación del flujo magnético que atraviesa la espira y, por tanto, no se induce ninguna corriente. El amperímetro no indicará paso de corriente.
 - Si la espira gira alrededor del eje x , el flujo magnético que la atraviesa varía constantemente, por lo que se inducirá una fuerza electromotriz. El amperímetro indicará paso de corriente.
 - Si la espira se desplazara a lo largo de cualquiera de los dos ejes x o y , el flujo magnético que la atraviesa permanece constante, por lo que no se induce ninguna corriente. El amperímetro no indicará paso de corriente.

12.32 Un anillo conductor se coloca perpendicularmente a un campo magnético uniforme B . ¿En qué caso será mayor la fuerza electromotriz inducida en el anillo?

- Si B disminuye linealmente con el tiempo, pasando de $0,5 \text{ T}$ a 0 T en 1 ms .
- Si B aumenta linealmente con el tiempo, pasando de 1 T a $1,2 \text{ T}$ en 1 ms .

En ambos casos hay que utilizar la ley de Faraday-Henry. Sustituyendo, se tiene:

$$\text{a) } \varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{0 - 0,5}{0,001} = 500 \text{ V}$$

$$\text{b) } \varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{1,2 - 1}{0,001} = -200 \text{ V}$$

Se produce una fuerza electromotriz mayor en el primer caso.

12.33 La distancia entre los extremos de las alas de un avión es 30 m . Halla la fuerza electromotriz inducida entre dichos extremos cuando el avión vuela a una velocidad de $720 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ en un región en la que la componente vertical del campo magnético terrestre es de $4 \cdot 10^{-5} \text{ T}$.

La velocidad del avión es: $v = 720 \text{ km h}^{-1} = 200 \text{ m s}^{-1}$

Si d es la distancia entre los extremos de las alas del avión, la superficie atravesada por ellas en Δt es:

$$S = (v \cdot \Delta t) \cdot d$$

El flujo magnético a través de esa superficie es:

$$\Delta\Phi = (v \cdot \Delta t \cdot d) \cdot B = d \cdot B \cdot v \cdot \Delta t$$

La *fem* inducida es:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{dBv \cdot \Delta t}{\Delta t} = dBv = 30 \cdot (4 \cdot 10^{-5}) \cdot 200 = 0,24 \text{ V}$$

12.34 Diseña una experiencia de laboratorio en la que se produzca una corriente inducida en una bobina. Ten en cuenta que además de producir dicha corriente debes medirla. Explica el fundamento teórico del experimento.

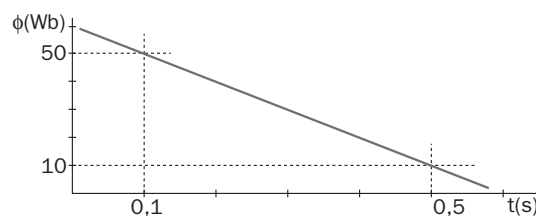
El experimento más sencillo que permite inducir una corriente consiste en acercar y alejar un imán a una bobina de manera que el flujo de campo magnético que atraviesa la espira varía con el tiempo.

Para lograr que la intensidad de corriente sea elevada, no se debería poner ninguna resistencia de corriente en el circuito eléctrico, de manera que la resistencia total del circuito sea la de los conductores empleados.

Para medir la intensidad de corriente, es necesario incluir un amperímetro en el circuito eléctrico al que está conectada la bobina.

Dado que el flujo de campo magnético varía con el tiempo, se inducirá una corriente eléctrica que se podrá medir en el amperímetro.

12.35 En este gráfico se representa la variación del flujo magnético con el tiempo en un circuito.



El valor de la fuerza electromotriz inducida será:

a) 20V; b) 50 V; c) 100 V; d) 500 V.

Elige la respuesta correcta y justificala.

La *fem* inducida será:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{10-50}{0,5-0,1} = 100 \text{ V}$$

Por tanto, la respuesta correcta es la c).

12.36 Una espira de 10 cm^2 de sección está situada en un campo magnético uniforme de 4 T, perpendicular al plano de la espira.

a) ¿Cuánto vale el flujo magnético que la atraviesa?

b) Si el campo magnético disminuye hasta anularse en 0,2 s, ¿cuánto valdrá la *fem* media inducida?

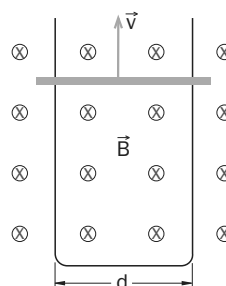
a) El flujo magnético será:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos \alpha = 4 \cdot (10 \cdot 10^{-4}) \cos 0^\circ = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

b) La fuerza electromotriz inducida será:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{0-4 \cdot 10^{-3}}{0,2} = 0,02 \text{ V}$$

12.37 Un alambre conductor se dobla en forma de U , con sus lados separados una distancia $d = 20$ cm. Sobre ellos se apoya una varilla conductora, formando un circuito rectangular por el que puede circular la corriente eléctrica. Existe un campo magnético uniforme de intensidad $B = 0,2$ T perpendicular al plano del circuito y, en la figura, dirigido hacia adentro. La varilla se mueve como indica la figura, con velocidad uniforme de $0,5$ m s^{-1} .



- a) Calcula la *fem* inducida en el circuito.
- b) ¿En qué sentido circula la corriente por la varilla? Razona tu respuesta.
- a) Si d es la distancia entre los lados del alambre conductor, en el tiempo Δt el área barrida será:

$$S = (v \cdot \Delta t) \cdot d$$

El flujo magnético a través de esa superficie es:

$$\Delta\Phi = (v \cdot \Delta t \cdot d) \cdot B = d \cdot B \cdot v \cdot \Delta t$$

La *fem* inducida es:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{dBv \cdot \Delta t}{\Delta t} = -dBv = -0,20 \cdot 0,2 \cdot 0,5 = -0,02 \text{ V}$$

- b) En el sentido contrario al de las agujas del reloj, para compensar la variación de flujo.

12.38 Una bobina circular de 20 espiras y radio 5 cm se coloca en un campo magnético dirigido perpendicularmente al plano de la bobina. El módulo del campo magnético varía con el tiempo de acuerdo con la expresión $B = 0,02t + 0,08t^2$ (t , en segundos; B , en teslas).

Determina:

- a) El flujo magnético que atraviesa la bobina en función del tiempo.
- b) La *fem* inducida en la bobina para $t = 5$ s.
- a) El flujo magnético que atraviesa la bobina es el flujo que atraviesa una espira multiplicado por el número de espiras que tenga la bobina. Por tanto:

$$\Phi = N \vec{B} \cdot \vec{S}$$

Sustituyendo los valores, y teniendo en cuenta que el ángulo entre la espira y el campo magnético es de 90° , se tiene:

$$\Phi = N \vec{B} \cdot \vec{S} = NBS \cos \alpha = 20 \cdot (0,02t + 0,08t^2) \cdot (\pi \cdot 0,05^2) \cos 0^\circ$$

$$\Phi = (3,14t + 12,6t^2) \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

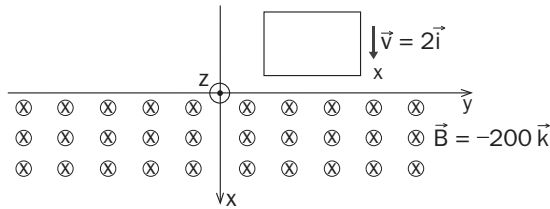
- b) La *fem* inducida es:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -(3,14 + 25,2t) \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

Sustituyendo los valores para $t = 5$ s, se tiene:

$$\varepsilon = -(3,14 + 25,2 \cdot 5) \cdot 10^{-3} = -0,13 \text{ V}$$

12.39 Una espira cuadrada de 5 cm de lado, situada en el plano XY, se desplaza con velocidad $\vec{v} = 2\vec{i}$ (cm s⁻¹), penetrando en el instante $t = 0$ s en una región del espacio en donde hay un campo magnético uniforme $\vec{B} = -200\vec{k}$ (mT), según se indica en la figura.



a) Determina la fuerza electromotriz inducida y represéntala gráficamente en función del tiempo.

b) Calcula la intensidad de la corriente en la espira si su resistencia es de 10 Ω.

a) El vector superficie, perpendicular al plano de la espira, tiene la dirección del eje z: $\vec{S} = S\vec{k}$

Para $t < 0$, la espira no ha penetrado aún en el campo magnético; por tanto, el flujo magnético que la atraviesa es cero y, en consecuencia, no se induce ninguna fuerza electromotriz en ella:

$$\varepsilon = 0$$

El tiempo que tarda la espira en introducirse completamente en el campo magnético es, siendo L el lado de la espira: $t = \frac{L}{v} = \frac{0,05}{0,02} = 2,5$ s

Para los valores de t comprendidos entre 0 y 2,5 s, la parte de superficie de la espira que se ha introducido en el campo es: $S = d L = v t L = 0,02 t \cdot 0,05 = 10^{-3} t$.

El flujo magnético es: $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = -200 \cdot 10^{-3} \vec{k} \cdot 10^{-3} t \vec{k} = -2 \cdot 10^{-4} t$ Wb

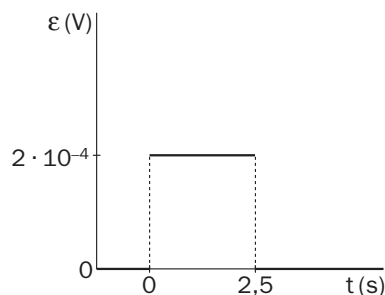
La fem inducida es:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ V}$$

Para $t > 2,5$ s, la espira se desplaza por el campo magnético de modo que el flujo magnético que la atraviesa es constante y, en consecuencia, no se induce ninguna fuerza electromotriz en ella:

$$\varepsilon = 0$$

La correspondiente representación gráfica es:



b) Para $t < 0$, al no inducirse ninguna fuerza electromotriz en la espira, la intensidad de la corriente en ella es cero: $I = 0$.

Para los valores de t comprendidos entre 0 y 2,5 s, la intensidad es: $I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{10} = 2 \cdot 10^{-5}$ A

Para $t > 2,5$ s, al no inducirse ninguna fuerza electromotriz en la espira, la intensidad de la corriente en ella es nula: $I = 0$.

12.40 Contesta a las siguientes preguntas.

- a) ¿Por qué se producen corrientes inducidas cuando se abre o se cierra un circuito?
- b) ¿De qué factores depende el coeficiente de autoinducción de una bobina?
- a) El campo magnético debido a la corriente eléctrica varía bruscamente al abrir o cerrar un circuito. Ello supone una brusca variación del flujo magnético y, en consecuencia, la aparición de corrientes inducidas.
- b) La permeabilidad magnética, el número de espiras, la superficie de las espiras y la longitud de la bobina.

12.41 Una bobina compuesta por 50 espiras circulares de 8 cm de diámetro se encuentra en un campo magnético que varía con el tiempo según la expresión $B = 0,2t^2$ (T). El plano de cada espira forma un ángulo de 30° con la dirección del campo magnético. Halla:

- a) El flujo magnético a través de la bobina.
- b) La expresión en función del tiempo de la intensidad de corriente que circula por la bobina, que tiene una resistencia eléctrica de $0,2 \Omega$.
- c) El valor de la intensidad en el instante $t = 5$ s.

a) La superficie de cada espira es: $S = \pi R^2 = \pi \cdot 0,04^2 = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

Si el plano de cada espira forma un ángulo de 30° con la dirección del campo magnético, el vector superficie y el campo forman un ángulo de 60° . El flujo magnético que atraviesa la bobina será:

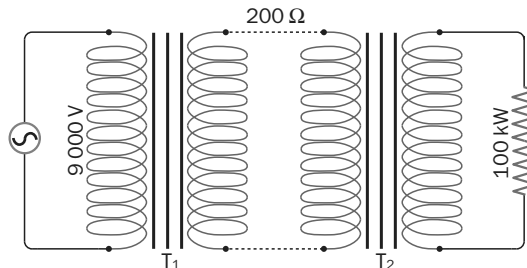
$$\Phi = N\vec{B} \cdot \vec{S} = NBS \cos \alpha = 50 \cdot 0,2t^2 \cdot 5,0 \cdot 10^{-3} \cos 60^\circ = 2,5 \cdot 10^{-2} t^2 \text{ Wb}$$

La fem inducida es: $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -5,0 \cdot 10^{-2} t \text{ V}$

- b) La corriente inducida es, en valor absoluto: $I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{5,0 \cdot 10^{-2} t}{0,2} = 0,25t \text{ A}$
- c) El valor de la intensidad en el instante $t = 5$ s será: $I = 0,25 \cdot 5 = 1,25 \text{ A}$

PRODUCCIÓN, TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

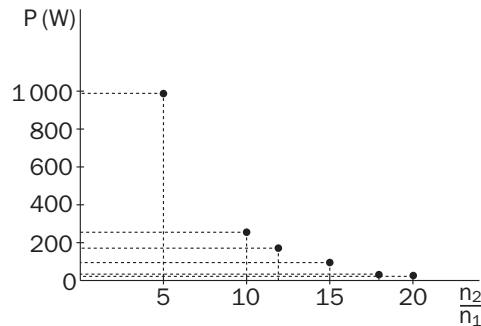
12.42 En el circuito de la figura se representan: un generador de corriente alterna de 9000 V, una estación transformadora (T_1) próxima al generador, conductores muy largos de 200Ω de resistencia que conectan la estación transformadora T_1 con una segunda estación transformadora (T_2) y un conjunto de aparatos eléctricos conectados a T_2 que consumen globalmente 100 kW. La relación de espiras n_2/n_1 en T_1 es 5.



Calcula:

- a) El voltaje de salida de T_1 .
- b) Si la potencia de salida de T_1 debe ser 100 kW, ¿cuál es la intensidad de la corriente en el secundario de T_1 ?
- c) ¿Qué potencia se pierde por disipación calorífica en los conductores de transmisión?
- d) Repite los cálculos anteriores para los casos en que la relación de espiras n_2/n_1 de la estación transformadora T_1 sea 10, 12, 15, 18 y 20.
- e) Traza la gráfica que representa las pérdidas de potencia por disipación calorífica en la línea de transmisión en función de la relación de espiras n_2/n_1 .
- f) ¿Por qué se transporta la energía eléctrica a alta tensión?
- g) ¿Qué inconvenientes habría para utilizar transformadores con una relación n_2/n_1 muy elevada (por ejemplo, 1000)?

- a) El voltaje de salida será: $V_2 = V_1 \frac{n_2}{n_1} = 9000 \cdot 5 = 45\,000\text{ V} = 45\text{ kV}$
- b) $I_2 = \frac{P}{V_2} = \frac{100\,000}{45\,000} = 2,22\text{ A}$
- c) $P' = RI^2 = 200 \cdot 2,22^2 = 986\text{ W}$
- d) Para 10: 247 W; para 12: 171 W; para 15: 110 W; para 18: 76 W; para 20: 62 W.
- e) La gráfica empleando los datos anteriores sería:



- f) A medida que aumenta la tensión de salida, las pérdidas en la línea de transmisión disminuyen.
- g) La tensión de salida sería tan elevada que podría dañar el transformador y las instalaciones de la central.

12.43 Un transformador de 2,5 kW tiene 400 vueltas en el primario y 40 en el secundario. Se aplica al primario una corriente alterna de 2200 V. Calcula:

- a) La tensión de salida en el secundario.
- b) La intensidad de la corriente en el primario.
- c) La intensidad de la corriente en el secundario.

- a) El voltaje de salida es: $V_2 = V_1 \frac{n_2}{n_1} = 2200 \frac{40}{400} = 220\text{ V}$
- b) La intensidad de corriente en el primario es: $I_1 = \frac{P}{V_1} = \frac{2500}{2200} = 1,14\text{ A}$
- c) Suponiendo que no hay pérdidas energéticas en el transformador, la potencia de salida es igual que la potencia de entrada, por lo tanto: $I_2 = \frac{P}{V_2} = \frac{2500}{220} = 11,4\text{ A}$

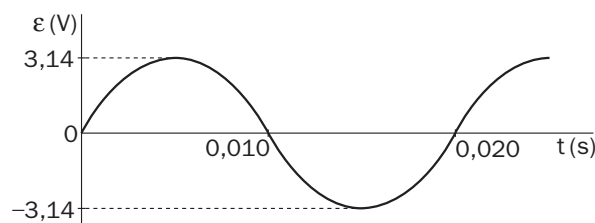
12.44 Un espira conductora cuadrada de lado $L = 10\text{ cm}$ se hace girar en torno al eje, indicado en la figura, con velocidad angular constante $\omega = 100\pi\text{ rad s}^{-1}$. Existe un campo magnético uniforme $B = 0,1\text{ T}$ perpendicular a dicho eje.

Determina, en función del tiempo, el flujo magnético que atraviesa la espira y la fem inducida. Haz una representación gráfica de esta última dependencia, $\varepsilon(t)$.

Supón que en el instante inicial, $t = 0\text{ s}$, el plano de la espira es perpendicular a B .

El flujo que atraviesa a la espira es: $\Phi = BS \cos \alpha = BL^2 \cos \omega t = 0,1 \cdot 0,01 \cos 100\pi t = 0,001 \cos 100\pi t\text{ Wb}$

La fem inducida será: $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = 0,1\pi \sin 100\pi t = 3,14 \sin 314 t$



12.45 Una bobina compuesta por 600 espiras circulares de 30 cm de diámetro gira en un campo magnético uniforme de 0,3 T. Calcula:

- a) La velocidad a la que debe girar la bobina para producir una *fem* que tenga un valor máximo de 220 V.
- b) La expresión de la *fem* inducida en función del tiempo.
- a) El flujo magnético que atraviesa la bobina es 600 veces el flujo que atraviesa una espira:

$$\Phi = NBS \cos \alpha = NBS \cos \omega t$$

La *fem* inducida será:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = NBS\omega \sin \omega t$$

La *fem* máxima será:

$$\varepsilon_{\max} = NBS\omega$$

Por tanto, despejando la frecuencia, se tiene:

$$\omega = \frac{\varepsilon_{\max}}{NBS} = \frac{220}{600 \cdot 0,3 \cdot \pi \cdot 0,15^2} = 17,3 \text{ rad s}^{-1}$$

- b) La *fem* inducida será:

$$\varepsilon = NBS\omega \sin \omega t = \varepsilon_{\max} \sin \omega t = 220 \sin 17,3t$$

12.46 Un transformador tiene 200 espiras en el primario y 900 en el secundario. Se conecta una resistencia de 2 k Ω a los bornes de salida del transformador. Calcula qué intensidad de corriente máxima circula por la resistencia cuando se aplica al primario del transformador una fuerza electromotriz sinusoidal con un valor máximo de 220 V.

La diferencia de potencial será: $V_2 = V_1 \frac{n_2}{n_1} = 220 \cdot \frac{900}{200} = 990 \text{ V}$

La intensidad que circula por el circuito será: $I = \frac{V_2}{R} = \frac{990}{2000} = 0,495 \text{ A}$

12.47 Busca información sobre las centrales eléctricas en la siguiente dirección:

www.e-sm.net/f2bach50

y a continuación describe detalladamente el funcionamiento de una central de gas de ciclo combinado.

En las centrales de ciclo combinado se queman gases que se hacen pasar por una turbina de gas para generar electricidad y, mientras que en las centrales tradicionales no se empleaban estos gases, en las de ciclo combinado se aprovechan para calentar una caldera de la que se extrae vapor que también se utilizará para generar electricidad. Por tanto, se emplean dos fuentes de energía: gases a alta temperatura en turbinas de gas y vapor de agua en turbinas de vapor. Esto proporciona a las centrales de ciclo combinado una muy alta eficiencia.

12.48 Investiga sobre el impacto ambiental de la distribución de la energía eléctrica en la página:

www.e-sm.net/f2bach51

¿Qué sectores se ven más afectados por el tendido de las líneas eléctricas de alta tensión? ¿Qué medidas pueden tomarse para aminorar el impacto ambiental?

Los más afectados son el patrimonio histórico, agua, fauna, vegetación y el medio socioeconómico en general. Para aminorar el impacto ambiental se puede mejorar el trazado y el emplazamiento de las líneas y evitar, en lo posible, las zonas más sensibles.

SÍNTESIS ELECTROMAGNÉTICA

12.49 La síntesis electromagnética de Maxwell es uno de los mayores logros de la historia de la Física, pero no habría sido posible sin el trabajo de otros científicos precedentes. Señala qué investigaciones científicas contribuyeron a la síntesis electromagnética.

Hans Christian Oersted demostró experimentalmente en 1820 los efectos de una corriente eléctrica sobre una aguja imantada. Apenas un mes después del experimento de Oersted, los físicos franceses Jean Baptiste Biot y Félix Savart investigaron el campo magnético producido por un conducto rectilíneo. Muchos científicos se incorporaron a los estudios sobre las relaciones entre la electricidad y el magnetismo. André Marie Ampère sugirió que los efectos magnéticos se debían siempre a corrientes eléctricas y postuló que la acción de un imán se podría explicar a partir de corrientes eléctricas en el seno de las sustancias magnéticas.

A partir de 1822, Michael Faraday desarrolló sus investigaciones sobre electricidad y magnetismo. Recopiló los trabajos sobre las relaciones entre fenómenos eléctricos y magnéticos de científicos precedentes e inició a partir de ellos sus investigaciones. Finalmente, en 1831, descubrió el fenómeno de la inducción electromagnética.

12.50 Señala cuales de las siguientes aplicaciones tecnológicas se basan en los experimentos de Hertz.

- | | |
|-------------------------|---------------------|
| a) Alternador. | b) Motor eléctrico. |
| c) Radar. | d) Radio. |
| e) Telefonía fija. | f) Telefonía móvil. |
| g) Telégrafo por cable. | h) Televisión. |

Se emplea en el radar (c), radio (d), telefonía móvil (f) y televisión (h).

12.51 Hertz detectó en uno de sus experimentos que la longitud de la onda electromagnética utilizada era de 60 cm. Calcula la frecuencia de oscilación del circuito eléctrico oscilante utilizado por Hertz en ese experimento.

Empleando la relación que hay entre frecuencia y longitud de onda, se tiene:

$$v = \frac{c}{\lambda} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{0,60} = 5,0 \cdot 10^8 \text{ Hz} = 500 \text{ MHz}$$

12.52 Argumenta si las siguientes afirmaciones son correctas o no.

- Oersted demostró experimentalmente que un campo magnético puede generar una corriente eléctrica inducida.
 - Faraday fue el primero en comprobar que la corriente eléctrica produce un campo magnético.
 - Las ecuaciones de Maxwell incluyen la ley de Coulomb.
 - Los trabajos de Maxwell permitieron unificar la teoría de la gravitación y la teoría electromagnética.
 - Faraday predijo la existencia de las ondas electromagnéticas.
 - Las ondas electromagnéticas corresponden a la propagación de campos eléctricos y magnéticos variables.
 - Las investigaciones de Hertz no tienen interés desde el punto de vista práctico.
- No es correcta. Oersted demostró experimentalmente que una corriente eléctrica puede generar un campo magnético.
 - No es correcta. Oersted fue el primero en comprobar que la corriente eléctrica produce un campo magnético.
 - Correcta. Las ecuaciones de Maxwell incluyen todas las leyes de la electricidad y el magnetismo.
 - No es correcta. Los trabajos de Maxwell no abordaron la teoría de la gravitación
 - No es correcta. Fue Maxwell quien predijo la existencia de las ondas electromagnéticas.
 - Correcta. Las ondas electromagnéticas consisten en la propagación de campos eléctricos y magnéticos variables.
 - No es correcta. Sus investigaciones abrieron un importantísimo campo tecnológico: la producción, emisión y recepción de las ondas electromagnéticas, con su impacto en los procesos de comunicación a distancia. De este modo, a finales del siglo XIX, se inició la era de las telecomunicaciones.

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

12.53 Calcula la frecuencia de los rayos X de 0,12 nm de longitud de onda.

Utilizando la relación entre la longitud de onda y la frecuencia, se tiene:

$$v = \frac{c}{\lambda} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{0,12 \cdot 10^{-9}} = 2,5 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$$

12.54 Identifica qué tipo de radiación es una onda electromagnética cuya frecuencia es:

- a) 10^6 Hz b) 10^{12} Hz c) 10^{18} Hz
a) Ondas de radio. b) Radiación infrarroja. c) Rayos X.

12.55 La frecuencia mínima para que una célula fotoeléctrica se active es $6,8 \cdot 10^{14}$ Hz.

- a) Calcula la longitud de onda máxima para la cual se activa la célula.
b) ¿Qué colores de la luz visible pueden activar esta célula?
a) La longitud de onda máxima para la cual se activa la célula corresponde a la frecuencia mínima:

$$\lambda = \frac{c}{v} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{6,8 \cdot 10^{14}} = 4,4 \cdot 10^{-7} = 440 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 440 \text{ nm}$$

- b) La luz de color violeta podrá activarla.

12.56 Determina las longitudes de onda típicas de las ondas medias (frecuencias del orden de 800 kHz) y de las ondas de frecuencia modulada (100 MHz).

$$\text{Ondas medias: } \lambda = \frac{c}{v} = \frac{3 \cdot 10^8}{800 \cdot 10^3} = 375 \text{ m}$$

$$\text{Ondas de frecuencia modulada: } \lambda = \frac{c}{v} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{100 \cdot 10^6} = 3,00 \text{ m}$$

12.57 Si un teléfono móvil emite ondas electromagnéticas en la banda 1700 – 1900 MHz, ¿cuál es la longitud de onda más corta emitida?

La longitud de onda más corta corresponde a la frecuencia máxima:

$$\lambda = \frac{c}{v} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{1900 \cdot 10^6} = 0,16 \text{ m} = 16 \text{ cm}$$

12.58 Explica por qué la exposición a los rayos X es muy peligrosa y, en cambio, no hay riesgo en exponerse a las ondas de radio.

Los rayos X tienen frecuencias muy elevadas, por lo que son muy energéticas y pueden destruir células vivas. En cambio, las ondas de radio tienen longitudes de onda muy largas y, por tanto, frecuencias bajas y menor intensidad energética.

12.59 En la década de 1970, la nave Apolo fijó en la superficie lunar emisores de láser para medir con precisión la distancia entre la Tierra y la Luna. Un rayo láser lanzado desde la superficie de la Luna tardó 2,56 s en retornar al aparato emisor después de reflejarse en la superficie terrestre. Calcula la distancia entre ambos astros.

La distancia recorrida por el rayo láser es el doble de la distancia d entre la Tierra y la Luna:

$$2d = ct \Rightarrow d = \frac{1}{2} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \cdot 2,56 = 3,84 \cdot 10^8 \text{ m}$$

12.60 Calcula el valor de la longitud de onda asociada a un fotón de energía 3 keV.

Datos. $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$, $1 \text{ eV} = 1,609 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

$$E = 3 \text{ keV} = 3 \cdot 10^3 \cdot 1,609 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 4,83 \cdot 10^{-16} \text{ J}$$

$$\text{Frecuencia del fotón: } \nu = \frac{E}{h} = \frac{4,83 \cdot 10^{-16}}{6,62 \cdot 10^{-34}} = 7,3 \cdot 10^{17} \text{ Hz}$$

$$\text{Longitud de onda del fotón: } \lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^8}{7,3 \cdot 10^{17}} = 4,11 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

12.61 Calcula la energía, expresada en MeV, de un fotón de rayos gamma de $2 \cdot 10^{-13} \text{ m}$ de longitud de onda.

La frecuencia del fotón será:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^{-13}} = 1,5 \cdot 10^{21} \text{ Hz}$$

La energía del fotón es:

$$E = h\nu = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 1,5 \cdot 10^{21} = 9,95 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

En MeV su energía será:

$$E = \frac{9,95 \cdot 10^{-13} \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} = 6,2 \cdot 10^6 \text{ eV} = 6,2 \text{ MeV}$$

12.62 Si el campo eléctrico de una onda electromagnética viene expresado por el vector $\vec{E} = E_0 \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{z}{\lambda} \right) (\vec{i} + \vec{j})$, indica, justificando la respuesta, en qué dirección oscila el campo magnético.

La dirección de propagación es perpendicular al vector intensidad del campo eléctrico; por lo tanto, es la dirección del eje z. El vector campo magnético tiene también dirección perpendicular a la de propagación, por lo tanto es perpendicular al eje z. En consecuencia, el vector campo magnético oscila en el plano XY:

$$\vec{B} = B_x \vec{i} + B_y \vec{j}$$

Además, el vector campo magnético es perpendicular al vector campo eléctrico, es decir, es perpendicular a $(\vec{i} + \vec{j})$. Por tanto:

$$\vec{B} \cdot \vec{E} = 0 \Rightarrow (B_x \vec{i} + B_y \vec{j}) \cdot (\vec{i} + \vec{j}) = 0 \Rightarrow B_x + B_y = 0 \Rightarrow \vec{B} = B_x \vec{i} - B_x \vec{j}$$

El campo magnético oscila en la dirección $(\vec{i} - \vec{j})$.

12.63 Un radar emite una radioonda que tarda 3 μs en volver al aparato detector después de reflejarse en un obstáculo. Calcula la distancia entre el obstáculo y el radar.

La distancia recorrida es el doble de la distancia entre el obstáculo y el radar:

$$2d = ct \Rightarrow d = \frac{1}{2} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 450 \text{ m}$$

PROBLEMA DE SÍNTESIS

12.64 Los fotones procedentes del Sol, que tienen una longitud de onda comprendida entre 160 y 240 nm, dan lugar en la alta atmósfera a la reacción: $O_2 + \text{fotón} \rightarrow 2O$. Determina:

- a) El intervalo de frecuencias de estos fotones.
- b) El tipo de ondas electromagnéticas.
- c) Su intervalo de energías expresadas en eV.

Los átomos de oxígeno se combinan con moléculas de oxígeno y forman ozono: $O + O_2 \rightarrow O_3$. Los fotones solares con una longitud de onda comprendida entre 240 y 360 nm descomponen el ozono: $O_3 + \text{fotón} \rightarrow O + O_2$. Determina:

- d) El intervalo de frecuencias de estos fotones.
- e) El tipo de ondas electromagnéticas.
- f) Su intervalo de energías expresadas en eV.

La radiación ultravioleta y los rayos X solares inducen reacciones de ionización a unos 80 km de altura, en la zona denominada ionosfera.

Por ejemplo, los fotones de 505 Å dan lugar a la ionización de los átomos de helio:

$He + \text{fotón} \rightarrow 2He^+$. Determina:

- g) La frecuencia de estos fotones.
- h) El tipo de ondas electromagnéticas.
- i) Su energía expresada en eV.

Argumenta por qué:

- j) Casi toda la radiación ultravioleta solar es detenida por la atmósfera.
- k) Cuando se liberan a la atmósfera productos químicos, como los clorofluocarbonos, que se combinan con el ozono, aumenta la cantidad de rayos ultravioleta que llegan a la superficie.

$$a) \quad v_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{160 \cdot 10^{-9}} = 1,88 \cdot 10^{15} \text{ Hz}; \quad v_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{240 \cdot 10^{-9}} = 1,25 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

b) Rayos ultravioleta.

$$c) \quad E_1 = hv_1 = 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 1,88 \cdot 10^{15} = 12,4 \cdot 10^{-19} \text{ J} \Rightarrow E_1 = \frac{12,4 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} = 7,8 \text{ eV}$$

$$E_2 = hv_2 = 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 1,25 \cdot 10^{15} = 8,28 \cdot 10^{-19} \text{ J} \Rightarrow E_2 = \frac{8,28 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} = 5,2 \text{ eV}$$

$$d) \quad v_3 = \frac{c}{\lambda_3} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{240 \cdot 10^{-9}} = 1,25 \cdot 10^{15} \text{ Hz}; \quad v_4 = \frac{c}{\lambda_4} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{360 \cdot 10^{-9}} = 0,83 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

e) Rayos ultravioleta.

$$f) \quad E_3 = hv_3 = 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 1,25 \cdot 10^{15} = 8,28 \cdot 10^{-19} \text{ J} \Rightarrow E_3 = \frac{8,28 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} = 5,2 \text{ eV}$$

$$E_4 = hv_4 = 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 0,83 \cdot 10^{15} = 5,49 \cdot 10^{-19} \text{ J} \Rightarrow E_4 = \frac{5,49 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} = 3,4 \text{ eV}$$

$$g) \quad v = \frac{c}{\lambda} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{505 \cdot 10^{-10}} = 5,94 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

h) Rayos ultravioleta.

$$i) \quad E = hv = 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 5,94 \cdot 10^{15} = 39,3 \cdot 10^{-19} \text{ J} \Rightarrow E = \frac{39,3 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} = 24,6 \text{ eV}$$

j) Los rayos ultravioletas de diversas frecuencias son absorbidos por los gases presentes en la atmósfera en diferentes reacciones químicas.

k) Estos compuestos reaccionan con el ozono y disminuyen la cantidad de esta sustancia en la atmósfera; se interrumpen así las reacciones químicas en las que se absorben los fotones ultravioleta, que, entonces, llegan en mayor número a la superficie terrestre.