

## CAMPO GRAVITATORIO

**Modelo 2018. Pregunta 1B.-** Sea un sistema doble formado por una estrella y un planeta. El planeta gira alrededor de la estrella siguiendo una órbita circular con un periodo de 210 días y posee una masa de  $5 \cdot 10^{-6}M$ , donde  $M$  es la masa de la estrella. Determine:

- El radio de la órbita del planeta.
- El vector campo gravitatorio total en un punto entre la estrella y el planeta que dista  $4,6 \cdot 10^5$  km del centro del planeta.

Dato: Constante de Gravitación Universal,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ ; Masa de la estrella  $1,3 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ .

**Solución.**

a. El planeta orbita en torno a la estrella en una órbita circular con movimiento uniforme, por lo que la suma de todas las fuerzas que concurren sobre el planeta deberán ser igual a la fuerza centrípeta que le hace girar.

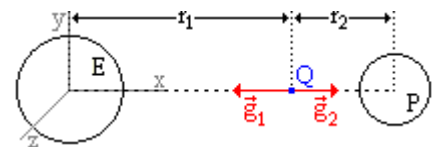
$$\sum \vec{F} = \vec{F}_c$$

Si se supone que la única fuerza que actúa sobre el planeta es la debida al campo gravitatorio de la estrella, el sumatorio de fuerzas en módulo queda la siguiente forma:

$$G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \quad v^2 = \frac{GM}{r} \quad \left\{ \begin{array}{l} v = \omega \cdot r \\ \omega = \frac{2\pi}{T} \end{array} \right. \rightarrow \frac{4\pi^2 r^2}{T^2} = \frac{GM}{r} \quad \frac{r^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{GM T^2}{4\pi^2}} = \sqrt[3]{\frac{6,67 \times 10^{-11} \cdot 1,3 \times 10^{30} \cdot (210 \cdot 24 \cdot 3600)^2}{4\pi^2}} = 8,98 \times 10^{10} \text{ m}$$

b. Si consideramos a la estrella situada en el centro de coordenadas y al centro del planeta situado en el punto  $(8,98 \times 10^{10}, 0, 0)$ , nos piden calcular la intensidad del campo gravitatorio en el punto Q.



La intensidad de campo gravitatorio debida a una masa  $M$  a una distancia  $r$  viene expresada por:

$$\vec{g} = -G \frac{M}{r^2} \vec{u}_r$$

Donde el signo negativo indica el sentido de la intensidad gravitatoria (dirigida hacia la masa), y  $\vec{u}_r$  es un vector unitario en la dirección que une el centro de la masa con el punto (radial).

$$\vec{g} = \vec{g}_1 + \vec{g}_2 = -G \frac{M_E}{r_1^2} \vec{i} + G \frac{M_P}{r_2^2} \vec{i}$$

$$r_1 = D - r_2 = 8,98 \cdot 10^{10} - 4,6 \cdot 10^8 = 8,934 \cdot 10^{10}$$

$$M_P = 5 \cdot 10^{-6} \cdot M_E = 5 \times 10^{-6} \cdot 1,3 \cdot 10^{30} = 6,5 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

$$\vec{g} = -6,67 \cdot 10^{-11} \frac{1,3 \cdot 10^{30}}{(8,934 \cdot 10^{10})^2} \vec{i} + 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{6,5 \cdot 10^{24}}{(4,6 \cdot 10^8)^2} \vec{i} = -8,81 \cdot 10^{-3} \vec{i} \frac{\text{N}}{\text{kg}}$$

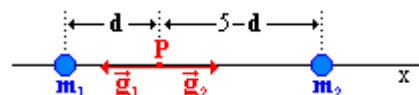
**Modelo 2018. Pregunta 1A.-** Dos partículas puntuales de masas  $m_1 = 2 \text{ kg}$  y  $m_2 = 10 \text{ kg}$  se encuentran situadas a lo largo del eje X. La masa  $m_1$  está en el origen,  $x_1 = 0$ , y la masa  $m_2$  en el punto  $x_2 = 5 \text{ m}$ .

- Determine el punto en el eje X en el que el campo gravitatorio debido a ambas masas es nulo.
- ¿Cuál es el potencial gravitatorio debido a ambas masas en el punto para el que el campo gravitatorio es cero?

Dato: Constante de Gravitación Universal,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ .

**Solución.**

a. La intensidad de campo gravitatorio viene expresada por:



$$\vec{g} = -G \frac{m}{r^2} \vec{u}_r$$

Donde  $\vec{u}_r$  representa el vector unitario en la dirección radial y el signo negativo indica que esta dirigido hacia la masa, por lo tanto, el único punto donde se anule el campo gravitatorio creado por dos masas puntuales será un punto situado entre las masas y en la línea que las une, como se representa en la figura adjunta.

Por el principio de superposición:

$$\vec{g}_1 + \vec{g}_2 = 0$$

$$-G \frac{m_1}{d^2} \vec{i} + G \frac{m_2}{(5-d)^2} \vec{i} = 0$$

Operando se obtiene el valor de d

$$G \frac{m_1}{d^2} \vec{i} = G \frac{m_2}{(5-d)^2} \vec{i} \quad \frac{m_1}{d^2} = \frac{m_2}{(5-d)^2} \quad \frac{(5-d)^2}{d^2} = \frac{m_2}{m_1} \quad \frac{5-d}{d} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}$$

$$d = \frac{5}{1 + \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}} = \frac{5}{1 + \sqrt{\frac{10}{2}}} = 1,54 \text{ m}$$

**b.** El potencial en un punto de un campo gravitatorio creado por una masa puntual es la energía potencial por unidad de masa en ese punto, viene expresado por:

$$U = -G \frac{m}{r}$$

Para una disposición de masas puntuales, el potencial gravitatorio sigue el principio de superposición.

$$U = U(m_1) + U(m_2) = -G \frac{m_1}{d} + \left( -G \frac{m_2}{5-d} \right) = -G \left( \frac{m_1}{d} + \frac{m_2}{5-d} \right) = -6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \left( \frac{2}{1,54} + \frac{10}{5-1,54} \right) = -2,79 \cdot 10^{-10} \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

### Septiembre 2017. Pregunta 1B.-

- a) A partir de la ley fundamental de la dinámica, deduzca la expresión de la velocidad orbital de un satélite que gira en una órbita circular de radio R alrededor de un planeta de masa M.
- b) Si un satélite de 21 kg gira alrededor del planeta Marte, calcule el radio de la órbita circular y la energía mecánica del satélite si su periodo es igual al de rotación del planeta.

Datos: Masa de Marte,  $M_{\text{Marte}} = 6,42 \cdot 10^{23}$  kg; Periodo de revolución del planeta,  $T_{\text{Marte}} = 24,62$  h; Constante de Gravitación Universal,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  N m<sup>2</sup> kg<sup>-2</sup>.

#### Solución.

**a.** Si el satélite describe una órbita circular con movimiento uniforme, se debe cumplir que la suma de fuerzas que actúan sobre él, deberán ser igual a la fuerza centrípeta.

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_{\text{centrípeta}} = m \cdot \vec{a}_c$$

La única fuerza que actúa sobre el satélite es la gravitatoria que genera el planeta, pasando a módulo:

$$G \frac{M \cdot m}{r^2} = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad v^2 = G \frac{M}{r} \quad v = \sqrt{G \frac{M}{r}}$$

**b.** De la expresión del apartado anterior se puede despejar el radio:

$$r = \frac{GM}{v^2} : \left\{ \begin{array}{l} v = \omega \cdot r \\ \omega = \frac{2\pi}{T} \end{array} \right\} : r = \frac{GM}{\left( \frac{2\pi}{T} \cdot r \right)^2}$$

Ordenando se obtiene la tercera Ley de Kepler:  $r^3 = T^2 \cdot \frac{GM}{4\pi^2}$

$$r = \sqrt[3]{T^2 \cdot \frac{GM}{4\pi^2}} = \sqrt[3]{(24,62 \cdot 3600)^2 \cdot \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 6,42 \cdot 10^{23}}{4\pi^2}} \approx 2,04 \cdot 10^7 \text{ m} = 20\,400 \text{ Km}$$

La energía mecánica de satélite es la suma de su energía cinética y potencial.

$$E_M = E_c + E_p = \frac{1}{2}mv^2 + \left(-G \frac{Mm}{r}\right) = \left\{v^2 = G \frac{M}{r}\right\} = \frac{1}{2}G \frac{Mm}{r} - G \frac{Mm}{r} = -\frac{1}{2}G \frac{Mm}{r}$$

$$E_M = -\frac{1}{2} \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{6,42 \cdot 10^{23} \cdot 21}{2,04 \cdot 10^7} = -2,2 \cdot 10^7 \text{ J}$$

### Septiembre 2017. Pregunta 1A.-

- a) Aplicando el principio de conservación de la energía mecánica, obtenga una expresión para la velocidad de escape de un cuerpo desde la superficie de un planeta esférico de radio R y masa M.
- b) Calcule la velocidad de escape desde la superficie de Mercurio sabiendo que posee una masa de  $3,30 \cdot 10^{23} \text{ kg}$  y una aceleración de la gravedad en su superficie de  $3,70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

Dato: Constante de Gravitación Universal,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ .

#### Solución.

a. Considerando que el campo gravitatorio es conservativo, la energía mecánica en la superficie del planeta será la misma que en el infinito.

$$E_{\text{Mecánica}}(\text{Superficie}) = E_{\text{Mecánica}}(\text{Infinito})$$

Teóricamente, se supone que se llega con velocidad nula, y como la distancia es infinita, la energía mecánica en el infinito es nula

$$E_c(\text{Superficie}) + E_p(\text{Superficie}) = \underbrace{E_c(\text{Infinito})}_0 + \underbrace{E_p(\text{Infinito})}_0$$

porque  $v=0$                       porque  $r=\infty$

Si se denomina como  $v_e$  a la velocidad de escape, velocidad que deberá tener el cuerpo en la superficie del planeta:

$$\frac{1}{2}mv_e^2 + \left(-G \frac{M \cdot m}{R}\right) = 0$$

Expresión que permite despejar la velocidad en función de la masa del asteroide y de su radio.

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

b. Para calcular la velocidad de escape desde la superficie de Mercurio necesitamos conocer el radio del planeta, el cual se puede calcular a partir de la intensidad de campo gravitatorio en su superficie.

El peso de un cuerpo es la fuerza con que el planeta lo atrae, aplicado a la superficie de Mercurio:

$$\vec{F}_G = \vec{P} \xrightarrow{\text{módulo}} G \frac{Mm}{R^2} = mg \quad g = G \frac{M}{R^2} \quad R = \sqrt{G \frac{M}{g}}$$

$$R = \sqrt{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{3,30 \cdot 10^{23}}{3,70}} = 2,44 \cdot 10^6 \text{ m}$$

Conocido el radio se calcula la velocidad de escape:

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 3,30 \cdot 10^{23}}{2,44 \cdot 10^6}} = 4248 \text{ m/s}$$

**Junio 2017. Pregunta 1B.-** Una reciente investigación ha descubierto un planeta similar a la Tierra orbitando alrededor de la estrella Próxima Centauri, una enana roja cuya masa es un 12% de la masa del Sol y su radio es el 14% del radio solar. Mediante técnicas de desplazamiento Doppler se ha medido el periodo del planeta alrededor de la estrella obteniéndose un valor de 11,2 días. Determine:

- a) La aceleración de la gravedad sobre la superficie de la estrella.
- b) El radio de la órbita del planeta suponiendo ésta circular.

Datos: Constante de Gravitación Universal,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ ; Masa del Sol,  $M_S = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ ; Radio del Sol,  $R_S = 7 \cdot 10^8 \text{ m}$ .

**Solución.**

a. Para calcular el valor de la intensidad gravitatoria en la superficie de la estrella, se iguala la fuerza gravitacional a la que se vería sometido un cuerpo situado en su superficie con su peso.

$$\vec{F}_G = \vec{P} \xrightarrow{\text{módulo}} G \frac{Mm}{R^2} = mg \quad g = G \frac{M}{R^2}$$

Donde M y R son la masa y el radio de la estrella.

Teniendo en cuenta la relación entre los parámetros de la estrella (radio y masa) con los del Sol:

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{12}{100} M_S = 0,12 M_S \\ R &= \frac{14}{100} R_S = 0,14 R_S \end{aligned} \right\} : g = G \frac{0,12 M_S}{(0,14 R_S)^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{0,12 \cdot 1,99 \cdot 10^{30}}{(0,14 \cdot 7 \cdot 10^8)^2} = 1658,47 \text{ m/s}^2$$

b. El planeta órbita alrededor de la estrella con un movimiento circular uniforme, por lo tanto la suma de todas la fuerza que actúen sobre el deberá ser igual a la fuerza centrípeta.

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_c$$

Si se tiene en cuenta que sobre el planeta la única fuerza que actúa es la fuerza de atracción gravitacional que ejerce la estrella, y trabajando en módulo:

$$G \frac{Mm}{r^2} = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad \text{simplificando } v^2 = G \frac{M}{r}$$

Donde M es la masa de la estrella y r es el radio de la órbita del planeta. La velocidad lineal se puede expresar en función del radio de la órbita y de la velocidad angular, la cual a su vez la podemos expresar en función del periodo del planeta alrededor de la estrella, lo nos permite llegar a una relación entre el periodo y el radio.

$$\left. \begin{aligned} v^2 &= G \frac{M}{r} \\ v &= \omega \cdot r \end{aligned} \right\} : \omega^2 \cdot r^2 = G \frac{M}{r} \xrightarrow{\omega = \frac{2\pi}{T}} \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot r^2 = G \frac{M}{r}$$

$$r^3 = \frac{GM}{4\pi^2} \cdot T^2 \quad ; \quad r = \sqrt[3]{\frac{GM}{4\pi^2} \cdot T^2} = \sqrt[3]{\frac{G \cdot 0,12 M_S}{4\pi^2} \cdot T^2}$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 0,12 \cdot 1,99 \cdot 10^{30}}{4\pi^2} \times (11,2 \cdot 24 \cdot 3600)^2} = 7,23 \cdot 10^9 \text{ m}$$

**Junio 2017. Pregunta 1A.-** Un asteroide de forma esférica y radio 3 km tiene una densidad de 3 g cm<sup>-3</sup>. Determine:

- a) La velocidad de escape desde la superficie de dicho asteroide.
- b) La velocidad de un cuerpo a una altura de 1 km sobre la superficie del asteroide si partió de su superficie a la velocidad de escape.

Dato: Constante de Gravitación Universal,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

**Solución.**

a. Considerando que el campo gravitatorio es conservativo, la energía mecánica en la superficie del asteroide será la misma que en el infinito.

$$E_{\text{Mecánica}}(\text{Superficie}) = E_{\text{Mecánica}}(\text{Infinito})$$

Teóricamente, se supone que se llega con velocidad nula, y como la distancia es infinita, la energía mecánica en el infinito es nula

$$E_c(\text{Superficie}) + E_p(\text{Superficie}) = \underbrace{E_c(\text{Infinito})}_0 + \underbrace{E_p(\text{Infinito})}_0$$

porque  $v=0$                       porque  $r=\infty$

Si se denomina como  $v_e$  a la velocidad de escape, velocidad que deberá tener el cuerpo en la superficie del asteroide:

$$\frac{1}{2}mv_e^2 + \left(-G \frac{M \cdot m}{R}\right) = 0$$

Expresión que permite despejar la velocidad en función de la masa del asteroide y de su radio.

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

La masa del asteroide se puede expresar en función de su densidad y volumen.

$$d = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} \Rightarrow M = \frac{4}{3}\pi d \cdot R^3$$

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{\frac{2G \frac{4}{3}\pi d \cdot R^3}{R}} = \sqrt{\frac{8}{3}\pi G \cdot d \cdot R^2} = \sqrt{\frac{8}{3}\pi 6,67 \times 10^{-11} \cdot 3000 \cdot 3000^2} = 3,88 \text{ m/s}$$

b. Teniendo en cuenta el mismo principio de conservación de energía:

$$E_{\text{Mecánica}}(\text{Superficie}) = E_{\text{Mecánica}}(h = 1000 \text{ m})$$

$$\frac{1}{2}mv_e^2 + \left(-G \frac{M \cdot m}{R}\right) = \frac{1}{2}mv^2 + \left(-G \frac{M \cdot m}{R+h}\right) \quad \frac{1}{2}mv^2 - G \frac{Mm}{R+h} = 0$$

0  
Teniendo en cuenta el apartado a

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R+h}} = \left\{ \begin{array}{l} M = \frac{4}{3}\pi d R^3 \\ M = \frac{4}{3}\pi 3000 \cdot 3000^3 = 3,39 \times 10^{14} \text{ kg} \end{array} \right\} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,67 \times 10^{-11} \cdot 3,39 \times 10^{14}}{3000 + 1000}} = 3,36 \text{ m/s}$$

**Septiembre 2016. Pregunta 1B.-** Una estrella gira alrededor de un objeto estelar con un periodo de 28 días terrestres siguiendo una órbita circular de radio  $0,45 \cdot 10^8$  km.

a) Determine la masa del objeto estelar.

b) Si el diámetro del objeto estelar es 200 km, ¿cuál será el valor de la gravedad en su superficie?

Dato: Constante de Gravitación Universal,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ .

**Solución.**

a. El objeto describe una órbita circular con movimiento uniforme, por lo tanto se debe cumplir que la suma de fuerzas que actúen sobre él, deberán ser igual a la fuerza centrípeta.

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_{\text{centrípeta}}$$

La única fuerza que actúa sobre el objeto es la fuerza centrípeta, pasando a módulo:

$$G \frac{M \cdot m}{r^2} = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad v^2 = G \frac{M}{r}$$

Donde M representa la masa del objeto estelar y m la masa de la estrella.

$$\left. \begin{array}{l} v^2 = G \frac{M}{r} \\ v = \omega \cdot r \end{array} \right\} : \omega^2 \cdot r^2 = G \frac{M}{r} \quad \left. \begin{array}{l} M = \frac{\omega^2 \cdot r^3}{G} \\ \omega = \frac{2\pi}{T} \end{array} \right\} : M = \frac{4\pi^2 \cdot r^3}{G \cdot T^2}$$

$$M = \frac{4\pi^2 \cdot (0,45 \times 10^{11})^3}{6,67 \times 10^{-11} \cdot (28 \cdot 24 \cdot 3600)^2} = 9,22 \times 10^{30} \text{ kg}$$

b. Para calcular la gravedad en la superficie del objeto estelar se tiene en cuenta que en su superficie, el peso de un cuerpo es la fuerza gravitatoria con la que le atrae.

$$P = F_G \quad m g_o = G \frac{M m}{R^2} \quad g_o = G \frac{M}{R^2} = 6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{9,22 \times 10^{30}}{\left(\frac{200 \times 10^3}{2}\right)^2} = 6,15 \times 10^{10} \text{ m/s}^2$$

**Septiembre 2016. Pregunta 1A.-** Desde la superficie de un planeta de masa  $6,42 \cdot 10^{23}$  kg y radio 4500 km se lanza verticalmente hacia arriba un objeto.

- a) Determine la altura máxima que alcanza el objeto si es lanzado con una velocidad inicial de  $2 \text{ km s}^{-1}$ .
- b) En el punto más alto se le transfiere el momento lineal adecuado para que describa una órbita circular a esa altura. ¿Qué velocidad tendrá el objeto en dicha órbita circular?

Dato: Constante de Gravitación Universal,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ .

**Solución.**

a. Despreciando la fuerza de rozamiento, la energía mecánica del satélite se conserva.

$$E_M(\text{Superficie}) = E_M(\text{Altura } h)$$

Teniendo en cuenta que cuando llega a la altura  $h$ , el objeto se para:

$$E_c(\text{Superficie}) + E_p(\text{Superficie}) = E_p(\text{Altura } h)$$

$$\frac{1}{2} m v_s^2 + \left( -G \cdot \frac{M \cdot m}{R} \right) = -G \cdot \frac{M \cdot m}{R + h}$$

Donde  $R$  representa el radio del planeta y  $v_s$  la velocidad en la superficie del planeta.

Simplificando la masa del objeto ( $m$ ) y sustituyendo datos, se despeja  $h$

$$\frac{1}{2} v_s^2 - G \cdot \frac{M}{R} = -G \cdot \frac{M}{R + h} \quad ; \quad \frac{1}{2} (2 \cdot 10^3)^2 - 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{6,42 \cdot 10^{23}}{4,5 \cdot 10^6} = -6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{6,42 \cdot 10^{23}}{4,5 \cdot 10^6 + h}$$

$$h \approx 1,2 \times 10^6 \text{ m} = 1200 \text{ Km}$$

b. El objeto describe una órbita circular con movimiento uniforme, por lo tanto se debe cumplir que la suma de fuerzas que actúan sobre él, deberán ser igual a la fuerza centrípeta.

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_{\text{centrípeta}}$$

La única fuerza que actúa sobre el objeto es la fuerza centrípeta, pasando a módulo:

$$G \frac{M \cdot m}{r^2} = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad v = \sqrt{G \frac{M}{r}} = \sqrt{G \frac{M}{R + h}}$$

$$v = \sqrt{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{6,42 \cdot 10^{23}}{4,5 \cdot 10^6 + 1,2 \cdot 10^6}} \approx 2740,9 \text{ m s}^{-1}$$

**Junio 2016. Pregunta 1B.-** Un astronauta utiliza un muelle de constante elástica  $k = 327 \text{ N m}^{-1}$  para determinar la aceleración de la gravedad en la Tierra y en Marte. El astronauta coloca en posición vertical el muelle y cuelga de uno de sus extremos una masa de 1 kg hasta alcanzar el equilibrio. Observa que en la superficie de la Tierra el muelle se alarga 3 cm y en la de Marte sólo 1,13 cm.

- a) Si el astronauta tiene una masa de 90 kg, determine la masa adicional que debe añadirse para que su peso en Marte sea igual que en la Tierra.
- b) Calcule la masa de la Tierra suponiendo que es esférica.

Datos: Constante de Gravitación Universal,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ ; Radio de la Tierra,  $R_T = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$ .

**Solución.**

a. Lo primero que se necesita es calcular la aceleración de la gravedad en Marte y en la Tierra, para ello se utiliza la experiencia del muelle.

$$F = -k \cdot x = -mg \quad g = \frac{k \cdot x}{m}$$

- Tierra:  $g_T = \frac{327 \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{1} = 9,81 \text{ m s}^{-2}$
- Marte:  $g_M = \frac{327 \cdot 1,13 \cdot 10^{-2}}{1} = 3,69 \text{ m s}^{-2}$

$$P = m \cdot g_T = (m' + m) \cdot g_M$$

$$90 \cdot 9,81 = (m' + 90) \cdot 3,69 \quad m' = \frac{90 \cdot 9,81}{3,69} - 90 = 149 \text{ kg}$$

b.  $P = F_G \quad m \cdot g = G \cdot \frac{M \cdot m}{R^2} \quad g = G \cdot \frac{M}{R^2}$

$$M = \frac{g \cdot R^2}{G} = \frac{9,8 \cdot (6,37 \cdot 10^6)^2}{6,67 \cdot 10^{-11}} = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

**Junio 2016. Pregunta 1A.-** El planeta Marte, en su movimiento alrededor del Sol, describe una órbita elíptica. El punto de la órbita más cercano al Sol, perihelio, se encuentra a  $206,7 \cdot 10^6 \text{ km}$ , mientras que el punto de la órbita más alejado del Sol, afelio, está a  $249,2 \cdot 10^6 \text{ km}$ . Si la velocidad de Marte en el perihelio es de  $26,50 \text{ km s}^{-1}$ , determine:

- La velocidad de Marte en el afelio.
- La energía mecánica total de Marte en el afelio.

Datos: Constante de Gravitación Universal,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ ; Masa de Marte,  $M_M = 6,42 \cdot 10^{23} \text{ kg}$ ; Masa del Sol  $M_S = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ .

**Solución.**

- a. Por estar sometido a fuerzas centrales, el momento angular de Marte permanece constante ( $\vec{L} = \text{cte}$ ).

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m\vec{v}$$

$$|\vec{L}| = |\vec{r}| \cdot m |\vec{v}| \cdot \text{sen } \alpha = \text{cte}$$

En el afelio y en el perihelio,  $\alpha = 90^\circ$

$$|\vec{L}_p| = |\vec{L}_a| \quad |\vec{r}_p| \cdot m |\vec{v}_p| \cdot \text{sen } 90 = |\vec{r}_a| \cdot m |\vec{v}_a| \cdot \text{sen } 90$$

$$r_p \cdot v_p = r_a \cdot v_a \quad v_a = v_p \cdot \frac{r_p}{r_a} \quad v_a = 26,50 \cdot \frac{206,7 \cdot 10^6}{249,2 \cdot 10^6} = 21,98 \text{ Km s}^{-1}$$

b.  $E_M = E_c + E_p = \frac{1}{2} m_{\text{Marte}} \cdot v_a^2 + \left( -G \cdot \frac{M_{\text{Sol}} \cdot m_{\text{Marte}}}{r_a} \right) = \frac{1}{2} m_{\text{Marte}} \cdot v_a^2 - G \cdot \frac{M_{\text{Sol}} \cdot m_{\text{Marte}}}{r_a}$

$$E_M = \frac{1}{2} 6,42 \cdot 10^{23} \cdot (21,98 \cdot 10^3)^2 - 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{1,99 \cdot 10^{30} \cdot 6,42 \cdot 10^{23}}{249,2 \cdot 10^9} = -1,87 \cdot 10^{32} \text{ J}$$

**Modelo 2016. Pregunta 1B.-** Un cierto planeta esférico tiene de masa el doble de la masa de la Tierra, y la longitud de su circunferencia ecuatorial mide la mitad de la de la Tierra. Calcule:

- La relación que existe entre la velocidad de escape en la superficie de dicho planeta con respecto a la velocidad de escape en la superficie de la Tierra.
- La aceleración de la gravedad en la superficie del planeta.

Dato: Aceleración de la gravedad en la superficie de la Tierra,  $g_T = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ .

**Solución**

- a. Para deducir la velocidad de escape desde la superficie de un planeta, se debe tener en cuenta que el campo gravitatorio es conservativo y por tanto, la energía mecánica de un cuerpo en la superficie de un planeta es igual a la energía mecánica en el infinito. Suponiendo (teórico) que el cuerpo llega al

infinito con velocidad cero, su energía cinética será nula y teniendo en cuenta que la distancia es infinita, su energía potencial también será nula, por tanto la energía mecánica en el infinito es nula.

Para que el cuerpo escape de la superficie del planeta, habrá que comunicarle la velocidad suficiente para que anule su energía mecánica.

$$E_M(\text{Superficie}) = E_M(\text{Infinito}) = 0$$

$$E_M(\text{Superficie}) = E_c(\text{Superficie}) + E_p(\text{Superficie}) = 0$$

$$\frac{1}{2}mv_e^2 + \left(-G \frac{Mm}{R}\right) = 0 \quad ; \quad v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

$$\text{Para la Tierra: } v_e(T) = \sqrt{\frac{2GM_T}{R_T}}$$

$$\text{Para el planeta: } v_e(P) = \sqrt{\frac{2GM_P}{R_P}}$$

$$\text{Comparando: } \frac{v_e(P)}{v_e(T)} = \frac{\sqrt{\frac{2GM_P}{R_P}}}{\sqrt{\frac{2GM_T}{R_T}}} = \sqrt{\frac{R_T \cdot M_P}{R_P \cdot M_T}}$$

Del enunciado:  $M_P = 2M_T$  y  $L_P = \frac{1}{2}L_T$ . Teniendo en cuenta la expresión de la longitud de una circunferencia,  $2\pi \cdot R_P = \frac{1}{2}2\pi \cdot R_T$ , por lo tanto,  $R_P = \frac{R_T}{2}$ . Sustituyendo en la relación entre las velocidades de escape:

$$\frac{v_e(P)}{v_e(T)} = \sqrt{\frac{R_T \cdot 2M_T}{\frac{R_T}{2} \cdot M_T}} = \sqrt{4} = 2 \Rightarrow v_e(P) = 2v_e(T)$$

**b.** La relación entre la aceleración de la gravedad, la masa del planeta y su radio, se obtiene igualando el peso de un cuerpo en la superficie del planeta con la fuerza de atracción gravitacional.

$$P = F_G \quad ; \quad mg = G \frac{Mm}{R^2} \quad ; \quad g = G \frac{M}{R^2}$$

Aplicando la expresión a la Tierra y al planeta y comparando:

$$\left. \begin{array}{l} g_T = G \frac{M_T}{R_T^2} \\ g_P = G \frac{M_P}{R_P^2} \end{array} \right\} : \frac{g_P}{g_T} = \frac{G \frac{M_P}{R_P^2}}{G \frac{M_T}{R_T^2}} = \frac{M_P \cdot R_T^2}{M_T \cdot R_P^2} = \left\{ \begin{array}{l} M_P = 2M_T \\ R_P = \frac{1}{2}R_T \end{array} \right\} = \frac{2M_T \cdot R_T^2}{M_T \cdot \left(\frac{1}{2}R_T\right)^2} = 8$$

$$g_P = 8 \cdot g_T = 8 \cdot 9,81 = 78,48 \frac{m}{s^2}$$

La intensidad de campo gravitatorio será:  $\vec{g}_P = -78,48 \vec{u}_r \frac{N}{kg}$

**Modelo 2016 Pregunta 1A.-** Titania, satélite del planeta Urano, describe una órbita circular en torno al planeta. Las aceleraciones de la gravedad en la superficies de Urano y de Titania son  $g_U = 8,69 \text{ m s}^{-2}$  y  $g_t = 0,37 \text{ m s}^{-2}$ , respectivamente. Un haz de luz emitido desde la superficie de Urano tarda 1,366 s en llegar a la superficie de Titania. Determine:

- El radio de la órbita de Titania alrededor de Urano (distancia entre los centros de ambos cuerpos).
- El tiempo que tarda Titania en dar una vuelta completa alrededor de Urano, expresado en días terrestres.

Datos: Constante de Gravitación Universal,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ ; Velocidad de la luz en el vacío,  $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ; Masa de Urano,  $M_U = 8,69 \cdot 10^{25} \text{ kg}$ ; Masa de Titania  $M_t = 3,53 \cdot 10^{21} \text{ kg}$ .

**Solución.**

**a.** El radio de la órbita descrita por el satélite de Urano (Titania), es la suma de la distancia entre la superficie de Urano y de titania y los radios de Urano y de Titania.



$$r = R_U + d(\text{Urano} - \text{Titania}) + R_t$$

Teniendo en cuenta que la luz se desplaza con velocidad rectilínea y uniforme, la distancia entre las superficies del planeta y su satélite se puede calcular por cinemática  $d(\text{Urano} - \text{Titania}) = c \cdot t$

Los radios de Urano y de titania se pueden calcular a partir de las aceleraciones de la gravedad en sus respectivas superficies, teniendo en cuenta que en la superficie de un planeta o satélite, el peso de un cuerpo es la fuerza gravitatoria con la que le atrae el planeta o satélite.

$$P = F_G \quad m g_o = G \frac{M m}{R^2} \quad g_o = G \frac{M}{R^2} \quad R = \sqrt{\frac{GM}{g_o}}$$

Aplicando esta expresión a Urano y a su satélite:

$$R_U = \sqrt{\frac{G M_U}{g_U}} \quad R_t = \sqrt{\frac{G M_t}{g_t}}$$

Sustituyendo en la expresión del radio de la órbita del satélite

$$r = \sqrt{\frac{G M_U}{g_U}} + c \cdot t + \sqrt{\frac{G M_t}{g_t}} = \sqrt{\frac{6,67 \times 10^{-11} \cdot 8,69 \times 10^{25}}{8,69}} + 3 \times 10^8 \cdot 1,366 + \sqrt{\frac{6,67 \times 10^{-11} \cdot 3,53 \times 10^{21}}{0,37}}$$

$$r = 4,36424 \times 10^8 \text{ m} = 436 424 \text{ Km}$$

**b.** Se pide el periodo del satélite titania expresado en días de 24 horas, para ello se tiene en cuenta que el satélite realiza una órbita circular con velocidad constante, y por tanto la suma de las fuerzas que actúan sobre el debe ser igual a la fuerza centrípeta, responsable de su giro.

$$F_G = F_c \quad G \frac{M_U m}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \quad v^2 = G \frac{M_U}{r}$$

La velocidad lineal, se puede expresar en función de la angular, y está en función del periodo

$$\left. \begin{aligned} v^2 &= \frac{G \cdot M_U}{r} \\ v &= \omega \cdot r \end{aligned} \right\} : (\omega \cdot r)^2 = \frac{G \cdot M_U}{r} \quad \left. \begin{aligned} \omega^2 &= \frac{G \cdot M_U}{r^3} \\ \omega &= \frac{2\pi}{T} \end{aligned} \right\} : \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 = \frac{G \cdot M_U}{r^3} \quad T = \sqrt{\frac{4\pi^2 r^3}{G \cdot M_U}}$$

$$T = \sqrt{\frac{4\pi^2 (4,364 \times 10^8)^3}{6,67 \times 10^{-11} \cdot 8,69 \times 10^{25}}} = 752374 \text{ s} \approx 8,71 \text{ días}$$

**Septiembre 2015. Pregunta 1B.-** El radio de uno de los asteroides, de forma esférica, perteneciente a los anillos de Saturno es de 5 km. Suponiendo que la densidad de dicho asteroide es uniforme y de valor  $5,5 \text{ g cm}^{-3}$ , calcule:

- La aceleración de la gravedad en su superficie.
- La velocidad de escape desde la superficie del asteroide.

*Dato: Constante de Gravitación Universal,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ .*

**Solución.**

**a.** En la superficie del asteroide se cumple que el peso es la fuerza con la que el asteroide atrae a las masas.

$$P = F_G \quad mg = G \frac{Mm}{R^2} \quad g = G \frac{M}{R^2}$$

La masa se calcula con la densidad y el volumen.

$$M = V \cdot d = \frac{4}{3} \pi R^3 \cdot d = \frac{4}{3} \pi (5 \cdot 10^3 \text{ m})^3 \cdot 5,5 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2,88 \cdot 10^{15} \text{ kg}$$

Sustituyendo en la expresión de la intensidad gravitatoria:

$$g = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{2,88 \cdot 10^{15}}{(5 \cdot 10^3)^2} = 7,68 \text{ m s}^{-2}$$

b. La velocidad de escape se calcula por energías. Teniendo en cuenta que el campo gravitatorio es conservativo y que el objeto que escapa del asteroide llega al infinito con velocidad nula, se cumplirá que:

$$E(\text{Superficie}) = E(\text{Infinito}) = 0$$

$$E_c(\text{Superficie}) + E_p(\text{Superficie}) = 0$$

$$\frac{1}{2}mv_e^2 + \left(-G \frac{Mm}{R}\right) = 0 \quad \frac{1}{2}mv_e^2 = G \frac{Mm}{R} \quad v_e = \sqrt{2G \frac{M}{R}}$$

$$v_e = \sqrt{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{2,88 \cdot 10^{15}}{5 \cdot 10^3}} = 8,77 \text{ m s}^{-1}$$

**Septiembre 2015. Pregunta 1A.-** Una nave espacial aterriza en un planeta desconocido. Tras varias mediciones se observa que el planeta tiene forma esférica, la longitud de su circunferencia ecuatorial mide  $2 \cdot 10^5$  km y la aceleración de la gravedad en su superficie vale  $3 \text{ m s}^{-2}$ .

a) ¿Qué masa tiene el planeta?

b) Si la nave se coloca en una órbita circular a 30.000 km sobre la superficie del planeta, ¿cuántas horas tardará en dar una vuelta completa al mismo?

Dato: Constante de Gravitación Universal,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ .

**Solución.**

a. La intensidad de campo gravitatorio ( $g$ ) en la superficie de un planeta, se puede expresar en función de la masa del planeta y del radio, teniendo en cuenta que el peso de los cuerpos en la superficie del planeta es la fuerza con la que este le atrae.

Trabajando en módulo:

$$P = F_G \quad mg = G \frac{Mm}{R^2} \quad g = G \frac{M}{R^2}$$

Expresión que permite despejar la masa del planeta en función de  $g$  y  $R$ .

$$M = \frac{g \cdot R^2}{G}$$

El radio del planeta se calcula conocida la longitud de la circunferencia ecuatorial

$$L(\text{ecuatorial}) = 2\pi R \quad R = \frac{L(\text{ecuatorial})}{2\pi} = \frac{2 \cdot 10^5}{2\pi} \cong 31830 \text{ Km}$$

$$M = \frac{3 \cdot (31,83 \cdot 10^6)^2}{6,67 \cdot 10^{-11}} = 4,56 \cdot 10^{25} \text{ kg}$$

b. Se pide calcular el periodo de la nave en una órbita conocida la altura. Para calcular el periodo, se tiene en cuenta que en una órbita circular, y teniendo en cuenta que la nave describe un movimiento circular uniforme, la suma de todas las fuerzas que actúan sobre la nave debe ser igual a la fuerza centrípeta.

$$F_G = F_c \quad G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \quad v^2 = G \frac{M}{r}$$

Por otro lado, la velocidad orbital se puede expresar en función del periodo.

$$\left. \begin{array}{l} v = \omega \cdot r \\ \omega = \frac{2\pi}{T} \end{array} \right\} : v = \frac{2\pi}{T} \cdot r \quad \Rightarrow \quad \left( \frac{2\pi}{T} \cdot r \right)^2 = G \frac{M}{r} \quad \frac{4\pi^2}{T^2} = G \frac{M}{r^3}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{G \cdot M}} = 2\pi \sqrt{\frac{(R+h)^3}{G \cdot M}} = 2\pi \sqrt{\frac{(31,83 \cdot 10^6 + 30 \cdot 10^6)^3}{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 4,56 \cdot 10^{25}}} = 55407 \text{ s} = 15 \text{ h } 23' 27''$$

**Junio 2015. Pregunta 1B.-** Un cuerpo esférico de densidad uniforme con un diámetro de  $6,0 \cdot 10^5$  km presenta una aceleración de la gravedad sobre su superficie de  $125 \text{ m s}^{-2}$ .

- Determine la masa de dicho cuerpo.
- Si un objeto describe una órbita circular concéntrica con el cuerpo esférico y un periodo de 12 h, ¿cuál será el radio de dicha órbita?

*Dato: Constante de Gravitación Universal,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ .*

**Solución.**

a.  $D = 6,0 \times 10^{15} \text{ Km} \Rightarrow R = 3,0 \times 10^5 \text{ Km}; g = 125 \text{ m/s}^2$

Igualando el peso de un cuerpo en la superficie del planeta a la fuerza gravitacional se obtiene una relación entre la intensidad de campo gravitatorio, el radio del planeta y su masa.

$$P = F_G \quad m \cdot g = G \frac{M \cdot m}{R^2} \quad g = G \frac{M}{R^2}$$

$$M = \frac{g \cdot R^2}{G} = \frac{125 \cdot (3 \times 10^8)^2}{6,67 \times 10^{-11}} = 1,69 \times 10^{29} \text{ kg}$$

- b. Para calcular el radio de la órbita se iguala la fuerza gravitacional a la fuerza centrípeta, ya que por ser una órbita circular se cumple:  $F_G = F_c$

$$G \frac{M m}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \quad v^2 = G \frac{M}{r} \quad (\omega \cdot r)^2 = G \frac{M}{r} \quad \omega^2 = G \frac{M}{r^3}$$

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = G \frac{M}{r^3} \quad \frac{r^3}{T^2} = G \frac{M}{4\pi^2} \quad r = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M \cdot T^2}{4\pi^2}}$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{6,67 \times 10^{-11} \cdot 1,69 \times 10^{29} \cdot (12 \cdot 3600)^2}{4\pi^2}} = 8,11 \times 10^8 \text{ m}$$

**Junio 2015. Pregunta 1A.-** Dos lunas que orbitan alrededor de un planeta desconocido, describen órbitas circulares concéntricas con el planeta y tienen periodos orbitales de 42 h y 171,6 h. A través de la observación directa, se sabe que el diámetro de la órbita que describe la luna más alejada del planeta es de  $2,14 \cdot 10^6$  km. Despreciando el efecto gravitatorio de una luna sobre la otra, determine:

- La velocidad orbital de la luna exterior y el radio de la órbita de la luna interior.
- La masa del planeta y la aceleración de la gravedad sobre su superficie si tiene un diámetro de  $2,4 \cdot 10^4$  km.

*Dato: Constante de Gravitación Universal,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ .*

**Solución.**

- a. Conocido el diámetro de la órbita y el periodo se puede calcular la velocidad orbital mediante la definición de velocidad media

$$v = \frac{s}{t} = \frac{2\pi \cdot r}{T} = \frac{\pi \cdot D}{T} = \frac{\pi \cdot 2,14 \times 10^9 \text{ m}}{171,6 \cdot 3600 \text{ s}} = 10883 \text{ m/s}$$

El radio de la órbita de la luna interior se puede obtener mediante la tercera ley de Kepler.

En una órbita circular se cumple:  $F_G = F_c$

$$G \frac{M m}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \quad v^2 = G \frac{M}{r} \quad (\omega \cdot r)^2 = G \frac{M}{r} \quad \omega^2 = G \frac{M}{r^3}$$

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = G \frac{M}{r^3} \quad \frac{r^3}{T^2} = G \frac{M}{4\pi^2} \quad \frac{r^3}{T^2} = \text{cte}$$

$$\frac{r_1^3}{T_1^2} = \frac{r_2^3}{T_2^2} \quad r_1 = r_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{T_1^2}{T_2^2}} = \frac{2,14 \times 10^6}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{42^2}{171,6^2}} = 4,187 \times 10^5 \text{ Km}$$

- b. La masa del planeta se puede obtener mediante la tercera ley de Kepler.

$$\frac{r^3}{T^2} = G \frac{M}{4\pi^2} \quad M = \frac{4\pi^2 \cdot r^3}{G \cdot T^2} = \frac{4\pi^2 \cdot \left(\frac{2,14 \times 10^9}{2}\right)^3}{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot (171,6 \cdot 3600)^2} = 1,9 \times 10^{27} \text{ Kg}$$

La intensidad gravitatoria se calcula igualando el peso en la superficie del planeta a la fuerza gravitacional.

$$m g = G \frac{M m}{R^2} \quad g = G \frac{M}{R^2} = G \frac{M}{(D/2)^2} = 6,67 \times 10^{-11} \frac{1,9 \times 10^{27}}{(2,4 \times 10^7 / 2)^2} = 880 \text{ m/s}^2$$

**Modelo 2015. Pregunta 1B.-** Dos planetas, A y B, tienen el mismo radio. La aceleración gravitatoria en la superficie del planeta A es tres veces superior a la aceleración gravitatoria en la superficie del planeta B.

Calcule:

- La relación entre las densidades de los dos planetas.
- La velocidad de escape desde la superficie del planeta B si se sabe que la velocidad de escape desde la superficie del planeta A es de 2 km/s

**Solución.**

**a.** La expresión de la intensidad de campo gravitatorio de un planeta en su superficie se obtiene igualando el peso de un cuerpo en su superficie con la fuerza gravitacional que ejerce el planeta sobre el cuerpo.

$$m g = G \frac{M m}{R^2} \quad g = G \frac{M}{R^2}$$

Se puede relacionar con la densidad del planeta si en el segundo miembro se multiplica y divide por  $\frac{4}{3} \pi R$

$$g = G \frac{\frac{4}{3} \pi \cdot R \cdot M}{\frac{4}{3} \pi \cdot R \cdot R^2} = \frac{4}{3} \pi \cdot G \cdot R \cdot \frac{M}{\frac{4}{3} \pi R^3} = \frac{4}{3} \pi \cdot G \cdot R \cdot \frac{M}{V} = \frac{4}{3} \pi \cdot G \cdot R \cdot d$$

Aplicando la expresión a los dos planetas y comparando.

$$\frac{g_A}{g_B} = \frac{\frac{4}{3} \pi \cdot G \cdot R_A \cdot d_A}{\frac{4}{3} \pi \cdot G \cdot R_B \cdot d_B} ; \left\{ \begin{array}{l} R_A = R_B \\ g_A = 3g_B \end{array} \right\} ; \frac{3g_B}{g_B} = \frac{d_A}{d_B} \Rightarrow \frac{d_A}{d_B} = 3$$

$$d_A = 3 d_B$$

**b.** La velocidad de escape de la superficie de un planeta se obtiene igualando la energía mecánica que debería tener el objeto en la superficie a cero.

$$\frac{1}{2} m v_e^2 - G \frac{M m}{R} = 0 \quad v_e = \sqrt{2 \frac{GM}{R}}$$

El producto GM se puede sustituir por  $gR^2$ , obteniendo de esa forma la velocidad de escape en función del radio del planeta y de la intensidad de campo gravitatorio.

$$v_e = \sqrt{2 \frac{gR^2}{R}} = \sqrt{2gR}$$

Si aplicamos esta expresión a los dos planetas y se comparan:

$$\frac{v_e(A)}{v_e(B)} = \frac{\sqrt{2g_A R_A}}{\sqrt{2g_B R_B}} = \left\{ \begin{array}{l} R_A = R_B \\ g_A = 3g_B \end{array} \right\} = \sqrt{\frac{3g_B}{g_B}} = \sqrt{3} \Rightarrow v_e(A) = \sqrt{3} v_e(B)$$

$$v_e(B) = \frac{v_e(A)}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,15 \text{ Km/s}$$

**Modelo 2015. Pregunta 1A.-** Un planeta de igual masa que la Tierra, describe una órbita circular de radio R, de un año terrestre de duración, alrededor de una estrella de masa M tres veces superior a la del Sol.

- Obtenga la relación entre: el radio R de la órbita del planeta, su periodo de revolución T, la constante de la gravitación universal G, y la masa M de la estrella alrededor de la cuál orbita.
- Calcule el cociente entre los radios de las órbitas de este planeta y de la Tierra.

**Solución.**

a. Para una órbita circular se cumple:  $F_G = F_c$

$$G \frac{Mm}{R^2} = m \frac{v^2}{R}$$

Simplificando y teniendo en cuenta que  $v = \omega \cdot R$  y que  $\omega = 2\pi/T$

$$G \frac{M}{R} = v^2 ; \quad G \frac{M}{R} = \omega^2 \cdot R^2 ; \quad G \frac{M}{R^3} = \frac{4\pi^2}{T^2} ; \quad R^3 = \frac{GM}{4\pi^2} T^2$$

b. Aplicando la relación obtenida al planeta y a la tierra y dividiendo ambas, se obtiene la relación que se pide.

- Para el planeta:  $R^3 = \frac{GM}{4\pi^2} T^2$

- Para la tierra:  $R_T^3 = \frac{GM_{Sol}}{4\pi^2} T^2$

$$\text{Comparando: } \frac{R^3}{R_T^3} = \frac{\frac{GM}{4\pi^2} T^2}{\frac{GM_{Sol}}{4\pi^2} T_T^2} : \{T = T_T\} : \frac{R^3}{R_T^3} = \frac{M}{M_{Sol}} = \frac{3M_{Sol}}{M_{Sol}} = 3$$

$$\frac{R}{R_T} = \sqrt[3]{3}$$

**Septiembre 2014. Pregunta 1B.-** Un planeta esférico tiene una densidad uniforme  $\rho = 1,33 \text{ g cm}^{-3}$  y un radio de 71500 km. Determine:

- El valor de la aceleración de la gravedad en su superficie.
- La velocidad de un satélite que orbita alrededor del planeta en una órbita circular con un periodo de 73 horas.

Dato: Constante de gravitación universal,  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

**Solución.**

a. Para calcular la aceleración de la gravedad en la superficie de un planeta, se tiene en cuenta que en la superficie, la fuerza con la que el planeta atrae a los cuerpos es peso de los cuerpos

$$\vec{F}_G = \vec{P} \text{ en módulo: } G \frac{M \cdot m}{R_P^2} = m \cdot g_o \text{ simplificando: } g_o = G \frac{M}{R_P^2}$$

La masa del planeta se puede calcular mediante la densidad.

$$g_o = G \frac{M}{R_P^2} = G \frac{V \cdot \rho}{R_P^2} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Supuesto esférico} \\ V = \frac{4}{3} \pi R_P^3 \end{array} \right\} = G \frac{\frac{4}{3} \pi R_P^3 \cdot \rho}{R_P^2} = \frac{4}{3} \pi \cdot G \cdot R_P \cdot \rho$$

$$g_o = \frac{4}{3} \pi \cdot G \cdot R_P \cdot \rho = \frac{4}{3} \pi \cdot 6,67 \times 10^{-11} \cdot 71500 \times 10^3 \cdot 1,33 \times 10^3 = 26,57 \text{ m/s}^2$$

b. Para calcular la velocidad de un satélite en órbita circular se tiene en cuenta que es M.C.U., y por tanto la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre el satélite debe ser igual a la fuerza centrípeta.

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_{\text{Centrípeta}} \Rightarrow \text{En módulo: } F_G = F_C ; \quad G \frac{Mm}{R^2} = m \frac{v^2}{R} ; \quad v^2 = \frac{G \cdot M}{R} ; \quad v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{R}}$$

De igual forma que en el apartado anterior, la masa se expresa en función del radio del planeta y

de su densidad.

El radio de la órbita, se calcula a partir del periodo mediante la tercera ley de Kepler.

$$\begin{aligned}
 \left. \begin{aligned} v^2 &= \frac{G \cdot M}{R} \\ v &= \omega \cdot R \end{aligned} \right\} : \omega^2 \cdot R^2 = \frac{G \cdot M}{R} \xrightarrow{\omega = \frac{2\pi}{T}} \frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{G \cdot M}{R^3} ; R = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M \cdot T^2}{4\pi^2}} \\
 \left. \begin{aligned} R &= \sqrt[3]{\frac{G \cdot M \cdot T^2}{4\pi^2}} \\ M &= \frac{4}{3} \pi \cdot R_p^3 \cdot \rho \end{aligned} \right\} : R = \sqrt[3]{\frac{G \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot R_p^3 \cdot \rho \cdot T^2}{4\pi^2}} = R_p \cdot \sqrt[3]{\frac{G \cdot \rho \cdot T^2}{3\pi}} \\
 R &= 71300 \cdot \sqrt[3]{\frac{6,67 \times 10^{-11} \cdot 1,33 \times 10^3 \cdot (73 \times 3600)^2}{3\pi}} = 617649 \text{ Km}
 \end{aligned}$$

Sustituyendo en la expresión de la velocidad.

$$\begin{aligned}
 \left. \begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{G \cdot M}{R}} \\ M &= \frac{4}{3} \pi \cdot R_p^3 \cdot \rho \end{aligned} \right\} : v = \sqrt{\frac{G \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot R_p^3 \cdot \rho}{R}} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot G \cdot R_p^3 \cdot \rho}{3R}} \\
 v &= \sqrt{\frac{4\pi \cdot G \cdot R_p^3 \cdot \rho}{3R}} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot 6,67 \times 10^{-11} \cdot (71300 \times 10^3)^3 \cdot 1,33 \times 10^3}{3 \cdot 617649 \times 10^3}} = 14767 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

**Septiembre 2014. Pregunta 1A.-** Un satélite describe una órbita circular alrededor de un planeta desconocido con un periodo de 24 h. La aceleración de la gravedad en la superficie del planeta es  $3,71 \text{ m s}^{-2}$  y su radio es 3393 km. Determine:

- El radio de la órbita.
- La velocidad de escape desde la superficie del planeta.

**Solución.**

a. Si un satélite describe una órbita circular uniforme, se debe cumplir:

$$\begin{aligned}
 \sum \vec{F} = \vec{F}_{\text{Centrípeta}} \Rightarrow \text{En módulo: } F_G = F_C ; G \frac{Mm}{R^2} = m \frac{v^2}{R} ; v^2 = \frac{G \cdot M}{R} \\
 \left. \begin{aligned} v^2 &= \frac{G \cdot M}{R} \\ v &= \omega \cdot R \end{aligned} \right\} : \omega^2 \cdot R^2 = \frac{G \cdot M}{R} \xrightarrow{\omega = \frac{2\pi}{T}} \frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{G \cdot M}{R^3} ; R = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M \cdot T^2}{4\pi^2}}
 \end{aligned}$$

El producto  $G \cdot M$  se puede expresar en función del radio del planeta y de la aceleración de la gravedad en la superficie del planeta, teniendo en cuenta que en la superficie del planeta, el peso de los cuerpos es la fuerza con la que los atrae el planeta. Trabajando en módulo:

$$P = F_G ; mg_o = G \frac{M \cdot m}{R_p^2} ; g_o = G \frac{M}{R_p^2} ; G \cdot M = g_o \cdot R_p^2$$

Sustituyendo en la expresión del radio:

$$R = \sqrt[3]{\frac{g_o \cdot R_p^2 \cdot T^2}{4\pi^2}} = \sqrt[3]{\frac{3,71 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot (3393 \times 10^3 \text{ m})^2 \cdot \left(24 \text{ h} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}\right)^2}{4\pi^2}} = 20,06 \times 10^6 \text{ m} = 20060 \text{ Km}$$

b. Teniendo en cuenta que el campo gravitatorio es conservativo, se cumple:  
 $E_M(\text{Superficie}) = E_M(\text{Infinito})$

La energía mecánica en el infinito es nula porque el cuerpo se supone que llega con velocidad cero (teórico), energía cinética cero y la distancia es infinita, energía potencial cero.

$$E_M(\text{Superficie})=0 \quad ; \quad E_c(S)+E_p(S)=0 \quad ; \quad \frac{1}{2}mv_e^2 + \left(-G \frac{Mm}{R_p}\right)=0$$

$$\frac{1}{2}mv_e^2 = G \frac{Mm}{R_p} \quad ; \quad v_e^2 = 2G \frac{M}{R_p} \quad ; \quad v_e = \sqrt{2 \frac{G \cdot M}{R_p}} = \sqrt{2 \frac{g_o \cdot R_p^2}{R_p}} = \sqrt{2g_o \cdot R_p}$$

$$v_e = \sqrt{2g_o \cdot R_p} = \sqrt{2 \cdot 3,71 \left(\frac{m}{s^2}\right) \cdot 3393 \times 10^3 m} = 5018 m/s$$

**Junio 2014. Pregunta 1B.-** Un cohete de masa 2 kg se lanza verticalmente desde la superficie terrestre de tal manera que alcanza una altura máxima, con respecto a la superficie terrestre, de 500 km. Despreciando el rozamiento con el aire, calcule:

- La velocidad del cuerpo en el momento del lanzamiento. Compárela con la velocidad de escape desde la superficie terrestre.
- La distancia a la que se encuentra el cohete, con respecto al centro de la Tierra, cuando su velocidad se ha reducido en un 10 % con respecto a su velocidad de lanzamiento.

*Datos: Radio Terrestre,  $R_T = 6,37 \times 10^6$  m ; Masa de la Tierra,  $M_T = 5,97 \times 10^{24}$  kg;*

*Constante de Gravitación Universal,  $G = 6,67 \times 10^{-11}$  N m<sup>2</sup> kg<sup>-2</sup>*

**Solución.**

**a.** Si se desprecian los efectos de rozamiento, se puede considerar que el campo gravitatorio dentro de la atmosfera terrestre es conservativo, y por tanto,  $\Delta E_m = 0$

$$E_m(h = 500 \text{ Km}) = E_m(\text{Superficie})$$

Si el cohete llega hasta la altura de 500 Km y se detiene (no orbita), en esa posición su energía mecánica solo tendrá componente potencial, por otra parte, en la superficie terrestre, la energía mecánica del cohete en el momento de lanzamiento será la suma de su energía cinética y su energía potencial.

$$-G \frac{Mm}{R_T + h} = -G \frac{Mm}{R_T} + \frac{1}{2}mv_o^2$$

$$-G \frac{M}{R_T + h} = -G \frac{M}{R_T} + \frac{1}{2}v_o^2 \quad \frac{1}{2}v_o^2 = G \frac{M}{R_T} - G \frac{M}{R_T + h} \quad v_o^2 = 2GM \left( \frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_T + h} \right)$$

$$v_o = \sqrt{2GM \left( \frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_T + h} \right)} = \sqrt{2 \cdot 6,67 \times 10^{-11} \cdot 5,97 \cdot 10^{24} \cdot \left( \frac{1}{6,37 \times 10^6} - \frac{1}{6,37 \times 10^6 + 500 \times 10^3} \right)}$$

$$v_o = 3016,5 \text{ m s}^{-1}$$

Velocidad de escape: Teniendo en cuenta que el cohete se escapa del campo gravitatorio cuando alcanza una distancia "infinita" y lo hace con una velocidad nula (teórica), y por otro lado, que el campo gravitatorio es conservativo, se debe cumplir que  $E_m(\text{Superficie}) = E_m(\text{"Infinito"})$ .

$$-G \frac{Mm}{R_T} + \frac{1}{2}mv_e^2 = -G \frac{Mm}{\infty} + \frac{1}{2}m \cdot 0^2 \Rightarrow -G \frac{Mm}{R_T} + \frac{1}{2}mv_e^2 = 0 \quad v_e = \sqrt{2G \frac{M}{R_T}}$$

Comparando la velocidad inicial necesaria para llevar el cohete a una altura de 500 Km con la velocidad de escape:

$$\frac{v_o}{v_e} = \frac{\sqrt{2GM \left( \frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_T + h} \right)}}{\sqrt{2G \frac{M}{R_T}}} = \sqrt{\frac{2GM \frac{h}{R_T(R_T + h)}}{2GM \frac{1}{R_T}}} = \sqrt{\frac{h}{R_T + h}} = \sqrt{\frac{500}{6370 + 500}} = 0,27$$

Para que un cohete llegue a una altura de 500 Km desde la superficie terrestre se necesita una velocidad aproximadamente igual al 27 % de la velocidad de escape del campo gravitatorio terrestre.

**b.** Manteniendo el mismo criterio de campo conservativo:

$$E_m(r = R_T) = E_m(r = R)$$

$$-G \frac{Mm}{R_T} + \frac{1}{2}mv_0^2 = -G \frac{Mm}{R} + \frac{1}{2}mv^2$$

Simplificando la masa del cohete y teniendo en cuenta que  $v = v_0 - \frac{10}{100}v_0 = 0,9v_0$

$$-G \frac{M}{R_T} + \frac{1}{2}v_0^2 = -G \frac{M}{R} + \frac{1}{2}(0,9v_0)^2 \quad -G \frac{M}{R_T} + \frac{1}{2}v_0^2 = -G \frac{M}{R} + \frac{1}{2}(0,9v_0)^2$$

$$G \frac{M}{R} = G \frac{M}{R_T} + \frac{1}{2}0,81v_0^2 - \frac{1}{2}v_0^2 \quad \frac{GM}{R} = \frac{GM}{R_T} - 0,095v_0^2 \quad R = \frac{GM}{\frac{GM}{R_T} - 0,095v_0^2}$$

$$R = \frac{6,67 \times 10^{-11} \cdot 5,97 \times 10^{24}}{\frac{6,67 \times 10^{-11} \cdot 5,97 \times 10^{24}}{6,37 \times 10^6} - 0,095 \cdot 3016,5^2} = 6,46 \times 10^6 \text{ m}$$

**Junio 2014. Pregunta 1A.-** El planeta A tiene tres veces más masa que el planeta B y cuatro veces su radio.

Obtenga:

- La relación entre las velocidades de escape desde las superficies de ambos planetas.
- La relación entre las aceleraciones gravitatorias en las superficies de ambos planetas.

**Solución.**

**a.** La velocidad de escape de un campo gravitatorio se calcula teniendo en cuenta que es conservativo y por tanto la energía mecánica se conserva.

$$\Delta E_m = 0 \Rightarrow E_m(\text{Superficie}) = E_m(\text{Infinito})$$

Suponiendo que al infinito se llega con velocidad nula (teórico), en el infinito la energía mecánica del objeto será nula.

$$E_m(\text{Superficie}) = 0 \quad E_c(\text{superficie}) + E_p(\text{Superficie}) = 0 \quad \frac{1}{2}mv_e^2 - G \frac{Mm}{R} = 0$$

$$v_e = \sqrt{2G \frac{M}{R}}$$

Aplicando la expresión para los planetas A y B:

$$v_e(A) = \sqrt{2G \frac{M_A}{R_A}} \quad v_e(B) = \sqrt{2G \frac{M_B}{R_B}}$$

Comparando:

$$\frac{v_e(A)}{v_e(B)} = \frac{\sqrt{2G \frac{M_A}{R_A}}}{\sqrt{2G \frac{M_B}{R_B}}} = \sqrt{\frac{M_A \cdot R_B}{M_B \cdot R_A}} = \left\{ \begin{array}{l} M_A = 3M_B \\ R_A = 4R_B \end{array} \right\} = \sqrt{\frac{3M_B \cdot R_B}{M_B \cdot 4R_B}} = \sqrt{\frac{3}{4}} = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$v_e(A) = \frac{\sqrt{3}}{2} v_e(B)$$

**b.** La intensidad de campo gravitatorio se obtiene igualando el peso con la fuerza de atracción gravitatoria. En módulo:

$$P = F_G \quad mg = G \frac{Mm}{R^2} \quad g = G \frac{M}{R^2}$$

Aplicando la expresión para los planetas A y B:

$$g_A = G \frac{M_A}{R_A^2} \quad g_B = G \frac{M_B}{R_B^2}$$

Comparando:

$$\frac{g_A}{g_B} = \frac{G \frac{M_A}{R_A^2}}{G \frac{M_B}{R_B^2}} = \frac{M_A \cdot R_B^2}{M_B \cdot R_A^2} = \left\{ \begin{array}{l} M_A = 3M_B \\ R_A = 4R_B \end{array} \right\} = \frac{3M_B \cdot R_B^2}{M_B \cdot (4R_B)^2} = \frac{3}{16}$$



$$g_A = \frac{3}{16} g_B$$

**Modelo 2014. Pregunta 1B.-** Los satélites Meteosat son satélites geoestacionarios, situados sobre el ecuador terrestre y con un periodo orbital de 1 día.

- a) Suponiendo que la órbita que describen es circular y poseen una masa de 500 kg, determine el módulo del momento angular de los satélites respecto del centro de la Tierra y la altura a la que se encuentran estos satélites respecto de la superficie terrestre.
- b) Determine la energía mecánica de los satélites.

Datos: Radio Terrestre =  $6,37 \times 10^6$  m ; Masa de la Tierra =  $5,97 \times 10^{24}$  kg;

Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11}$  N m<sup>2</sup> kg<sup>-2</sup>

**Solución.**

- a. El momento angular de un satélite que orbita en torno a un planeta es

$$\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v}$$

Donde  $\vec{r}$  representa el radiovector que une al satélite con el centro del planeta y  $\vec{v}$  la velocidad lineal del satélite en la órbita. El módulo del momento angular es:

$$|\vec{L}| = L = |\vec{r}| \cdot |m\vec{v}| \cdot \sin \alpha = r \cdot m \cdot v \cdot \sin \alpha$$

Teniendo en cuenta que la velocidad es tangente a la trayectoria, y que el satélite describe una  $\alpha = 90$  y  $\sin \alpha = 1$ .

$$L = r \cdot m \cdot v = \{v = \omega \cdot r\} = r^2 \cdot m \cdot \omega = \left\{ \omega = \frac{2\pi}{T} \right\} = r^2 \cdot m \cdot \frac{2\pi}{T}$$

$$L = \frac{2\pi \cdot m \cdot r^2}{T}$$

Para determinar el radio de la órbita se tiene en cuenta que el satélite describe un movimiento circular uniforme, y por tanto, todas las fuerzas que actúan sobre el deberán ser igual a la fuerza centrípeta.

$$F_G = F_c \quad G \frac{M \cdot m}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \quad G \frac{M}{r} = v^2 \quad G \frac{M}{r} = (\omega \cdot r)^2$$

$$r^3 = \frac{G \cdot M}{\omega^2} \quad r^3 = \frac{G \cdot M}{\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2} \quad r^3 = \frac{G \cdot M}{4\pi^2} \cdot T^2$$

Si el satélite es geoestacionario, el periodo es un día.

$$r = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M}{4\pi^2} \cdot T^2} = \sqrt[3]{\frac{6,67 \times 10^{-11} \cdot 5,98 \times 10^{24}}{4\pi^2} \cdot (24 \cdot 3600)^2} = 42,25 \times 10^6 \text{ m}$$

Conocido el radio de la órbita se calcula el módulo del momento angular.

$$L = \frac{2\pi \cdot m \cdot r^2}{T} = \frac{2\pi \cdot 500 \cdot (42,25 \times 10^6)^2}{24 \cdot 3600} = 64,9 \times 10^{12} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$$

La altura del satélite respecto de la superficie de la tierra será la distancia del satélite al centro de la tierra menos el radio de la tierra.

$$h = r - R_T = 42,25 \times 10^6 - 6,37 \times 10^6 = 35,88 \times 10^6 \text{ m}$$

- b.  $E_M = E_p + E_c = -G \frac{Mm}{r} + \frac{1}{2} mv^2 = -G \frac{Mm}{r} + \frac{1}{2} m \cdot G \frac{M}{r} = -\frac{1}{2} G \frac{Mm}{r}$

$$E_M = -\frac{1}{2} G \frac{Mm}{r} = -\frac{1}{2} 6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \times 10^{24} \cdot 500}{42,25 \times 10^6} = -2,36 \times 10^9 \text{ J}$$

**Modelo 2014. Pregunta 1A.-** La masa del Sol es 333183 veces mayor que la de la Tierra y la distancia que separa sus centros es de  $1,5 \times 10^8$  Km. Determine si existe algún punto a lo largo de la línea que los une en el que se anule:

- El potencial gravitatorio. En caso afirmativo, calcule su distancia a la Tierra.
- El campo gravitatorio. En caso afirmativo, calcule su distancia a la Tierra.

**Solución.**

a. El potencial gravitatorio en un punto debido a una masa  $M$  viene determinado por la expresión:

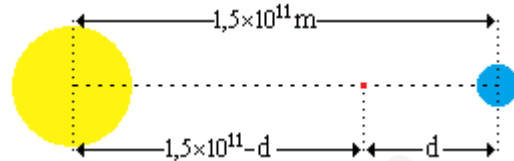
$$V(r) = -G \cdot \frac{M}{r}$$

Se busca un punto en la línea que une los centros del Sol y la Tierra donde el potencial debido al Sol y la tierra sea nulo. Si el punto buscado se encuentra a una distancia  $d$  de la Tierra y  $1,5 \times 10^{11} - d$  del Sol, se deberá cumplir:

$$V = V_S + V_T = 0 \quad V = -G \cdot \frac{M_S}{1,5 \times 10^{11} - d} + \left( -G \cdot \frac{M_T}{d} \right) = 0$$

$$-G \cdot \frac{333183 M_T}{1,5 \times 10^{11} - d} - G \cdot \frac{M_T}{d} = 0 \quad -G \cdot \frac{333183 M_T}{1,5 \times 10^{11} - d} = G \cdot \frac{M_T}{d}$$

$$-\frac{333183}{1,5 \times 10^{11} - d} = \frac{1}{d} \quad d = -450204 < 0$$

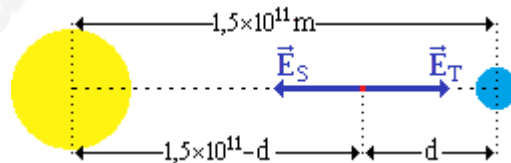


No hay ningún punto en la línea que une los centros del Sol y de la Tierra donde el potencial se anule

b. Según la Ley de Gravitación Universal, el campo determinado por una masa en un punto viene expresado por la siguiente función:

$$\vec{E}(r) = -G \cdot \frac{M}{r^2} \vec{u}_r$$

Se busca un punto en la línea que une los centros del Sol y la Tierra donde el campo gravitatorio debido al Sol y la tierra sea nulo. Si el punto buscado se encuentra a una distancia  $d$  de la Tierra y  $1,5 \times 10^{11} - d$  del Sol, se deberá cumplir:



$$\vec{E}(r) = 0 = -G \frac{M_S}{(1,5 \times 10^{11} - d)^2} (-\vec{u}_r) + \left( -G \frac{M_T}{d^2} \vec{u}_r \right)$$

$$G \frac{M_S}{(1,5 \times 10^{11} - d)^2} \vec{u}_r = G \frac{M_T}{d^2} \vec{u}_r \quad \frac{333183 M_T}{(1,5 \times 10^{11} - d)^2} = \frac{M_T}{d^2}$$

$$\frac{(1,5 \times 10^{11} - d)^2}{d^2} = 333183 \quad \frac{1,5 \times 10^{11} - d}{d} = \pm \sqrt{333183}$$

$$*d = \frac{1,5 \times 10^{11}}{1 + \sqrt{333183}} = 2,594 \times 10^8 \text{ m del centro de la Tierra}$$

$$\text{Distancia al centro del sol} = 1,5 \times 10^{11} - 2,594 \times 10^8 = 1,197 \times 10^{11} \text{ m}$$

\*El signo negativo de la raíz no se tiene en cuenta ya que daría una distancia negativa

**Septiembre 2013. Pregunta 1B.-** Dos planetas, A y B, tienen la misma densidad. El planeta A tiene un radio de 3500 km y el planeta B un radio de 3000 km. Calcule:

- La relación que existe entre las aceleraciones de la gravedad en la superficie de cada planeta.
- La relación entre las velocidades de escape en cada planeta.

**Solución.**

**a.** La expresión de la aceleración de la gravedad en la superficie de un planeta se obtiene del hecho de que en la superficie de un planeta, el peso de un cuerpo es la fuerza gravitacional con la que atrae el planeta al cuerpo.

$$P = F_G \quad m \cdot g = G \frac{M \cdot m}{R^2} \quad g = G \frac{M}{R^2}$$

Si se aplica esta expresión a cada uno de los planetas y se compara:

$$\left. \begin{array}{l} g_A = G \frac{M_A}{R_A^2} \\ g_B = G \frac{M_B}{R_B^2} \end{array} \right\} : \frac{g_A}{g_B} = \frac{G \frac{M_A}{R_A^2}}{G \frac{M_B}{R_B^2}} \quad \text{simplificando y ordenando} \quad \frac{g_A}{g_B} = \frac{M_A \cdot R_B^2}{M_B \cdot R_A^2}$$

Para encontrar una la relación entre las masas de ambos planeta, se parte de la igualdad de las densidades.

$$d_A = d_B : \left\{ \begin{array}{l} d_A = \frac{M_A}{V_A} = \frac{M_A}{4/3\pi R_A^3} \\ d_B = \frac{M_B}{V_B} = \frac{M_B}{4/3\pi R_B^3} \end{array} \right\} : \frac{M_A}{4/3\pi R_A^3} = \frac{M_B}{4/3\pi R_B^3} \Rightarrow \frac{M_A}{M_B} = \frac{R_A^3}{R_B^3}$$

Teniendo en cuenta ambas relaciones:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{g_A}{g_B} = \frac{M_A \cdot R_B^2}{M_B \cdot R_A^2} \\ \frac{M_A}{M_B} = \frac{R_A^3}{R_B^3} \end{array} \right\} : \frac{g_A}{g_B} = \frac{R_A^3}{R_B^3} \cdot \frac{R_B^2}{R_A^2} \quad \text{simplificando} \quad \frac{g_A}{g_B} = \frac{R_A}{R_B} = \frac{3500}{3000} = \frac{7}{6} \quad g_A = \frac{7}{6} g_B$$

**b.** Se denomina velocidad de escape de un planeta a la mínima velocidad de lanzamiento de un cohete para que pueda escapar de la atracción gravitatoria del planeta. Teniendo en cuenta que el cohete se mueve sometido a una fuerza conservativa, la energía mecánica se conserva, y suponiendo que el cuerpo llega al infinito con velocidad nula, se ha de cumplir:

$$E_M(\text{Superficie}) = E_M(\text{Infinito}) = 0$$

$$E_c(\text{Superficie}) + E_p(\text{Superficie}) = 0 \quad \frac{1}{2}mv^2 + \left(-G \frac{Mm}{R}\right) = 0 \quad v = \sqrt{2G \frac{M}{R}}$$

Si aplicamos la expresión de la velocidad de escape a los dos planetas y se compara:

$$\left. \begin{array}{l} v_A = \sqrt{2G \frac{M_A}{R_A}} \\ v_B = \sqrt{2G \frac{M_B}{R_B}} \end{array} \right\} : \frac{v_A}{v_B} = \frac{\sqrt{2G \frac{M_A}{R_A}}}{\sqrt{2G \frac{M_B}{R_B}}} = \sqrt{\frac{2G \frac{M_A}{R_A}}{2G \frac{M_B}{R_B}}} = \sqrt{\frac{M_A \cdot R_B}{M_B \cdot R_A}}$$

Teniendo en cuenta la relación entre las masas de los planetas obtenida en el apartado a:

$$\frac{M_A}{M_B} = \frac{R_A^3}{R_B^3} \quad \frac{v_A}{v_B} = \sqrt{\frac{M_A \cdot R_B}{M_B \cdot R_A}} = \sqrt{\frac{R_A^3}{R_B^3} \cdot \frac{R_B}{R_A}} = \sqrt{\frac{R_A^2}{R_B^2}} = \frac{R_A}{R_B} = \frac{7}{6} \quad v_A = \frac{7}{6} v_B$$

**Septiembre 2013. Pregunta 1A.-** Dos satélites describen órbitas circulares alrededor de un planeta cuyo radio es de 3000 km. El primero de ellos orbita a 1000 km de la superficie del planeta y su periodo orbital es de 2 h. La órbita del segundo tiene un radio 500 km mayor que la del primero. Calcule:

- El módulo de la aceleración de la gravedad en la superficie del planeta.
- El periodo orbital del segundo satélite.

**Solución.**

$$a. \quad R_P = 3000 \text{ Km} : \begin{cases} R_{s_1} = 4000 \text{ Km} & T_1 = 2 \text{ h} \\ R_{s_2} = 4500 \text{ Km} & T_2 = ? \end{cases}$$

$$\text{En la superficie del planeta, se cumple: } P = F_G \quad mg = G \frac{M \cdot m}{R_P^2} \quad g = G \frac{M}{R_P^2}$$

El Producto G·M, se puede obtener teniendo en cuenta que en los satélites que están orbitando en torno al planeta se cumple que  $F_G = F_c$ . Si aplicamos al primero de ellos, del que conocemos radio y periodo:

$$G \frac{Mm}{R_{s_1}^2} = m \frac{v^2}{R_{s_1}} \quad v^2 = G \frac{M}{R_{s_1}} \quad v = \omega_1 \cdot R_{s_1} \quad \omega^2 \cdot R_{s_1}^2 = G \frac{M}{R_{s_1}}$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T_1} \quad \left( \frac{2\pi}{T_1} \right)^2 \cdot R_{s_1}^2 = G \frac{M}{R_{s_1}} \quad G \cdot M = \frac{4\pi^2 R_{s_1}^3}{T_1^2}$$

Sustituyendo en la expresión de g:

$$g = G \frac{M}{R_P^2} = \frac{4\pi^2 \cdot R_{s_1}^3}{R_P^2 \cdot T_1^2} = \frac{4\pi^2 \cdot (4 \times 10^6)^3}{(3 \times 10^6)^2 \cdot (2 \cdot 3600)^2} = 5,42 \text{ m/s}^2$$

- Partiendo de:  $G \cdot M = \frac{4\pi^2 R^3}{T^2}$ , se llega rápidamente a  $\frac{R^3}{T^2} = \frac{G \cdot M}{4\pi^2} = \text{cte}$ , que es la tercera Ley de Kepler, aplicando a los dos satélites:

$$\frac{R_{s_1}^3}{T_1^2} = \frac{R_{s_2}^3}{T_2^2} \quad T_2 = T_1 \cdot \sqrt{\frac{R_{s_2}^3}{R_{s_1}^3}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{4500^3}{4000^3}} = 2,39 \text{ h} \approx 2 \text{ h } 23'$$

**Junio 2013. Pregunta 3A.** Calcule:

- La densidad media del planeta Mercurio, sabiendo que posee un radio de 2440 km y una intensidad de campo gravitatorio en su superficie de  $3,7 \text{ N kg}^{-1}$ .
- La energía necesaria para enviar una nave espacial de 5000 kg de masa desde la superficie del planeta a una órbita en la que el valor de la intensidad de campo gravitatorio sea la cuarta parte de su valor en la superficie.

Dato: Constante de Gravitación Universal,  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ M n}^{-2} \text{ kg}^{-2}$

**Solución.**

$$a. \quad d = \frac{m}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} \quad \text{Donde M es la masa del Mercurio y R su radio, supuesto esférico.}$$

La intensidad de campo gravitatorio, se puede deducir teniendo en cuenta que el peso de un cuerpo en la superficie del planeta es la fuerza con la que atrae el planeta al cuerpo, que en módulo es:

$$P = F_G \quad mg = G \frac{Mm}{R^2} \quad g = G \frac{M}{R^2}$$

Mediante operaciones equivalentes, se transforma el segundo miembro en la densidad.

$$\frac{g}{G \cdot \frac{4}{3}\pi R} = \frac{G \frac{M}{R^2}}{G \cdot \frac{4}{3}\pi R} \quad \frac{3g}{4\pi R G} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} = d \quad d = \frac{3g}{4\pi R G} = \frac{3 \cdot 3,7}{4\pi \cdot 2440 \times 10^3 \cdot 6,67 \times 10^{-11}}$$

$$d = 5427 \text{ kg m}^{-3}$$

b. Teniendo en cuenta que el campo gravitatorio es conservativo, la energía necesaria para poner una nave espacial en órbita será la diferencia de energía mecánica de la nave en la órbita y en la superficie de Mercurio.

$$E_M(\text{órbita}) = E_P + E_c = -G \frac{Mm}{R_1} + \frac{1}{2}mv_1^2$$

Donde  $R_1$  representa el radio de la órbita y  $v_1$  la velocidad de la nave en la órbita. Para calcular  $R_1$  se tiene en cuenta el dato de que la intensidad de campo gravitatorio en la órbita ( $g_1$ ) es la cuarta parte que en la superficie ( $g$ ).

$$g_1 = \frac{1}{4}g : \left\{ \begin{array}{l} g_1 = G \frac{M}{R_1^2} \\ g = G \frac{M}{R^2} \end{array} \right\} : G \frac{M}{R_1^2} = \frac{1}{4} G \frac{M}{R^2}$$

Simplificando:  $R_1 = 2R$

La velocidad de la nave en la órbita se obtiene teniendo en cuenta que la nave describe un movimiento circular uniforme, y por tanto la suma de todas las fuerzas que actúan sobre ella debe ser igual a la fuerza centrípeta que la hace girar.

$$F_G = F_c \quad G \frac{Mm}{R_1^2} = m \frac{v_1^2}{R_1} \quad v_1^2 = G \frac{M}{R_1}$$

Sustituyendo en la expresión de la energía:

$$E_M(\text{órbita}) = E_P + E_c = -G \frac{Mm}{R_1} + \frac{1}{2}mG \frac{M}{R_1} = -\frac{1}{2}G \frac{Mm}{R_1}$$

La energía mecánica en la superficie es:

$$E_M(\text{superficie}) = E_P = -G \frac{Mm}{R}$$

La energía necesaria para poner la nave en órbita es:

$$\Delta E = -\frac{1}{2}G \frac{Mm}{R_1} - \left( -G \frac{Mm}{R} \right) = \{R_1 = 2R\} = -\frac{1}{2}G \frac{Mm}{2R} + G \frac{Mm}{R} = -\frac{1}{4}G \frac{Mm}{R} + G \frac{Mm}{R} = \frac{3}{4}G \frac{Mm}{R}$$

La masa de Mercurio se puede expresar en función de la intensidad de campo gravitatorio en su superficie.

$$g = G \frac{M}{R^2} \quad GM = gR^2$$

$$\Delta E = \frac{3}{4}G \frac{Mm}{R} = \frac{3}{4}gR^2 \frac{m}{R} = \frac{3}{4}gRm = \frac{3}{4} \cdot 3,7 \cdot 2440 \times 10^3 \cdot 5000 = 3,3855 \times 10^{10} \text{ J}$$

**Junio 2013. Pregunta 5B.-** Urano es un planeta que describe una órbita elíptica alrededor del Sol. Razone la veracidad o falsedad de las siguientes afirmaciones:

- El módulo del momento angular, respecto a la posición del Sol, en el afelio es mayor que en el perihelio y lo mismo ocurre con el módulo del momento lineal.
- La energía mecánica es menor en el afelio que en el perihelio y lo mismo ocurre con la energía potencial.

**Solución.**

**a.** De las dos afirmaciones que se proponen, la primera es falsa, el módulo del momento angular del de Urano respecto del sol permanece constante debido a que esta sometido a fuerzas centrales.

$$L = m \cdot v \cdot r = cte$$

La segunda afirmación también es falsa, teniendo en cuenta la constancia del momento angular

$$L = cte = m \cdot v_p \cdot r_p = m \cdot v_a \cdot r_a$$

$$v_p \cdot r_p = v_a \cdot r_a$$

Teniendo en cuenta que el radio del perihelio es menor que el del afelio, la velocidad en el perihelio es mayor que en el afelio, por lo tanto el momento lineal de Urano en el perihelio será mayor que en el afelio

$$\left. \begin{array}{l} p_p = m \cdot v_p \\ p_a = m \cdot v_a \end{array} \right\} : v_p > v_a \Rightarrow p_p > p_a$$

**b.** La primera afirmación es falsa, debido a que Urano en su órbita alrededor del Sol solo está sometido a fuerzas centrales, por lo tanto su energía mecánica es constante.

La segunda afirmación también es falsa, debido al carácter negativo de la energía potencial.

$$E_p(P) = -G \frac{Mm}{r_p} < E_p(A) = -G \frac{Mm}{r_A}$$

**Modelo 2013. Pregunta 1A.-** Un cierto planeta esférico tiene una masa  $M = 1,25 \times 10^{23}$  kg y un radio  $R = 1,5 \times 10^6$  m. Desde su superficie se lanza verticalmente hacia arriba un objeto, el cual alcanza una altura máxima  $h = R/2$ . Despreciando rozamientos, determine:

- La velocidad con que fue lanzado el objeto.
- La aceleración de la gravedad en el punto más alto alcanzado por el objeto.

Datos: Constante de la Gravitación Universal,  $G = 6,67 \times 10^{-11}$  N m<sup>2</sup> kg<sup>-2</sup>

**Solución.**

**a.** El campo gravitatorio, si se desprecian los rozamientos, se puede considerar conservativo, lo cual permite resolver el apartado considerando que la energía mecánica del objeto se conserva. "Energía mecánica en la superficie = Energía mecánica a una altura de  $R/2$  de la superficie"

$$E_p(\text{Superficie}) + E_c(\text{Superficie}) = E_p(h = R/2)$$

$$-G \frac{M \cdot m}{R} + \frac{1}{2} m \cdot v^2 = -G \frac{M \cdot m}{R + h}$$

Simplificando las masas se despeja v.

$$-G \frac{M}{R} + \frac{1}{2} v^2 = -G \frac{M}{R + h} \quad \frac{1}{2} v^2 = G \frac{M}{R} - G \frac{M}{R + h} = GM \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{R + h} \right)$$

$$v = \sqrt{2G \cdot M \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{R + h} \right)} \stackrel{h=R/2}{=} \sqrt{2G \cdot M \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{R + R/2} \right)} = \sqrt{2G \cdot M \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{3R/2} \right)}$$

$$v = \sqrt{\frac{2G \cdot M}{R} \left( 1 - \frac{2}{3} \right)} = \sqrt{\frac{2G \cdot M}{R} \cdot \frac{1}{3}} = \sqrt{\frac{2G \cdot M}{3R}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,67 \times 10^{-11} \cdot 1,25 \times 10^{23}}{3 \cdot 1,5 \times 10^6}} = 1925 \text{ m/s}$$

- b. El peso de un objeto es la fuerza con la que el planeta atrae al objeto.

$$P = F_G \quad mg = G \frac{Mm}{(R+h)^2} \quad g = G \frac{M}{(R+R/2)^2} = G \frac{M}{(3R/2)^2}$$

$$g = G \frac{M}{(3R/2)^2} = 6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{1,25 \cdot 10^{23}}{(3 \cdot 1,5 \times 10^6 / 2)^2} = 1,65 \text{ m/s}^2$$

**Modelo 2013. Pregunta 1B.-** Una nave espacial de 800 kg de masa describe una órbita circular de 6000 km de radio alrededor de un planeta. Sabiendo que la energía mecánica de la nave es  $E_M = -3,27 \times 10^8$  J, determine:

- a) La masa del planeta.  
b) La velocidad angular de la nave en su órbita.

Datos: Constante de la Gravitación Universal,  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

**Solución.**

a. La energía mecánica de un satélite que describe una órbita circular en torno a un planeta es la suma de su energía cinética y de su energía potencial.

$$E_M = E_c + E_p = \frac{1}{2}mv^2 + \left(-G \frac{Mm}{R}\right) = \frac{1}{2}mv^2 - G \frac{Mm}{R}$$

Teniendo en cuenta que si el satélite describe una órbita con movimiento circular uniforme la suma de todas las fuerzas que actúan sobre él debe igual a la fuerza centrípeta:

$$F_G = F_c \quad G \frac{Mm}{R^2} = m \frac{v^2}{R} \quad v^2 = G \frac{M}{R}$$

Sustituyendo la expresión de  $v^2$  en la energía mecánica:

$$E_M = \frac{1}{2}mG \frac{M}{R} - G \frac{Mm}{R} = -\frac{1}{2}G \frac{Mm}{R}$$

De la expresión de la energía mecánica se puede despejar la masa del planeta.

$$M = \frac{-2E_M \cdot R}{Gm} = \frac{-2(-3,27 \times 10^8) \cdot 6000 \times 10^3}{6,67 \times 10^{-11} \cdot 800} = 7,35 \times 10^{22} \text{ kg}$$

- b. El apartado se puede resolver de dos formas diferentes, partiendo de la energía mecánica del satélite o mediante la masa del planeta calculada en el apartado a.

Partiendo de la energía mecánica:

$$E_M = E_c + E_p = \frac{1}{2}mv^2 + \left(-G \frac{Mm}{R}\right)$$

Teniendo en cuenta que  $E_M = -\frac{1}{2}G \frac{Mm}{R} \Rightarrow -G \frac{Mm}{R} = 2E_M$ , sustituyendo:

$$E_M = \frac{1}{2}mv^2 + 2E_M \Rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = -E_M$$

Teniendo en cuenta:  $v = \omega \cdot R$

$$\frac{1}{2}m(\omega \cdot R)^2 = -E_M \quad \omega = \sqrt{\frac{-2E_M}{m \cdot R^2}} = \sqrt{\frac{-2 \cdot (-3,27 \cdot 10^8)}{800 \cdot (6 \times 10^6)^2}} = 1,5 \times 10^{-4} \text{ rad/s}$$

Conocida la masa del planeta y el radio de la órbita, se puede calcular la velocidad angular, partiendo de la expresión de la velocidad en la órbita.

$$\left. \begin{array}{l} v^2 = G \frac{M}{R} \\ v = \omega \cdot R \end{array} \right\} : (\omega \cdot R)^2 = G \frac{M}{R} \quad \omega^2 = G \frac{M}{R^3} \quad \omega = \sqrt{G \frac{M}{R^3}}$$

$$\omega = \sqrt{6,67 \times 10^{-11} \frac{7,35 \times 10^{22}}{(6 \times 10^6)^3}} = 1,5 \times 10^{-4} \text{ rad/s}$$

**Septiembre 2012. Pregunta 2A.-** Un satélite artificial de 400 kg describe una órbita circular de radio  $5/2 R_T$  alrededor de la Tierra. Determine:

- El trabajo que hay que realizar para llevar al satélite desde la órbita circular de radio  $5/2 R_T$  a otra órbita circular de radio  $5R_T$  y mantenerlo en dicha órbita.
- El periodo de rotación del satélite en la órbita de radio  $5R_T$ .

Datos: Constante de la Gravitación Universal,  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ ;  
Masa de la Tierra,  $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ ; Radio de la Tierra,  $R_T = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$

**Solución.**

- Por estar el satélite inmerso en un campo conservativo, la energía mecánica se debe conservar.

$$E_m = W + (E_c + E_p)_{\text{órbita 1}} = (E_c + E_p)_{\text{órbita 2}}$$

El trabajo necesario se puede despejar de la segunda igualdad

$$W = (E_c + E_p)_{\text{órbita 2}} - (E_c + E_p)_{\text{órbita 1}}$$

$$E_c + E_p = \frac{1}{2}mv^2 - G \frac{Mm}{R}$$

La velocidad del satélite en la órbita se puede calcular teniendo en cuenta que el satélite orbita en torno a la Tierra con movimiento circular uniforme, por tanto, la suma de todas las fuerzas que actúan sobre el satélite deben ser igual a la fuerza centrípeta que le hace girar. En módulo:

$$F_G = F_c \quad G \frac{Mm}{R^2} = m \frac{v^2}{R} \quad v^2 = G \frac{M}{R}$$

Sustituyendo en la expresión anterior se obtiene la suma de las energías cinética y potencial

$$E_c + E_p = \frac{1}{2}mv^2 - G \frac{Mm}{R} = \frac{1}{2}m \cdot G \frac{M}{R} - G \frac{Mm}{R} = \frac{1}{2}G \frac{Mm}{R} - G \frac{Mm}{R} = -\frac{1}{2}G \frac{Mm}{R}$$

Sustituyendo en la expresión del trabajo:

$$\begin{aligned} W &= (E_c + E_p)_{\text{órbita 2}} - (E_c + E_p)_{\text{órbita 1}} = -\frac{1}{2}G \frac{Mm}{R_2} - \left( -\frac{1}{2}G \frac{Mm}{R_1} \right) = \frac{1}{2}GMm \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \\ &= \frac{1}{2}GMm \left( \frac{1}{5/2R_T} - \frac{1}{5R_T} \right) = \frac{1}{2}GMm \left( \frac{2}{5R_T} - \frac{1}{5R_T} \right) = \frac{1}{2}GMm \frac{1}{5R_T} = G \frac{Mm}{10R_T} \\ W &= G \frac{Mm}{10R_T} = 6,67 \times 10^{-11} \times \frac{5,98 \times 10^{24} \cdot 400}{10 \cdot 6,37 \times 10^6} = 2,5 \times 10^9 \text{ J} \end{aligned}$$

- El periodo del satélite en la nueva órbita se puede calcular partiendo de la expresión de la velocidad deducida en el apartado anterior.

$$\left. \begin{aligned} v^2 &= G \frac{M}{R} \\ v &= \omega \cdot R \end{aligned} \right\} : (\omega \cdot R)^2 = G \frac{M}{R} ; \omega^2 = G \frac{M}{R^3}$$

$$\left. \begin{aligned} \omega^2 &= G \frac{M}{R^3} \\ \omega &= \frac{2\pi}{T} \end{aligned} \right\} : \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 = G \frac{M}{R^3} ; T^2 = \frac{4\pi^2 R^3}{GM} ; T = \sqrt{\frac{4\pi^2 R^3}{GM}}$$

Para  $R = 5R_T$

$$T = \sqrt{\frac{4\pi^2 (5R_T)^3}{GM}} = \sqrt{\frac{500\pi^2 R_T^3}{GM}} = \sqrt{\frac{500\pi^2 (6,37 \times 10^6)^3}{6,67 \times 10^{-11} \cdot 5,98 \times 10^{24}}} = 56550 \text{ s} = 15 \text{ h } 42' 30''$$



**Septiembre 2012. Pregunta 2B.-** La aceleración de la gravedad en la Luna es 0,166 veces la aceleración de la gravedad en la Tierra y el radio de la Luna es 0,273 veces el radio de la Tierra. Despreciando la influencia de la Tierra y utilizando exclusivamente los datos aportados, determine:

- La velocidad de escape de un cohete que abandona la Luna desde su superficie.
- El radio de la órbita circular que describe un satélite en torno a la Luna si su velocidad es de  $1,5 \text{ km s}^{-1}$ .

Datos: Constante de la Gravitación Universal,  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ ;  
Masa de la Tierra,  $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ ; Radio de la Tierra,  $R_T = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$

**Solución.**

a. Para que un cohete escape de la luna, y teniendo en cuenta que el campo gravitatorio es conservativo, la energía mecánica en la superficie de la Luna debe ser igual a la energía mecánica en el infinito, que es nula.

$$E_m(\text{Luna}) = E_m(\infty) = 0$$

$$E_c(\text{Superficie lunar}) + E_p(\text{Superficie lunar}) = 0$$

$$\frac{1}{2}mv_e^2 + \left(-G \frac{M_L m}{R_L}\right) = 0 \quad ; \quad \frac{1}{2}mv_e^2 = G \frac{M_L m}{R_L} \quad ; \quad v_e = \sqrt{2G \frac{M_L}{R_L}}$$

Para calcular la Masa lunar, se utiliza la relación entre la gravedad en la Luna y en la Tierra.

$$P = F_G \quad ; \quad mg_L = G \frac{M_L m}{R_L^2} \quad ; \quad g_L = G \frac{M_L}{R_L^2} \quad ; \quad GM_L = g_L R_L^2$$

Sustituyendo en la expresión de la velocidad de escape:

$$v_e = \sqrt{2G \frac{M_L}{R_L}} = \sqrt{2 \frac{g_L R_L^2}{R_L}} = \sqrt{2g_L \cdot R_L}$$

$$v_e = \sqrt{2g_L \cdot R_L} = \left\{ \begin{array}{l} g_L = 0,166g_T \\ R_L = 0,273R_T \end{array} \right\} = \sqrt{2 \cdot 0,166g_T \cdot 0,273R_T} = \sqrt{9,06 \times 10^{-2} g_T \cdot R_T}$$

$$v_e = \sqrt{9,06 \times 10^{-2} g_T \cdot R_T} = \sqrt{9,06 \times 10^{-2} \cdot 9,8 \cdot 6,37 \times 10^6} \approx 2379 \text{ m/s}$$

b. Para que un satélite describa una órbita con movimiento circular uniforme, la suma de todas las fuerzas que actúan sobre él debe ser igual a su fuerza centrípeta.

Si la órbita tiene un radio R:

$$F_G = F_c \quad ; \quad G \frac{M_L m}{R^2} = m \frac{v^2}{R} \quad ; \quad v^2 = G \frac{M_L}{R} \quad ; \quad R = G \frac{M_L}{v^2} = \frac{g_L \cdot R_L^2}{v^2}$$

$$R = \frac{g_L \cdot R_L^2}{v^2} = \left\{ \begin{array}{l} g_L = 0,166g_T \\ R_L = 0,273R_T \end{array} \right\} = \frac{0,166g_T \cdot (0,273R_T)^2}{v^2} = \frac{1,24 \cdot 10^{-2} g_L \cdot R_L^2}{v^2}$$

$$R = \frac{1,24 \cdot 10^{-2} g_L \cdot R_L^2}{v^2} = \frac{1,24 \cdot 10^{-2} \cdot 9,8 \cdot (6,37 \times 10^6)^2}{(1,5 \times 10^3)^2} = 2,19 \times 10^6 \text{ m}$$

**Junio 2012. Pregunta 1A.-** Un satélite de masa m gira alrededor de la Tierra describiendo una órbita circular a una altura de  $2 \cdot 10^4 \text{ km}$  sobre su superficie.

- Calcule la velocidad orbital del satélite alrededor de la Tierra.
- Suponga que la velocidad del satélite se anula repentina e instantáneamente y éste empieza a caer sobre la Tierra, calcule la velocidad con la que llegaría el satélite a la superficie de la misma. Considere despreciable el rozamiento del aire.

**Datos:** Constante de la Gravitación Universal,  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$ , Masa de la Tierra,  $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ , Radio de la Tierra,  $R_T = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$

**Solución.**

a. Para que un satélite gire en torno a un planeta en una órbita circular, la suma de todas las fuerzas que actúan sobre el tiene que ser igual a la fuerza centrípeta.

$$\vec{F}_G = \vec{F}_c \text{ En módulo } F_G = G \frac{M_T m}{R^2} = m \frac{v^2}{R} = F_c$$

Simplificando la igualdad y sustituyendo por los datos del enunciado se obtiene la velocidad orbital.

$$G \frac{M}{R_T + h} = v^2 \quad v = \sqrt{G \frac{M_T}{R_T + h}} = \sqrt{6,67 \times 10^{-11} \frac{5,98 \times 10^{24}}{6,37 \times 10^6 + 20 \times 10^6}} = 3889 \text{ m/s}$$

- b. Suponiendo que no hay pérdida de energía por rozamiento, la energía mecánica se conserva.  
 $\Delta E_m = 0 \quad E_m(\text{órbita}) - E_m(\text{superficie}) = 0 \quad E_m(\text{órbita}) = E_m(\text{superficie})$

$$E_p(\text{órbita}) + \underbrace{E_c(\text{órbita})}_0 = E_p(\text{superficie}) + E_c(\text{superficie})$$

$$-G \frac{M_T m}{R_T + h} = -G \frac{M_T m}{R_T} + \frac{1}{2} m v^2 \quad \frac{1}{2} v^2 = G \frac{M_T}{R_T} - G \frac{M_T}{R_T + h} \quad v^2 = 2GM_T \left( \frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_T + h} \right)$$

Despejando y sustituyendo por los datos se obtiene la velocidad en la superficie

$$v = \sqrt{2GM_T \left( \frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_T + h} \right)} = \sqrt{2 \cdot 6,67 \times 10^{-11} \cdot 5,98 \times 10^{24} \left( \frac{1}{6,37 \times 10^6} - \frac{1}{6,37 \times 10^6 + 20 \times 10^6} \right)} = 9746 \text{ m/s}$$

**Junio 2012. Pregunta 1B.-** Una nave espacial de 3000 kg de masa describe, en ausencia de rozamiento, una órbita circular en torno a la Tierra a una distancia de  $2,5 \times 10^4$  km de su superficie. Calcule:

- a) El período de revolución de la nave espacial alrededor de la Tierra.  
 b) Las energías cinética y potencial de la nave en dicha órbita.

Datos: Constante de la Gravitación Universal,  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ . Masa de la Tierra,  $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ , Radio de la Tierra,  $R_T = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$

**Solución.**

- a. Para que una nave espacial gire en torno a un planeta en una órbita circular, la suma de todas las fuerzas que actúan sobre el tiene que ser igual a la fuerza centrípeta.

$$\vec{F}_G = \vec{F}_c \text{ En módulo } \begin{cases} F_G = G \frac{M_T m}{R^2} \\ F_c = m \frac{v^2}{R} \end{cases} \quad G \frac{M_T m}{R^2} = m \frac{v^2}{R} \quad v^2 = G \frac{M_T}{R_{\text{Orb}}}$$

$$\begin{cases} v^2 = G \frac{M_T}{R_{\text{Orb}}} \\ v = \omega R_{\text{Orb}} \end{cases} \quad (\omega R_{\text{Orb}})^2 = G \frac{M_T}{R_{\text{Orb}}} \quad \omega^2 = G \frac{M_T}{R_{\text{Orb}}^3}$$

$$\begin{cases} \omega^2 = G \frac{M_T}{R_{\text{Orb}}^3} \\ \omega = \frac{2\pi}{T} \end{cases} \quad \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 = G \frac{M_T}{R_{\text{Orb}}^3} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{R_{\text{Orb}}^3}{G M_T}}$$

$$R_{\text{Orb}} = R_T + h = 6,37 \times 10^6 + 25 \times 10^6 = 31,37 \times 10^6 \text{ m}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{(31,37 \times 10^6)^3}{6,67 \times 10^{-11} \cdot 5,98 \times 10^{24}}} = 55276 \text{ s} \approx 15 \text{ h } 21' 16''$$

- b. Energía potencial  $E_p = -G \frac{M_T m}{R_{\text{Orb}}} = -6,67 \times 10^{-11} \frac{5,98 \times 10^{24} \cdot 3000}{31,37 \times 10^6} = -3,81 \times 10^{10} \text{ J}$

$$\text{Energía cinética } E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \left( v^2 = G \frac{M_T}{R_{\text{Orb}}} \right) = \frac{1}{2}G \frac{M_T m}{R_{\text{Orb}}} = -\frac{1}{2}E_p = -\frac{1}{2}(-3,81 \times 10^{10}) = 1,91 \times 10^{10} \text{ J}$$

**Modelo 2012. Pregunta 1A.-** Se ha descubierto un planeta esférico de 4100 km de radio y con una aceleración de la gravedad en su superficie de  $7,2 \text{ m s}^{-2}$ .

- Calcule la masa del planeta.
- Calcule la energía mínima necesaria que hay que comunicar a un objeto de 3 kg de masa para lanzarlo desde la superficie del planeta y situarlo a 1000 km de altura de la superficie, en una órbita circular en torno al mismo.

**Dato:** Constante de Gravitación  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ .

**Solución.**

**a.** La masa de un planeta se puede calcular conocida su gravedad y su radio teniendo en cuenta que en su superficie, el peso de un cuerpo es la fuerza con la que el planeta lo atrae.

$$P = F_G$$

$$mg = G \frac{M \cdot m}{R^2} ; g = G \frac{M}{R^2} ; M = \frac{g \cdot R^2}{G}$$

$$M = \frac{7,2 \text{ m s}^{-2} \cdot (4,1 \times 10^6)^2}{6,67 \times 10^{-11}} = 1,81 \times 10^{24} \text{ kg}$$

**b.** La energía necesaria para lanzar un satélite desde la superficie de un planeta y situarlo en órbita, es la diferencia entre la energía mecánica que tiene en la órbita y la que tiene en la superficie del planeta.

$$\Delta E = E(\text{Órbita}) - E(\text{Superficie})$$

La energía mecánica de un satélite en órbita es la suma de su energía cinética y su energía potencial.

$$E_m(\text{Órbita}) = E_c + E_p = \frac{1}{2}mv^2 + \left( -G \frac{M \cdot m}{R} \right)$$

Donde R es el radio de la órbita

Para calcular la velocidad del satélite en la órbita, se iguala la fuerza centrípeta con la gravitatoria

$$\begin{aligned} |\vec{F}_g| &= |\vec{F}_c| \\ G \cdot \frac{M \cdot m}{R^2} &= m \cdot \frac{v^2}{R} \Rightarrow v^2 = G \cdot \frac{M}{R} \end{aligned}$$

Sustituyendo en la expresión de la energía:

$$E_m(\text{Órbita}) = \frac{1}{2}m \cdot G \frac{M}{R} + \left( -G \frac{M \cdot m}{R} \right) = \frac{1}{2}G \frac{M \cdot m}{R} - G \frac{M \cdot m}{R} = -\frac{1}{2}G \frac{M \cdot m}{R}$$

En la superficie del planeta, la energía mecánica es únicamente potencial.

$$E_m(\text{Superficie}) = E_p = -G \frac{M \cdot m}{R_P}$$

Donde  $R_P$  es el radio del planeta.

Sustituyendo en la primera expresión se obtiene la energía necesaria para lanzar un satélite desde la superficie del planeta.

$$\Delta E = E(\text{Órbita}) - E(\text{Superficie}) = -\frac{1}{2}G \frac{M \cdot m}{R} - \left( -G \frac{M \cdot m}{R_P} \right) = -G \cdot M \cdot m \cdot \left( \frac{1}{2R} - \frac{1}{R_P} \right)$$

$$\Delta E = -6,67 \times 10^{-11} \cdot 1,81 \times 10^{24} \cdot 3 \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 5,1 \times 10^6} - \frac{1}{4,1 \times 10^6} \right) = 5,28 \times 10^7 \text{ J}$$

**Modelo 2012. Pregunta 1B.-** Un satélite artificial está situado en una órbita circular en torno a la Tierra a una altura de su superficie de 2500 km. Si el satélite tiene una masa de 1100 kg:

- Calcule la energía cinética del satélite y su energía mecánica total.
- Calcule el módulo del momento angular del satélite respecto al centro de la Tierra.

**Datos:** Constante de Gravitación  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ ; Radio de la Tierra = 6370 km.; Masa de la Tierra =  $5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ .

**Solución.**

a. Por definición:

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2$$

Para calcular la velocidad del satélite en su órbita, se tiene en cuenta que para que el satélite orbite entorno a la Tierra, la suma de todas las fuerzas que actúan sobre él deben ser igual a la fuerza centrípeta a la que se ve sometido el satélite.

$$F_G = F_c$$

$$G \frac{M_T m}{R_{\text{Orb}}^2} = m \frac{v^2}{R_{\text{Orb}}} ; v^2 = G \frac{M_T}{R_{\text{Orb}}}$$

La energía cinética del satélite en la órbita queda:

$$E_c = \frac{1}{2} m G \frac{M_T}{R_{\text{Orb}}} = \frac{1}{2} G \frac{M_T m}{R_{\text{Orb}}} = \frac{1}{2} 6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \times 10^{24} \cdot 2500}{(6370 + 2500) \times 10^3} = 2,47 \times 10^{10} \text{ J}$$

La energía mecánica del satélite es la suma de la energía cinética y la energía potencial.

$$E_m = E_c + E_p = \frac{1}{2} G \frac{M_T m}{R_{\text{Orb}}} + \left( -G \frac{M_T m}{R_{\text{Orb}}} \right) = -\frac{1}{2} G \frac{M_T m}{R_{\text{Orb}}} = -2,47 \times 10^{10} \text{ J}$$

b. Por definición:

$$\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v}$$

En módulo:

$$L = r \cdot mv \sin \alpha$$

Siendo  $\alpha$  el ángulo que forma el radio y la velocidad, que por ser una órbita circular es de  $90^\circ$ , teniendo en cuenta que la velocidad es tangencial a la trayectoria.

$$L = r \cdot mv \sin 90^\circ = r \cdot mv$$

Teniendo en cuenta que  $v^2 = G \frac{M_T}{R_{\text{Orb}}}$

$$v = \sqrt{G \frac{M_T}{R_{\text{Orb}}}} = \sqrt{6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \times 10^{24}}{8870 \times 10^3}} = 6705,8 \text{ m/s}$$

Sustituyendo en la expresión del módulo:

$$L = r \cdot mv = 8870 \times 10^3 \text{ m} \cdot 1100 \text{ kg} \cdot 6705,8 \text{ m/s} = 6,54 \times 10^{13} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$$

**Septiembre 2011. Cuestión 1A.-**

- Expresar la aceleración de la gravedad en la superficie de un planeta en función de la masa del planeta, de su radio y de la constante de gravitación universal  $G$ .
- Si la aceleración de la gravedad sobre la superficie terrestre vale  $9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , calcule la aceleración de la gravedad a una altura sobre la superficie terrestre igual al radio de la Tierra.

**Solución.**

a. El peso de un cuerpo es la fuerza con la que la Tierra lo atrae. Trabajando en módulo

$$P = F_g ; mg_o = G \frac{M_T m}{R_T^2} ; g_o = G \frac{M_T}{R_T^2}$$

$g_o \equiv$  aceleración de la gravedad en la superficie terrestre.

- b. La aceleración de la gravedad a una altura igual al radio de la Tierra es:

$$g = G \frac{M_T}{R^2} ; R = 2R_T ; g = G \frac{M_T}{(2R_T)^2} = G \frac{M_T}{4R_T^2} = \frac{1}{4} G \frac{M_T}{R_T^2} = \frac{1}{4} g_o = \frac{1}{4} 9,8 = 2,46 \text{ m s}^{-2}$$

**Septiembre 2011. Problema 1B.-** Una sonda espacial de masa  $m = 1000 \text{ kg}$  se encuentra situada en una órbita circular alrededor de la Tierra de radio  $r = 2,26 \times R_T$ , siendo  $R_T$  el radio de la Tierra.

- Calcule la velocidad de la sonda en esa órbita.
- ¿Cuánto vale su energía potencial?
- ¿Cuánto vale su energía mecánica?
- ¿Qué energía hay que comunicar a la sonda para alejarla desde dicha órbita hasta el infinito?

**Datos:** Masa de la Tierra  $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ .

Radio de la Tierra  $R_T = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$ .

Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ .

**Solución.**

- a. Para que una masa realice una órbita circular en torno a la tierra, se debe cumplir:

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_c$$

Trabajando en módulo y teniendo en cuenta que la única fuerza que actúa sobre la sonda es la fuerza gravitacional:

$$F_g = F_c ; G \frac{M_T m}{R^2} = m \frac{v^2}{R} ; v = \sqrt{G \frac{M_T}{R}}$$

$$v = \sqrt{6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \times 10^{24}}{2,26 \cdot 6,37 \times 10^6}} \approx 5264 \text{ m/s}$$

b.  $E_p = -G \frac{M_T m}{R} = -6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \times 10^{24} \cdot 1000}{2,26 \cdot 6,37 \times 10^6} = -2,77 \times 10^{10} \text{ J}$

c.  $E_m = E_c + E_p = \frac{1}{2} m v^2 - G \frac{M m}{R} = \frac{1}{2} m \left( \sqrt{G \frac{M}{R}} \right)^2 - G \frac{M m}{R} = -G \frac{M m}{2R} = \frac{1}{2} E_p$

$$E_m = \frac{1}{2} (-2,77 \times 10^{10}) = -1,385 \times 10^{10} \text{ J}$$

- d.  $\Delta E = E_m(\text{inf}) - E_m(\text{órbita})$ . Teniendo en cuenta que la energía mecánica en el infinito es nula:

$$\Delta E = 0 - (-1,385 \times 10^{10}) = 1,385 \times 10^{10} \text{ J}$$

**Junio 2011. Cuestión 1.-** Un satélite que gira con la velocidad angular de la tierra (geoestacionario) de masa  $m = 5 \times 10^3 \text{ kg}$ , describe una órbita circular de radio  $r = 3,6 \times 10^7 \text{ m}$ . Determine:

- La velocidad areolar del satélite.
- Suponiendo que el satélite describe una órbita en el plano ecuatorial de la tierra, determine el módulo, la dirección y el sentido del momento angular respecto de los polos de la Tierra.

**Dato:** Periodo de rotación terrestre = 24 h

**Solución.**

**ACLARACIONES PREVIAS:** En el enunciado del problema no coincide el dato del radio de la órbita del satélite con su condición de geoestacionario ( $R(\text{Geoestacionario}) = 4,23 \times 10^7 \text{ m}$ ). A un radio de  $3,6 \times 10^7 \text{ m}$  le corresponde un periodo de 18 horas 53 minutos aproximadamente. Tampoco aparece entre los datos del enunciado el radio de la tierra, imprescindible para calcular la distancia del satélite al Polo.

En nuestra opinión, el alumno debe usar el dato del radio terrestre que dan en el problema 1b, y no cuestionar la viabilidad de los datos del enunciado, utilizándolos sin ningún problema.

- a. Velocidad areolar  $\equiv$  área barrida por el radiovector en la unidad de tiempo.

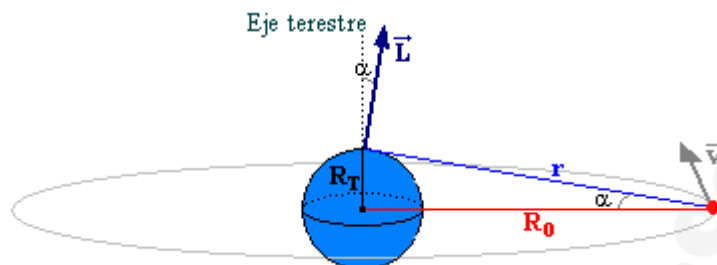
$$\vec{v}_a = \frac{d\vec{s}}{dt}$$

Para una órbita circular, será el área barrida en un ciclo completo dividida por el período:

$$v_a = \frac{A}{T} = \frac{\pi \cdot R_{ORB}^2}{T} = \frac{\pi \cdot (3,6 \cdot 10^7)^2}{24 \cdot 3600} = 4,71 \cdot 10^{10} \text{ m}^2/\text{s}$$

b. Momento angular respecto de los Polos:

$$\vec{L} = \vec{r} \times m \cdot \vec{v} \quad \begin{cases} r \equiv \text{distancia del satélite al Polo} \\ v \equiv \text{velocidad lineal} \end{cases}$$



Teniendo en cuenta que  $\vec{r}$  y  $\vec{v}$  son perpendiculares, el módulo del momento angular es:

$$L = r \cdot m \cdot v$$

El valor de  $r$  se obtiene del triángulo rectángulo que forman el radio de la Tierra ( $R_T$ ), el radio de la órbita ( $R_O$ ) y el radiovector ( $r$ ).

$$r^2 = R_T^2 + R_O^2 \Rightarrow r = \sqrt{(6,37 \cdot 10^6)^2 + (3,6 \cdot 10^7)^2} = 3,65 \cdot 10^7 \text{ m}$$

La velocidad del satélite se calcula a partir del período orbital y el radio de la órbita.

$$v = \omega \cdot R_O = \frac{2\pi}{T} \cdot R_O = \frac{2\pi}{24 \cdot 3600} \cdot 3,6 \cdot 10^7 = 2620 \text{ m/s}$$

Sustituyendo en la expresión se obtiene el módulo del momento angular

$$L = 3,65 \cdot 10^7 \cdot 5000 \cdot 2620 = 4,78 \cdot 10^{14} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

La dirección será perpendicular al plano determinado por  $\vec{r}$  y  $\vec{v}$ , siendo  $\alpha$  el ángulo que formará la dirección de  $\vec{L}$  con el eje de la Tierra.

$$\text{tg} \alpha = \frac{R_T}{R_O} \Rightarrow \alpha = \text{arctg} \frac{6,37 \cdot 10^6}{3,6 \cdot 10^7} = 10^\circ$$

El sentido lo marca la regla del sacacorchos.

**Junio 2011. Problema 1B.-** Sabiendo que el período de revolución lunar es de 27,32 días y que el radio de su órbita es  $R_L = 3,84 \times 10^8 \text{ m}$ , calcule:

- La constante de gravitación universal,  $G$  (obtener un valor a partir de los datos del problema).
- La fuerza que la luna ejerce sobre la tierra y la de la tierra sobre la Luna.
- El trabajo necesario para llevar un objeto de 5000 kg desde la Tierra hasta la luna. (Despreciar los radios de la tierra de la Tierra y de la Luna, en comparación con su distancia)
- Si un satélite se sitúa entre la tierra y la Luna a una distancia de la tierra de  $R_L/4$ , ¿Cuál es la relación de fuerzas debidas a la Tierra y a la Luna?

**Datos:** Masa de la Tierra  $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ ; masa de la Luna  $M_L = 7,35 \times 10^{22} \text{ kg}$ ; Radio de la tierra  $6,37 \times 10^6 \text{ m}$ ; radio de la Luna  $1,74 \times 10^6 \text{ m}$ .

**Solución.**

a. Para que la Luna orbite alrededor de la Tierra, se debe cumplir:

$$F_G = F_C$$

$$G \frac{M_T \cdot m_L}{r^2} = \frac{m_L v^2}{r} ; G \frac{M_T}{r^2} = \frac{(\omega \cdot r)^2}{r} ; G \frac{M_T}{r^2} = \omega^2 r ; G = \frac{\omega^2 r^3}{M_T} ; G = \frac{4\pi^2 r^3}{T^2 M_T}$$

$$G = \frac{4\pi^2(3,84 \cdot 10^8)^3}{(27,32 \cdot 24 \cdot 3600)^2 \cdot 5,98 \times 10^{24}} = 6,71 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$$

b. Las dos fuerzas son de igual módulo dirección y sentidos opuestos, son parejas de fuerza de acción-reacción.

$$F = G \frac{M_T \cdot m_L}{d^2} = 6,71 \times 10^{-11} \frac{5,98 \times 10^{24} \cdot 7,35 \times 10^{22}}{(3,84 \times 10^8)^2} = 2 \times 10^{20} \text{ N}$$

c. Por tratarse de fuerzas conservativas:

$$W = -\Delta E_P = -(E_P(L) - E_P(T))$$

Para calcular la energía potencial en la superficie de la Luna y en la superficie de la tierra habrá que sumar los potenciales que genera cada masa en esos puntos.

$$\begin{aligned} E_P(L) &= -G \frac{M_L \cdot m}{R_L} + \left( -G \frac{M_T \cdot m}{d_{T-L}} \right) = -Gm \left( \frac{M_L}{R_L} + \frac{M_T}{d_{T-L}} \right) = \\ &= -6,71 \times 10^{-11} \cdot 5000 \cdot \left( \frac{7,35 \times 10^{22}}{1,74 \times 10^6} + \frac{5,98 \times 10^{24}}{3,84 \times 10^8} \right) = -1,93 \times 10^{10} \text{ J} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_P(T) &= -G \frac{M_T \cdot m}{R_T} + \left( -G \frac{M_L \cdot m}{d_{T-L}} \right) = -Gm \left( \frac{M_T}{R_T} + \frac{M_L}{d_{T-L}} \right) = \\ &= -6,71 \times 10^{-11} \cdot 5000 \cdot \left( \frac{5,98 \times 10^{24}}{6,37 \times 10^6} + \frac{7,35 \times 10^{22}}{3,84 \times 10^8} \right) = -3,15 \times 10^{11} \text{ J} \end{aligned}$$

$$W = -\Delta E_P = -(-1,93 \times 10^{10} - (-3,15 \times 10^{11})) = -2,96 \times 10^{11} \text{ J}$$

El signo negativo indica que para llevar el objeto de la superficie terrestre a la superficie lunar habrá que realizar un trabajo de  $2,96 \times 10^{11} \text{ J}$ .

d. Se pide comparar (dividir) la fuerza que ejerce la Tierra sobre el satélite con la que ejerce la Luna.

$$\frac{F_T}{F_L} = \frac{G \frac{M_T m}{d_1^2}}{G \frac{M_L m}{d_2^2}} = \frac{M_T \cdot d_2^2}{M_L \cdot d_1^2}$$

$$d_1 = \text{distancia del satélite a la Tierra} = \frac{R_L}{4}$$

$$d_2 \equiv \text{distancia del satélite a la Luna} = \frac{3R_L}{4}$$

$$\frac{F_T}{F_L} = \frac{M_T \cdot \left(\frac{3R_L}{4}\right)^2}{M_L \cdot \left(\frac{R_L}{4}\right)^2} = 3^2 \frac{M_T}{M_L} = 9 \cdot \frac{5,98 \times 10^{24}}{7,35 \times 10^{22}} \approx 732$$

La fuerza de atracción que ejerce la tierra sobre el satélite es 732 veces mayor que la que ejerce la luna sobre él.

**Modelo 2011. Problema 1A.** Un planeta orbita alrededor de una estrella de masa  $M$ . La masa del planeta es  $10^{24}$  Kg y su órbita es circular de radio  $r = 10^8$  Km y periodo 3 años terrestres. Determinar:  
 Datos: Constante de Gravitación Universal  $6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$

- La masa de la estrella.
- La energía mecánica del planeta.
- El módulo del momento angular del planeta respecto al centro de la estrella.
- La velocidad angular de un segundo planeta que describiese una órbita circular de radio igual a 2 r alrededor de la estrella.

**Solución.**

a. Para que un planeta realice una órbita circular en torno a una estrella, se debe cumplir:

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_c$$

Trabajando en módulo y teniendo en cuenta que la única fuerza que actúa sobre la sonda es la fuerza gravitacional:

$$F_g = F_c ; G \frac{M_{\text{Estrella}} m_{\text{Planeta}}}{r^2} = m_{\text{Planeta}} \frac{v^2}{r} ; v^2 = G \frac{M_{\text{Estrella}}}{r}$$

Teniendo en cuenta que  $v = \frac{2\pi r}{T}$

$$\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2 = G \frac{M_{\text{Estrella}}}{r} \quad M_{\text{Estrella}} = \frac{4\pi^2 r_{\text{órbita}}^3}{T^2 G}$$

$$M_{\text{Estrella}} = \frac{4\pi^2 \cdot (10^{11})^3}{(3 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600)^2 \cdot 6,67 \times 10^{-11}} = 6,61 \times 10^{28} \text{ kg}$$

b.  $E_m = E_c + E_p = \frac{1}{2} m v^2 - G \frac{Mm}{r} = \frac{1}{2} m \left(\sqrt{G \frac{M}{r}}\right)^2 - G \frac{Mm}{r} = -G \frac{Mm}{2r}$

$$E_m = -6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{6,61 \times 10^{28} \cdot 10^{24}}{2 \cdot 10^{11}} = -2,2 \times 10^{31} \text{ J}$$

c.  $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m\vec{v} \quad L = r \cdot m v \cdot \text{sen } \alpha$

Por tratarse de una órbita circular,  $\vec{r} \perp \vec{v} \Rightarrow \alpha = 90^\circ$ ,  $\text{sen } 90^\circ = 1$

$$L = r \cdot m v = r \cdot m \frac{2\pi r}{T} = \frac{2\pi r^2 m}{T} = \frac{2\pi \cdot (10^{11})^2 \cdot 10^{24}}{3 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} = 6,64 \times 10^{38} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$$

d. Por definición:  $\omega = \frac{2\pi}{T}$

El periodo de la nueva órbita se puede calcular mediante la 3ª ley de Kepler.

$$\frac{T_1^2}{r_1^3} = \frac{T_2^2}{r_2^3} \quad T_2 = T_1 \cdot \sqrt{\frac{r_2^3}{r_1^3}} = \{r_2 = 2r_1\} = T_2 = T_1 \cdot \sqrt{\frac{(2r_1)^3}{r_1^3}} = T_1 \cdot \sqrt{8} = 3 \cdot \sqrt{8} = 8,49 \text{ años}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{8,49 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} = 2,35 \times 10^{-8} \text{ rad/s}$$

**Modelo 2011. Cuestión 1B.** Dos satélites de masas  $m_A$  y  $m_B$  describen sendas órbitas circulares alrededor de la Tierra, siendo sus radios orbitales  $R_A$  y  $R_B$  respectivamente. Conteste razonadamente a las siguientes preguntas:

- Si  $m_A = m_B$  y  $R_A > R_B$ , ¿cuál de los satélites tiene mayor energía cinética?
- Si los dos satélites estuvieran en la misma órbita ( $R_A = R_B$ ) y tuviesen distinta masa ( $m_A < m_B$ ), ¿cuál de los dos tendría mayor energía cinética?

**Solución.**

a.  $E_c = \frac{1}{2} m v^2$

Para calcular la velocidad de un satélite en una órbita se tiene en cuenta que  $F_g = F_c$ .



$$G \frac{Mm}{R^2} = m \frac{v^2}{R} \quad v^2 = G \frac{M}{R}$$

Sustituyendo en la expresión de la energía cinética:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m \cdot G \frac{M}{R} = G \frac{Mm}{2R}$$

La energía cinética del satélite, es inversamente proporcional al radio de la órbita. A mayor órbita, menor energía cinética.

$$R_A > R_B \Rightarrow E_c(A) < E_c(B)$$

El satélite B tiene mayor energía cinética.

- b.** La energía cinética  $\left(E_c = \frac{1}{2}mv^2\right)$ , es directamente proporcional a la masa, a mayor masa, mayor energía cinética.

$$m_A < m_B \Rightarrow E_c(A) < E_c(B)$$

El satélite B tiene mayor energía cinética.

**Septiembre 2010 F.M. Problema 1A.-** Un satélite artificial de 100 kg se mueve en una órbita circular alrededor de la Tierra con una velocidad de 7,5 km/s. Calcule:

- El radio de la órbita.
- La energía potencial del satélite.
- La energía mecánica del satélite.
- La energía que habría que suministrar a este satélite para que cambiara su órbita a otra con el doble de radio.

Datos: Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

Masa de la Tierra  $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ ; Radio de la Tierra  $R_T = 6370 \text{ km}$

**Solución.**

- a.** Para que un satélite orbite en torno a un planeta, la suma de todas las fuerzas que actúan sobre el satélite debe ser igual a la fuerza centrípeta, teniendo en cuenta que la única fuerza que actúa sobre el satélite es la fuerza gravitatoria del planeta, se ha de cumplir:

$$\vec{F}_G = \vec{F}_c$$

Trabajando en módulo, se puede despejar el radio de la órbita en función de la masa del planeta y de la velocidad orbital del satélite.

$$G \frac{M \cdot m}{R^2} = m \frac{v^2}{R} : R = G \cdot \frac{M}{v^2} = 6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \times 10^{24}}{(7,5 \times 10^3)^2} = 7,09 \times 10^6 \text{ m} = 7090 \text{ Km}$$

- b.** La expresión de la energía potencial de un cuerpo sometido a una fuerza central se calcula como la integral de la fuerza respecto de la posición.

$$E_p = \int_0^r \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int_0^r F dr = \int_0^r G \frac{Mm}{r^2} dr = -G \frac{Mm}{r} = -6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \times 10^{24} \cdot 100}{7,09 \times 10^6} = -5,626 \times 10^9 \text{ J}$$

- c.** La energía mecánica de un satélite en órbita en torno a un planeta, es la suma de las energías potencial y cinética del satélite en la órbita.

$$E_m = E_p + E_c = -G \frac{Mm}{r} + \frac{1}{2}mv^2$$

Teniendo en cuenta el apartado a:  $\left(v^2 = G \frac{M}{R}\right)$ :

$$E_m = -G \frac{Mm}{r} + \frac{1}{2}mv^2 = -G \frac{Mm}{r} + \frac{1}{2}mG \frac{M}{r} = -G \frac{Mm}{r} + \frac{1}{2}G \frac{Mm}{r} = -\frac{1}{2}G \frac{Mm}{r} = \frac{1}{2}E_p$$

$$E_m = \frac{1}{2}(-5,626 \times 10^9) = -2,813 \times 10^9 \text{ J}$$

d. La energía que habrá de suministrar al satélite para cambiar de órbita es la diferencia de energía mecánica entre las dos órbitas.

$$\Delta E_m = E_f - E_i = -\frac{1}{2}G \frac{Mm}{r_f} - \left( -\frac{1}{2}G \frac{Mm}{r_i} \right) = -\frac{1}{2}GMm \left( \frac{1}{r_f} - \frac{1}{r_i} \right)$$

Si  $r_i = R$ , entonces  $r_f = 2R$ , quedando la expresión:

$$\Delta E_m = -\frac{1}{2}GMm \left( \frac{1}{2R} - \frac{1}{R} \right) = \frac{1}{4}G \frac{Mm}{R} = \frac{1}{4} \cdot 6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \times 10^{24} \cdot 100}{7,09 \times 10^6} = 1,41 \times 10^9 \text{ J}$$

**Septiembre 2010 F.M. Cuestión 1B.-** Considerando que la órbita de la Luna alrededor de la Tierra es una órbita circular, deduzca:

- La relación entre la energía potencial gravitatoria y la energía cinética de la Luna en su órbita.
- La relación entre el periodo orbital y el radio de la órbita descrita por la Luna.

**Solución.**

a. La energía potencial de un satélite en una órbita circular de radio R viene dada por la expresión:

$$E_p = -G \frac{Mm}{R}$$

La energía cinética por definición es

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Teniendo en cuenta el que en la órbita se cumple que  $\left\{ \begin{array}{l} F_G = F_C \\ G \frac{Mm}{R^2} = m \frac{v^2}{R} \end{array} \right\} : \left( v^2 = G \frac{M}{R} \right) :$

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mG \frac{M}{r} = \frac{1}{2}G \frac{Mm}{r}$$

La relación entre ambas es:

$$\frac{E_p}{E_c} = \frac{-G \frac{Mm}{R}}{\frac{1}{2}G \frac{Mm}{R}} = -2 : E_p = -2E_c$$

b. Partiendo de la expresión de la velocidad del satélite en la órbita se obtiene la relación pedida (tercera ley de Kepler).

$$v^2 = G \frac{M_T}{R} : \{v = \omega R\} : \omega^2 R^2 = G \frac{M_T}{R} : \left\{ \omega = \frac{2\pi}{T} \right\} : \frac{4\pi^2}{T^2} R^2 = G \frac{M_T}{R}$$

Ordenando se obtiene la relación entre el periodo y el radio.

$$\frac{T^2}{R^3} = \frac{4\pi^2}{GM_T}$$

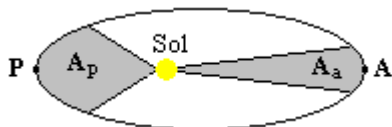
**Septiembre 2010 F.G. Cuestión 1A.-** Un cometa se mueve en una órbita elíptica alrededor del Sol. Explique en qué punto de su órbita, afelio (punto más alejado del Sol) o perihelio (punto más cercano al Sol) tiene mayor valor:

- La velocidad.
- La energía mecánica.

**Solución.**

a. La cuestión se puede resolver por dos vías diferentes.

**1ª Por la ley de áreas.** El área barrida por el radiovector que une el satélite (cometa) con el sol en tiempos iguales, son iguales.



$$A_1 = A_2$$

El área de un sector circular se puede expresar en función del radio y de la longitud del arco de curva.

$$A = \frac{1}{2} s \cdot r$$

Donde s representa la longitud del arco y r el radio.

$$A_p = A_a : \left\{ \begin{array}{l} A_p = \frac{1}{2} s_p \cdot r_p \\ A_a = \frac{1}{2} s_a \cdot r_a \end{array} \right\} : \frac{1}{2} s_p \cdot r_p = \frac{1}{2} s_a \cdot r_a : s_p \cdot r_p = s_a \cdot r_a$$

Teniendo en cuenta que  $s = v \cdot t$

$$v_p \cdot t \cdot r_p = v_a \cdot t \cdot r_a$$

En tiempos iguales los valores de t coinciden

$$v_p \cdot r_p = v_a \cdot r_a$$

Teniendo en cuenta que  $r_p < r_a$ , para que la igualdad se cumpla  $v_p > v_a$

La velocidad del cometa alrededor del Sol aumenta a medida que se aproxima al Sol, alcanzando su valor máximo en la posición del perihelio.

2ª Constancia del momento angular. Debido a que planetas, satélites y cometas se mueven bajo la acción de fuerzas centrales, el momento angular ( $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$ ) del planeta, satélite o cometa es constante en todos los puntos de su trayectoria.

$$\vec{L}_p = \vec{L}_a = \text{cte}$$

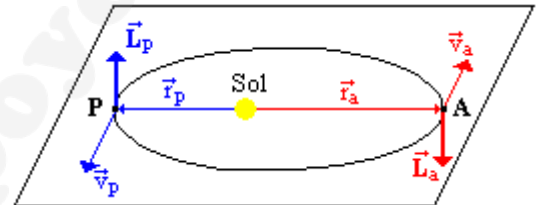
En el perihelio y en el afelio el vector de posición es perpendicular al vector velocidad, cumpliéndose en módulo:

$$r_p \cdot m \cdot v_p \cdot \sin 90^\circ = r_a \cdot m \cdot v_a \cdot \sin 90^\circ$$

$$r_p \cdot v_p = r_a \cdot v_a$$

$$r_p < r_a \Leftrightarrow v_p > v_a$$

Como la órbita no es perpendicular en todo momento al vector de posición a lo largo del cual actúa la fuerza central, se concluye que está fuerza tiene una componente en la dirección de la trayectoria que hace variar el módulo de la velocidad.



**b.** El campo gravitatorio es conservativo y por tanto el trabajo no conservativo es nulo. Teniendo en cuenta que el  $\Delta E_m = W_{\text{no conservativo}} = 0$ , la energía mecánica se conserva por lo que es igual en el afelio que en el perihelio.

**Septiembre 2010 F.G. Cuestión 1B.-** Un asteroide está situado en una órbita circular alrededor de una estrella y tiene una energía total de  $-10^{10}$  J. Determine:

- La relación que existe entre las energías potencial y cinética del asteroide.
- Los valores de ambas energías potencial y cinética.

**Solución.**

**a.** Las energías potencial y cinética de un satélite (asteroide) en su orbita son:

$$\begin{aligned} - E_p &= -G \frac{M \cdot m}{r} \\ - E_c &= \frac{1}{2} m v^2 = \left\{ v^2 = G \frac{M}{r} \right\} = \frac{1}{2} G \frac{M \cdot m}{r} \end{aligned}$$

La relación entre ellas es:

$$\frac{E_p}{E_c} = \frac{-G \frac{M \cdot m}{r}}{\frac{1}{2} G \frac{M \cdot m}{r}} = -2 : \frac{E_p}{E_c} = -2$$

**b.** Con la relación entre las energías cinética y potencial y el valor de la energía mecánica total se plantea un sistema que permite calcular los valores de la energía cinética y de la energía potencial.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{E_p}{E_c} = -2 \\ E_p + E_c = -10^{10} \text{ J} \end{array} \right. \xrightarrow{\text{Resolviendo}} \left\{ \begin{array}{l} E_c = 10^{10} \text{ J} \\ E_p = -2 \cdot 10^{10} \text{ J} \end{array} \right.$$

**Junio 2010 F.M. Cuestión 1A.-**

- a) Deduzca la expresión de la energía cinética de un satélite en órbita circular alrededor de un planeta en función del radio de la órbita y de las masas del satélite y del planeta.
- b) Demuestre que la energía mecánica del satélite es la mitad de su energía potencial.

**Solución.**

- a. La energía cinética se expresa como:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

La velocidad del satélite en su órbita se puede expresar en función de la masa del planeta y del radio de la órbita, teniendo en cuenta que la fuerza de atracción gravitacional es igual a la fuerza centrípeta a la que se ve sometido el satélite en su órbita.

$$F_G = F_c$$

$$G \frac{M \cdot m}{R^2} = m \cdot a_N$$

Teniendo en cuenta que  $a_N = \frac{v^2}{R}$ , se despeja la velocidad.

$$G \frac{M \cdot m}{R^2} = m \cdot \frac{v^2}{R} \quad ; \quad v^2 = G \frac{M}{R}$$

Sustituyendo en la expresión de la energía cinética.

$$E_c = \frac{1}{2} m G \frac{M}{R} = \frac{1}{2} G \frac{M m}{R}$$

- b. La energía mecánica de un satélite es la suma de la energía cinética y la energía potencial.

$$E_m = E_c + E_p$$

Por definición la energía potencial de un satélite en su órbita alrededor de un planeta viene expresado por:

$$E_p = -G \frac{M m}{r}$$

La energía mecánica del satélite será la suma de su energía potencial y cinética.

$$E_m = E_p + E_c = -G \frac{M m}{r} + \frac{1}{2} G \frac{M m}{r} = -\frac{1}{2} G \frac{M m}{r} = \frac{1}{2} \underbrace{\left( -G \frac{M m}{r} \right)}_{E_p} \Rightarrow E_m = \frac{1}{2} \cdot E_p$$

**Junio 2010 F.M. Problema 1B.-** Un satélite de 1000 kg de masa describe una órbita circular de  $12 \times 10^3$  km de radio alrededor de la Tierra. Calcule:

- a) El módulo del momento lineal y el módulo del momento angular del satélite respecto al centro de la Tierra. ¿Cambian las direcciones de estos vectores al cambiar la posición del satélite en su órbita?
- b) El periodo y la energía mecánica del satélite en la órbita.  
*Datos: Masa de la Tierra  $M_T = 5,9 \times 10^{24}$  kg*  
*Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$*

**Solución.**

- a. El momento lineal o cantidad de movimiento es:

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

Su módulo es:

$$p = m \cdot v$$

Por tratarse de un satélite en órbita, su velocidad se puede poner en función de la masa del planeta y del radio de la órbita, teniendo en cuenta que en la órbita se cumple que la fuerza de atracción gravitacional es igual a la fuerza centrípeta.

$$F_G = F_c : G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{v^2}{r} : v = \sqrt{G \frac{M}{r}}$$

Sustituyendo en la expresión del momento lineal:

$$p = m \cdot v = m \cdot \sqrt{G \frac{M}{r}} = 1000 \cdot \sqrt{6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5,9 \times 10^{24}}{12 \times 10^6}} = 5,76 \times 10^6 \text{ kg m s}^{-1}$$

Momento angular:  $\vec{L} = \vec{p} \times \vec{r}$

Módulo del momento angular:  $L = m \cdot v \cdot r \cdot \sin \alpha$

Teniendo en cuenta que el radio y la velocidad son perpendiculares ( $\sin 90 = 1$ ):

$$L = m \cdot v \cdot r = m \cdot r \cdot \sqrt{G \frac{M}{r}} = m \cdot \sqrt{G \cdot M \cdot r} = 1000 \cdot \sqrt{6,67 \times 10^{-11} \cdot 5,9 \times 10^{24} \cdot 12 \times 10^6} = 6,87 \times 10^{13} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$$

La dirección del momento lineal es la dirección de la velocidad, tangente a la trayectoria, y cambia continuamente (en cada punto será tangente a la trayectoria).

La dirección del momento angular es perpendicular al plano de la órbita y se mantiene constante en toda su trayectoria.

**b.** Periodo: Se obtiene de la igualdad entre la fuerza de atracción gravitacional y la fuerza centrípeta.

$$F_G = F_c : G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{v^2}{r} : G \frac{M}{r} = v^2 : v = \omega \cdot r : G \frac{M}{r} = \omega^2 r^2 : \omega = \frac{2\pi}{T} : G \frac{M}{r} = \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 r^2$$

$$G \frac{M}{r} = \frac{4\pi^2}{T^2} r^2 : T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3 \quad \text{3ª Ley de Kepler}$$

$$T = \sqrt{\frac{4\pi^2}{GM} r^3} = \sqrt{\frac{4\pi^2}{6,67 \times 10^{-11} \cdot 5,9 \times 10^{24}} (12 \times 10^6)^3} = 13166 \text{ s}$$

La energía mecánica de un satélite es la suma de la energía cinética y la energía potencial.

$$E_m = E_c + E_p$$

Por definición la energía potencial de un satélite en su órbita alrededor de un planeta viene expresado por:

$$E_p = -G \frac{Mm}{r}$$

Por definición la energía cinética es:

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2 = \left\{ \begin{array}{l} F_G = F_c \\ v^2 = G \frac{M}{r} \end{array} \right\} = \frac{1}{2} m \cdot G \frac{M}{r} = \frac{1}{2} G \frac{Mm}{r}$$

$$\text{Sumando: } E_m = E_p + E_c = -G \frac{Mm}{r} + \frac{1}{2} G \frac{Mm}{r} = -\frac{1}{2} G \frac{Mm}{r}$$

$$E_m = -\frac{1}{2} G \frac{Mm}{r} = -\frac{1}{2} \cdot 6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5,9 \times 10^{24} \cdot 1000}{12 \times 10^6} = -1,64 \times 10^{10} \text{ J}$$

**Junio 2010 F.G. Cuestión 1A.-**

- a) Enuncie la 2ª ley de Kepler. Explique en qué posiciones de la órbita elíptica la velocidad del planeta es máxima y dónde es mínima.
- b) Enuncie la 3ª ley de Kepler. Deduzca la expresión de la constante de esta ley en el caso de órbitas circulares.

**Solución.**

a. 2ª Ley de Kepler. El radio vector que une un planeta y el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales. Esta Ley es el equivalente a la constancia del momento angular ( $\vec{L} = m \cdot \vec{r} \times \vec{v}$ ).

Por ser el momento angular de un planeta en su órbita alrededor del Sol constante (en modulo  $L = m \cdot v \cdot r$ ), cuando el planeta esta más alejado del Sol (afelio), su radio será máximo y su velocidad orbital mínima, mientras que cuando esta más próximo (perihelio), su radio será mínimo y su velocidad será máxima.

b. 3ª Ley de Kepler. Los cuadrados de los periodos son directamente proporcionales a los cubos de los semiejes de las respectivas órbitas.

En una órbita, la fuerza de atracción gravitacional es igual a la fuerza centrípeta.

$$F_G = F_c ; G \frac{M m}{r^2} = m \frac{v^2}{r} ; G \frac{M}{r} = v^2$$

Teniendo en cuenta:  $\left. \begin{matrix} v = \omega r \\ \omega = \frac{2\pi}{T} \end{matrix} \right\} v = \frac{2\pi r}{T}$ . Sustituyendo en la igualdad anterior:

$$G \frac{M}{r} = \left( \frac{2\pi r}{T} \right)^2 ; G \frac{M}{r} = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2} ; \frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G M} = \text{cte}$$

**Junio 2010 F.G. Problema 1B.-** Io, un satélite de Júpiter, tiene una masa de  $8,9 \times 10^{22}$  kg, un periodo orbital de 1,77 días, y un radio medio orbital de  $4,22 \times 10^8$  m, Considerando que la órbita es circular con este radio, determine:

- a) La masa de Júpiter
- b) La intensidad de campo gravitatorio, debida a Júpiter, en los puntos de la órbita de Io.
- c) La energía cinética de Io en su órbita.
- d) El módulo del momento angular de Io respecto de su órbita

Dato: *Constante de Gravitación Universal*  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

**Solución.**

a. Para Calcular la masa del planeta (Júpiter) con los datos del enunciado, se tiene en cuenta que la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre el satélite en orbita, debe ser igual a la fuerza centrípeta que actúa sobre el satélite.

$$F_G = F_c : G \frac{M \cdot m}{R^2} = m \cdot \frac{v^2}{R} : v^2 = G \frac{M}{R}$$

Teniendo en cuenta:  $v = \omega \cdot R$

$$(\omega \cdot R)^2 = G \frac{M}{R} : \omega^2 = G \frac{M}{R^3} : \omega = \frac{2\pi}{T} : \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 = G \frac{M}{R^3} : M = \frac{4\pi^2 R^3}{G \cdot T^2}$$

Según el enunciado:  $T = 1,77 \text{ d} = 1,77 \text{ d} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = 152928\text{s}$

$$M = \frac{4\pi^2 R^3}{G \cdot T^2} = \frac{4\pi^2 \cdot (4,22 \times 10^8 \text{ m})^3}{6,67 \times 10^{-11} \cdot \text{T}^2 \text{ Nm}^2 \text{ Kg}^{-2} \cdot (152928\text{s})^2} = 1,9 \times 10^{27} \text{ Kg}$$

b. La intensidad de campo gravitatorio se obtiene igualando la fuerza gravitacional al peso.

$$F_G = P : G \frac{M \cdot m}{R^2} = m \cdot g : g = G \frac{M}{R^2} = 6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{1,9 \times 10^{27}}{(4,22 \times 10^8)^2} = 0,71 \text{ m/s}^2$$

$$c. \quad E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \left\{ v^2 = G \frac{M}{R} \right\} = \frac{1}{2}m \cdot G \frac{M}{R} = \frac{1}{2}G \frac{M \cdot m}{R} = \frac{1}{2} \cdot 6,67 \times 10^{-11} \frac{1,9 \times 10^{27} \cdot 8,9 \times 10^{22}}{4,22 \times 10^8}$$

$$E_c = 1,33 \times 10^{31} \text{ J}$$

d. Por definición:  $\vec{L} = m \cdot \vec{r} \times \vec{v}$ . El módulo del momento angular es:

$$L = m \cdot r \cdot v \cdot \text{sen } \alpha$$

Si considera una órbita circular ( $\alpha = 90^\circ$ ):

$$L = m \cdot r \cdot v \cdot \text{sen } 90 = m \cdot r \cdot v = \left\{ v = \sqrt{G \frac{M}{r}} \right\} = m \cdot r \cdot \sqrt{G \frac{M}{r}} = m_{\text{Io}} \sqrt{G \cdot M_J \cdot r} =$$

$$= 8,9 \times 10^{22} \sqrt{6,67 \times 10^{-11} \times 1,9 \times 10^{27} \cdot 4,22 \times 10^8} = 6,5 \times 10^{35} \text{ Kg m}^2 \text{ s}^{-1}$$

**Modelo 2010. Problema 1A.-** Desde un punto de la superficie terrestre se lanza verticalmente hacia arriba un objeto de 100 kg que llega hasta una altura de 300 km. Determine:

- La velocidad de lanzamiento.
- La energía potencial del objeto a esa altura.

Si estando situado a la altura de 300 km, queremos convertir el objeto en satélite de forma que se ponga en órbita circular alrededor de la Tierra,

- ¿Qué energía adicional habrá que comunicarle?
- ¿Cuál será la velocidad y el periodo del satélite en esa órbita?

Datos: Constante de Gravitación  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

Masa de la Tierra  $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ ; Radio de la Tierra  $R_T = 6370 \text{ km}$

**Solución.**

a. En ausencia de fuerzas externas (rozamiento) el objeto se encuentra en un campo conservativo y por lo tanto la energía mecánica se conserva.

$$E_m(A) = E_m(B)$$

$$E_p(A) + E_c(A) = E_p(B)$$

$$-G \frac{M_T \cdot m}{R_T} + \frac{1}{2} m_s v^2 = -G \frac{M_T \cdot m}{R_T + h}$$

Simplificando la masa del objeto (m), se despeja la velocidad.

$$-G \frac{M_T}{R_T} + \frac{1}{2} v^2 = -G \frac{M_T}{R_T + h}; \quad \frac{1}{2} v^2 = G \frac{M_T}{R_T} - G \frac{M_T}{R_T + h}; \quad v^2 = 2G \cdot M_T \left( \frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_T + h} \right)$$

$$v = \sqrt{2G \cdot M_T \left( \frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_T + h} \right)} = \sqrt{2 \cdot 6,67 \times 10^{-11} \cdot 5,98 \times 10^{24} \left( \frac{1}{6,37 \times 10^6} - \frac{1}{6,67 \times 10^6} \right)} = 2373,3 \text{ m/s}$$

b. La energía potencial del objeto a esa altura viene dada por la expresión:

$$E_p = -G \frac{M_T \cdot m}{R}$$

$$R = R_T + h = 6370 + 300 = 6670 \text{ Km}$$

$$E_p = -6,67 \times 10^{-11} \frac{5,98 \times 10^{24} \cdot 100}{6,67 \times 10^6} = -5,98 \cdot 10^9 \text{ J}$$

c. La energía adicional que habría que comunicar al objeto para convertirlo en satélite es la diferencia entre la energía del objeto convertido en satélite orbitando a esa altura y la energía del objeto a esa altura, calculada en el apartado anterior.

La energía de un satélite de 100 kg de masa que orbita a una altura de 300 Km sobre la superficie de la tierra es la suma de la energía potencial y la energía cinética.

$$E_m(\text{Satélite}) = E_p + E_c = -G \frac{M_T \cdot m}{R} + \frac{1}{2} m v^2$$

El producto  $mv^2$  se puede obtener teniendo en cuenta que para que un satélite orbite en torno a un planeta, la fuerza de atracción gravitacional debe ser igual a la fuerza centrípeta.

$$F_G = F_c ; G \frac{M_T \cdot m}{R^2} = m \frac{v^2}{R} ; mv^2 = G \frac{M_T \cdot m}{R}$$

Sustituyendo en la expresión de la energía mecánica del satélite:

$$E_m(\text{Satélite}) = -G \frac{M_T \cdot m}{R} + \frac{1}{2} \frac{M_T \cdot m}{R} = -\frac{1}{2} G \frac{M_T \cdot m}{R}$$

$$E_m(\text{Satélite}) = -\frac{1}{2} \cdot 6,67 \times 10^{-11} \frac{5,98 \times 10^{24} \cdot 100}{6,67 \times 10^6} = -2,99 \times 10^9 \text{ J}$$

La energía que habrá que comunicar al objeto situado a 300 Km de altura para convertirlo en un satélite es:

$$\Delta E = E_m(\text{satélite}) - E_p(\text{objeto}) = -2,99 \times 10^9 - (-5,98 \times 10^9) = 2,99 \times 10^9 \text{ J}$$

**d.** Para que un satélite orbite en torno a un planeta, la fuerza de atracción gravitacional debe ser igual a la fuerza centrípeta.

$$F_G = F_c ; G \frac{M_T \cdot m}{R^2} = m \frac{v^2}{R} ; mv^2 = G \frac{M_T \cdot m}{R} ; v = \sqrt{G \frac{M_T}{R}}$$

$$v = \sqrt{6,67 \times 10^{-11} \frac{5,98 \times 10^{24}}{6,67 \times 10^6}} = 7733 \text{ m/s}$$

El periodo del satélite se puede calcular aplicando la tercera ley de Kepler.

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_T} R^3 = \frac{4\pi^2}{6,67 \times 10^{-11} \cdot 5,98 \times 10^{24}} \cdot (6,67 \times 10^6)^3 = 29370424 \text{ s}^2$$

$$T = \sqrt{29370424 \text{ s}^2} = 5419 \text{ s}$$

También se puede calcular a partir de la velocidad.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\frac{v}{R}} = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi \cdot 6,67 \times 10^6}{7733} = 5419 \text{ s}$$

### Modelo 2010. Cuestión 1B.-

- a) ¿Cuál es el periodo de un satélite artificial que gira alrededor de la Tierra en una órbita circular cuyo radio es un cuarto del radio de la órbita lunar?
- b) ¿Cuál es la relación entre la velocidad del satélite y la velocidad de Luna en sus respectivas órbitas?

Dato: Periodo de la órbita lunar  $T_L = 27,32$  días

#### Solución.

a. Teniendo en cuenta la tercera ley de Kepler: "El cuadrado del periodo del movimiento de un planeta es directamente proporcional al cubo de la distancia media del planeta al sol"

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3$$

Aplicando esta expresión al satélite y a la Luna:

$$\left. \begin{array}{l} T_S^2 = \frac{4\pi^2}{GM} R_S^3 \\ T_L^2 = \frac{4\pi^2}{GM} R_L^3 \end{array} \right\} : \text{Dividiendo. } \frac{T_S^2}{T_L^2} = \frac{\frac{4\pi^2}{GM} R_S^3}{\frac{4\pi^2}{GM} R_L^3} : \text{Simplificando. } \frac{T_S^2}{T_L^2} = \frac{R_S^3}{R_L^3}$$

Expresión de la que se puede despejar el periodo del satélite:



$$T_S = \sqrt{\frac{R_S^3}{R_L^3}} \cdot T_L^2 = T_L \cdot \sqrt{\frac{R_S^3}{R_L^3}}$$

Según el enunciado:  $R_S = \frac{1}{4} R_L$

$$T_S = T_L \cdot \sqrt{\frac{R_S^3}{R_L^3}} = T_L \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{4} R_L\right)^3}{R_L^3}} = T_L \cdot \sqrt{\frac{1}{4^3} \frac{R_L^3}{R_L^3}} = T_L \cdot \sqrt{\frac{1}{4^3}} = \frac{T_L}{2^3}$$

$$T_S = \frac{T_L}{8} = \frac{27,32}{8} = 3,42 \text{ días} \langle \rangle 3 \text{ d, 9h, 57 min}$$

b. Teniendo en cuenta que:  $\begin{cases} \omega = \frac{2\pi}{T} \\ v = \omega \cdot R \end{cases} \Rightarrow \frac{v}{R} = \frac{2\pi}{T} ; v = \frac{2\pi \cdot R}{T}$

$$\frac{v_S}{v_L} = \frac{\frac{2\pi \cdot R_S}{T_S}}{\frac{2\pi \cdot R_L}{T_L}} = \frac{T_L \cdot R_S}{T_S \cdot R_L} = \begin{cases} R_S = \frac{1}{4} R_L \\ T_S = \frac{1}{8} T_L \end{cases} = \frac{T_L \cdot \frac{1}{4} R_L}{\frac{1}{8} T_L \cdot R_L} = \frac{8}{4} = 2$$

**Septiembre 2009. Cuestión 1.-** Razone si son verdaderas o falsas las siguientes afirmaciones:

- El valor de la velocidad de escape de un objeto lanzado desde la superficie de la Tierra depende del valor de la masa del objeto.
- En el movimiento elíptico de un planeta en torno al Sol la velocidad del planeta en el perihelio (posición más próxima al Sol) es mayor que la velocidad en el afelio (posición más alejada del Sol).

**Solución.**

a. **FALSO.** Por el principio de conservación de la energía, la energía mecánica en la superficie terrestre (suma de cinética y potencial) debe ser igual a la que tendrá cuando escape del campo gravitatorio, que será nula debido a que suponemos que llega con velocidad nula ( $E_c = 0$ ) y que esta a una distancia infinita ( $E_p = 0$ ).

$$\frac{1}{2} m v^2 - G \frac{M m}{R_T} = 0$$

Simplificando las masas se despeja v.

$$\frac{1}{2} v^2 = G \frac{M}{R_T} ; v = \sqrt{2G \frac{M}{R_T}}$$

b. **VERDADERO.** Teniendo en cuenta que el modulo del momento angular del planeta en su giro alrededor del Sol y en ausencia de fuerzas externas, permanece constante.

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m\vec{v}$$

$$|\vec{L}| = L = r \cdot m \cdot v \cdot \text{sen } 90 = r \cdot m \cdot v = \text{cte}$$

$$L_{\text{Afelio}} = L_{\text{Perihelio}}$$

$$r_A \cdot m \cdot v_A = r_P \cdot m \cdot v_P$$

$$r_A \cdot v_A = r_P \cdot v_P : \{ r_A > r_P \} \Rightarrow v_P > v_A$$

**Junio 2009. Cuestión 1.-** Un satélite artificial de 500 kg que describe una órbita circular alrededor de la Tierra se mueve con una velocidad de 6,5 km/s. Calcule:

- a) La energía mecánica del satélite.  
 b) La altura sobre la superficie de la Tierra a la que se encuentra.

Dato: Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$   
 Masa de la Tierra  $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$   
 Radio de la Tierra  $R_T = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$

**Solución.**

a. La energía mecánica de un satélite que orbita alrededor de la Tierra es la suma de la energía cinética y de la energía potencial, y se calcula mediante la expresión

$$E_m = -\frac{1}{2}G \frac{M_T m}{r}$$

Donde r representa la distancia del satélite al centro de la Tierra. Para calcular r se tiene en cuenta que para que un satélite orbite alrededor de la Tierra, la fuerza centrípeta del satélite debe ser igual a la fuerza de atracción de la Tierra.

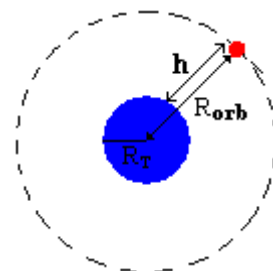
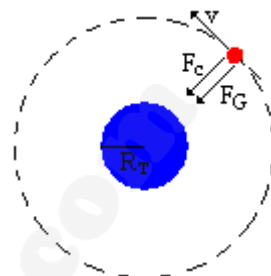
$$m \frac{v^2}{r} = G \frac{M_T m}{r^2} : r = G \frac{M_T}{v^2} = 6,67 \times 10^{-11} \frac{5,98 \times 10^{24}}{6500^2} = 9,44 \times 10^6 \text{ m}$$

Conocido el radio, se calcula la energía mecánica.

$$E_m = -\frac{1}{2}G \frac{M_T m}{r} = -\frac{1}{2} 6,67 \times 10^{-11} \frac{5,98 \times 10^{24} \cdot 500}{9,44 \cdot 10^6} = -1,06 \times 10^{10} \text{ J}$$

b. Para calcular la altura desde la superficie terrestre, se resta el radio de la tierra al radio de la órbita.

$$h = r_{\text{orb}} - r_T = 9,44 \times 10^6 - 6,37 \times 10^6 = 3,07 \times 10^6 \text{ m}$$



**Problema 1B-** Suponiendo que los planetas Venus y la Tierra describen órbitas circulares alrededor del Sol, calcule:

- a) El periodo de revolución de Venus.  
 b) Las velocidades orbitales de Venus y de la Tierra.

Dato: Distancia de la Tierra al Sol:  $1,49 \times 10^{11} \text{ m}$   
 Distancia de Venus al Sol:  $1,08 \times 10^{11} \text{ m}$   
 Periodo de revolución de la Tierra: 365 días

**Solución.**

a. La fuerza de atracción que ejerce el Sol sobre cada planeta causa la aceleración centrípeta necesaria para que el planeta orbite alrededor de él. Si se considera la aproximación de órbitas circulares, se puede deducir la Ley de Kepler.

Aplicando la segunda ley de Newton ( $F = m \cdot a$ ), al planeta que órbita:

$$F_G = m \cdot a_n : G \cdot \frac{M_S m}{R^2} = m \cdot \frac{v^2}{R} : \{v = \omega R\} : G \cdot \frac{M_S}{R^2} = \frac{(\omega R)^2}{R} : G \cdot \frac{M_S}{R^2} = \omega^2 R : \left\{ \omega \frac{2\pi}{T} \right\} :$$

$$G \cdot \frac{M_S}{R^2} = \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 R : G \cdot \frac{M_S}{R^3} = \frac{4\pi^2}{T^2} : \frac{T^2}{R^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_S} = \text{cte}$$

Esta expresión permite calcular el periodo de un planeta (Venus) conocida su distancia al Sol, no obstante, en este caso no nos dan como dato la masa del Sol, por lo que habrá que comparar los parámetros de Venus con los terrestres.

$$\frac{T^2}{R^3} = \text{cte} \Rightarrow \frac{T_V^2}{R_V^3} = \frac{T_T^2}{R_T^3} : T_V = T_T \sqrt{\frac{R_V^3}{R_T^3}} = 365 \sqrt{\frac{(1,08 \times 10^{11})^3}{(1,49 \times 10^{11})^3}} = 225 \text{ días}$$

b. Supuesta una órbita circular, conocido el periodo se calcula la velocidad angular, y con la velocidad angular y el radio la velocidad orbital.

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{2\pi}{T} \\ \omega &= \frac{v}{R} \end{aligned} \right\} : \frac{v}{R} = \frac{2\pi}{T} : v = \frac{2\pi}{T} R$$

$$\text{Para Venus: } v_V = \frac{2\pi}{T} R_V = \frac{2\pi}{225 \cdot 24 \cdot 3600} \cdot 1,08 \times 10^{11} = 34907 \text{ m/s} = 34,9 \text{ Km/s}$$

$$\text{Para la Tierra: } v_T = \frac{2\pi}{T} R_T = \frac{2\pi}{365 \cdot 24 \cdot 3600} \cdot 1,49 \times 10^{11} = 29687 \text{ m/s} = 29,7 \text{ Km/s}$$

### Modelo 2009.- Cuestión 1.

- Enuncie la tercera ley de Kepler y demuéstrela para el caso de órbitas circulares.
- Aplice dicha ley para calcular la masa del Sol suponiendo que la órbita de la Tierra alrededor del Sol es circular con un radio medio de  $1,49 \times 10^8$  km.

Dato: Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

#### Solución.

a. Tercera ley de Kepler:

“El cuadrado del periodo del movimiento de un planeta es directamente proporcional al cubo de la distancia media del planeta al sol”

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3$$

Dedución:

En el caso de una órbita circular, la fuerza que actúa sobre un cuerpo es la fuerza gravitatoria y la aceleración es la aceleración centrípeta; por lo tanto podemos escribir la segunda ley de Newton como:

$$G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

Simplificando y despejando:

$$\left. \begin{aligned} G \frac{Mm}{r^2} &= m \frac{v^2}{r} \\ v &= \omega \cdot r \end{aligned} \right\} : \frac{GM}{r^2} = \frac{\omega^2 \cdot r^2}{r} : \frac{GM}{r^2} = \omega^2 \cdot r$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{GM}{r^2} &= \omega^2 \cdot r \\ \omega &= \frac{2\pi}{T} \end{aligned} \right\} : \frac{GM}{r^2} = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot r \Rightarrow T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3$$

b. Para calcular la masa del sol se despeja M de la tercera ley de Kepler.

$$M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} = \left\{ \begin{array}{l} r = 1,49 \times 10^8 \text{ Km} = 1,49 \times 10^{11} \text{ m} \\ G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ Kg}^{-2} \\ T = 365 \text{ días} = 3,15 \times 10^7 \text{ s} \end{array} \right\} = \frac{4\pi^2 (1,49 \times 10^{11})^3}{6,67 \times 10^{-11} \cdot (3,15 \times 10^7)^2} = 1,97 \times 10^{30} \text{ Kg}$$

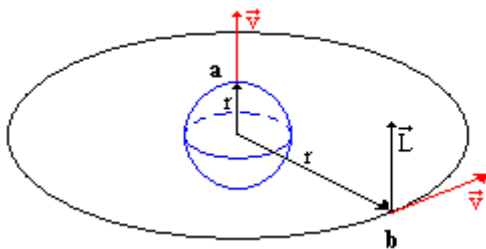
Septiembre 2008. Cuestión 1. Calcule el módulo del momento angular de un objeto de 1000 kg respecto al centro de la Tierra en los siguientes casos:

- Se lanza desde el polo norte perpendicularmente a la superficie de la Tierra con una velocidad de 10 Km/s.
- Realiza un órbita circular alrededor de la Tierra en el plano ecuatorial a una distancia de 600 km de su superficie.

Datos: Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

Masa de la Tierra  $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ . Radio de la Tierra  $R_T = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$

**Solución.**



El momento angular se define como el producto vectorial del radiovector por la cantidad de movimiento:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times (m \vec{v})$$

Su modulo, viene dado por:

$$L = r m v \sin \alpha$$

- a) En este caso el ángulo que forman el vector posición  $r$  con el vector velocidad es cero por lo que el modulo del momento angular es nulo.

$$L = r m v \sin 0^\circ = 0 \text{ (kg m}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$$

- b) En este caso el ángulo que forma el vector posición  $r$  y la velocidad orbital es  $90^\circ$ .

$$L = r m v \sin 90^\circ = r m v$$

La velocidad de órbita se calcula teniendo en cuenta que debe ser tal que la fuerza de atracción gravitatoria sea la fuerza centrípeta necesaria para describir la órbita de radio  $r$ .

$$r = R + h = 6,37 \cdot 10^6 + 600000 = 6,97 \cdot 10^6 \text{ m:}$$

$$F_G = F_c : G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} = m \cdot \frac{v^2}{r} : v = \sqrt{G \cdot \frac{M}{r}} = \sqrt{6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \times 10^{24}}{6,97 \times 10^6}} = 7565 \text{ m/s}$$

Conocida la velocidad orbital se calcula el módulo del momento angular.

$$L = m \cdot r \cdot v \cdot \sin 90^\circ = 6,97 \times 10^6 \cdot 1000 \cdot 7565 \cdot 1 = 5,27 \times 10^{13} \text{ kg m}^2 \text{ / s}$$

El vector  $L$  es perpendicular a al plano orbital.

**Septiembre 2008. Problema 2A.-** Un satélite artificial de 100 kg se mueve en una órbita circular alrededor de la Tierra con una velocidad de 7,5 km/s. Calcule:

- El radio de la órbita
- La energía potencial del satélite.
- La energía mecánica del satélite.
- La energía que habría que suministrar al satélite para que describa una órbita circular con radio doble que el de la órbita anterior.

Datos: Constante de Gravitación Universal.  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

Masa de la Tierra  $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ ; Radio de la Tierra  $R_T = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$

**Solución.**

- a. Para que un satélite orbite en torno a un planeta, la fuerza de atracción gravitacional a la que se ve sometido debe ser igual a la fuerza centrípeta que desarrolla el satélite al girar en la órbita.

$$F_G = F_c : G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{v^2}{r} : r = G \frac{M}{v^2} = 6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \times 10^{24}}{(7,5 \times 10^3)^2} = 7,09 \times 10^6 \text{ m}$$

- b. La energía potencial de un satélite en órbita viene dada por la expresión:

$$E_p = -G \frac{Mm}{r} = 6,67 \times 10^{-11} \frac{5,98 \cdot 10^{24} \cdot 100}{7,09 \times 10^6} = 5,625 \times 10^9 \text{ J}$$

- c. La energía mecánica del satélite es la suma de su energía potencial y de su energía cinética del en la órbita.

$$E_m = E_p + E_c = -G \frac{Mm}{r} + \frac{1}{2} m v^2 = \left\{ \begin{array}{l} F_G = F_c \\ v^2 = G \frac{M}{r} \end{array} \right\} = -G \frac{Mm}{r} + \frac{1}{2} G \frac{Mm}{r} = -\frac{1}{2} G \frac{Mm}{r} =$$

$$= -\frac{1}{2} 6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \times 10^{24} \cdot 100}{7,09 \times 10^6} = -2,813 \times 10^9 \text{ J}$$

d. La energía que habrá que suministrar al satélite para que describa una órbita de doble radio es la diferencia de energía mecánica existente entre las dos órbitas.

$$\Delta E = E_m(2r) - E_m(r) = -\frac{1}{2}G \frac{Mm}{2r} - \left(-\frac{1}{2}G \frac{Mm}{r}\right) = \frac{1}{2}G \frac{Mm}{r} \left(1 - \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{4}G \frac{Mm}{r} =$$

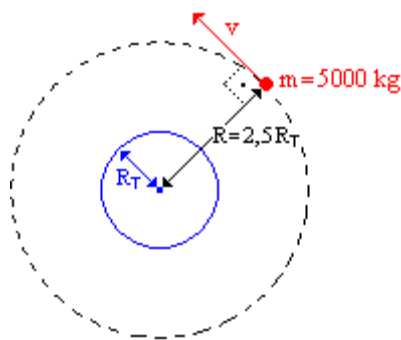
$$= -\frac{1}{4} 6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \times 10^{24} \cdot 100}{7,09 \times 10^6} = 1,406 \times 10^9 \text{ J}$$

**Junio 2008. Cuestión 2.** Una sonda de masa 5000 kg se encuentra en una órbita circular a una altura sobre la superficie terrestre de  $1,5 R_T$ . Determine: **a)** el momento angular de la sonda en esa órbita respecto al centro de la Tierra; **b)** la energía que hay que comunicar a la sonda para que escape del campo gravitatorio terrestre desde esa órbita.

**Datos:** Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

Masa de la Tierra  $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ ; Radio de la Tierra  $R_T = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$

**Solución.**



**a.** Momento angular:

$$\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v}$$

$$|\vec{L}| = |\vec{r}| \cdot |m\vec{v}| \cdot \text{sen } 90^\circ = R \cdot m \cdot v$$

Donde R es la distancia de la sonda al centro de la tierra

$$R = 2,5 R_T$$

La velocidad en la órbita se calcula igualando la fuerza centrípeta a la fuerza gravitacional:

$$m \frac{v^2}{R} = G \frac{Mm}{R^2}$$

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R}} = \sqrt{\frac{6,67 \times 10^{-11} \cdot 5,98 \times 10^{24}}{2,5 \cdot 6,37 \times 10^6}} = 5005 \text{ m/s}$$

Sustituyendo los datos en la expresión del módulo del momento angular:

$$|\vec{L}| = r \cdot m \cdot v = 2,5 \cdot 6,37 \times 10^6 \text{ (m)} \cdot 5000 \text{ (kg)} \cdot 5005 \text{ (m/s)} = 3,98 \times 10^{14} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$$

**b.** La energía necesaria para poder escapar del campo gravitatorio terrestre

**Solución.**

Por conservación de la energía, la energía potencial en la órbita más la energía cinética que le comunicamos ha de ser igual a la energía mecánica en el infinito, que es cero, teniendo en cuenta que llega con velocidad nula ( $E(c) = 0$ ), y que al ser  $R = \infty$  la energía potencial es 0.

Para que la sonda escape del campo gravitatorio, tendrá que superar su potencial gravitatorio, es decir, tendrá que ganar una energía igual a la energía mecánica que tiene en la órbita.

$$\Delta E = 0 - E_m(\text{Órbita}) = -\left(-\frac{1}{2}G \cdot \frac{Mm}{R}\right) = \frac{1}{2} 6,67 \times 10^{-11} \left(\text{Nm}^2 \text{kg}^{-2}\right) \frac{5,98 \times 10^{24} \text{ (kg)} \cdot 5000 \text{ (kg)}}{2,5 \cdot 6,37 \times 10^6 \text{ m}} = 6,26 \times 10^{10} \text{ J (Nm)}$$

**Modelo 2008. Cuestión 1.-** Cuatro masas puntuales idénticas de 6 kg cada una están situadas en los vértices de un cuadrado de lado igual a 2 m. Calcule:

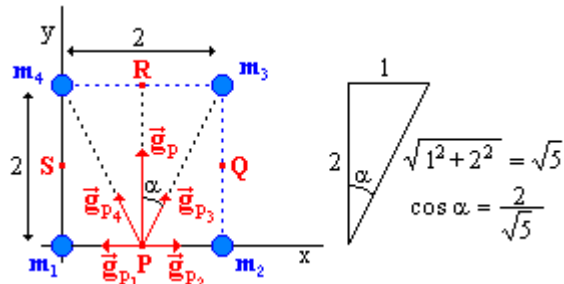
- El campo gravitatorio que crean las cuatro masas en el centro de cada lado del cuadrado.
- El potencial gravitatorio creado por las cuatro masas en el centro del cuadrado, tomando el infinito como origen de potenciales.

Dato: Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$

**Solución.**

**a.** Se pide calcular la intensidad de campo gravitatorio ( $\vec{g}$ ) en los puntos medios de los lados del cuadrado.

Sobre la masa 1 colocamos los ejes de coordenadas, y denominamos P, Q, R y S a los puntos medios de los lados del cuadrado. Analizamos el punto P:



La intensidad de campo gravitatorio viene determinada por la expresión:

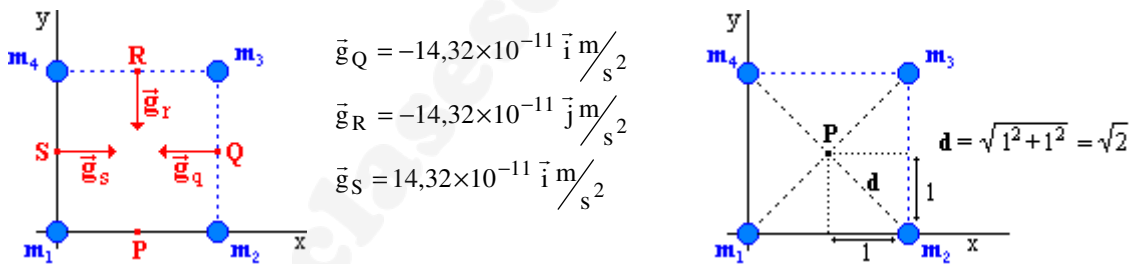
$$\vec{g} = G \cdot \frac{m}{d^2} \vec{u}_r$$

Debido a la igualdad de las masas y, dado el carácter vectorial de la magnitud, por simetría se comprueba que  $\vec{g}_{1p} = -\vec{g}_{2p}$ , anulándose mutuamente. Ocurre lo mismo con las componentes OX de las intensidades creadas por las masas 3 y 4 ( $\vec{g}_{4xp} = -\vec{g}_{3xp}$ ), por lo tanto la intensidad del campo resultante en el punto P será la suma de las componentes OY de las intensidades creadas por la masas 3 y 4.

$$\vec{g}_{Tp} = \vec{g}_{3yp} + \vec{g}_{4yp} : \begin{cases} \vec{g}_{3yp} = g_{3p} \cos \alpha \vec{j} = G \cdot \frac{m_3}{d^2} \cos \alpha \vec{j} = 6,67 \times 10^{-11} \frac{6}{(\sqrt{5})^2} \frac{2}{\sqrt{5}} \vec{j} = 7,16 \times 10^{-11} \vec{j} \text{ m/s}^2 \\ \vec{g}_{4yp} = g_{4p} \cos \alpha \vec{j} = G \cdot \frac{m_4}{d^2} \cos \alpha \vec{j} = 6,67 \times 10^{-11} \frac{6}{(\sqrt{5})^2} \frac{2}{\sqrt{5}} \vec{j} = 7,16 \times 10^{-11} \vec{j} \text{ m/s}^2 \end{cases}$$

$$\vec{g}_{Tp} = 7,16 \times 10^{-11} \vec{j} + 7,16 \times 10^{-11} \vec{j} = 14,32 \times 10^{-11} \vec{j} \text{ m/s}^2$$

Puesto que las masas son iguales y las distancias de las masas a los puntos medios de los lados también lo son, las intensidades de campo gravitatorio en los puntos Q, R y S son:



$$\begin{aligned} \vec{g}_Q &= -14,32 \times 10^{-11} \vec{i} \text{ m/s}^2 \\ \vec{g}_R &= -14,32 \times 10^{-11} \vec{j} \text{ m/s}^2 \\ \vec{g}_S &= 14,32 \times 10^{-11} \vec{i} \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

b. El potencial en P es la suma escalar de los potenciales que crea cada masa en ese punto.

$$V_P = V_{P1} + V_{P2} + V_{P3} + V_{P4}$$

El potencial gravitatorio en un punto debido a una masa m situada a una distancia d viene dado por la expresión:

$$V = -G \frac{m}{d}$$

Aplicando esta expresión al sistema de masas propuesto

$$V_P = -G \frac{m_1}{d} + \left(-G \frac{m_2}{d}\right) + \left(-G \frac{m_3}{d}\right) + \left(-G \frac{m_4}{d}\right)$$

$$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 6 \text{ kg} = m$$

$$V_P = 4 \cdot \left(-G \frac{m}{d}\right) = 4 \cdot \left(-6,67 \times 10^{-11} \frac{6}{\sqrt{2}}\right) = 1,31 \times 10^{-9} \text{ J/kg}$$

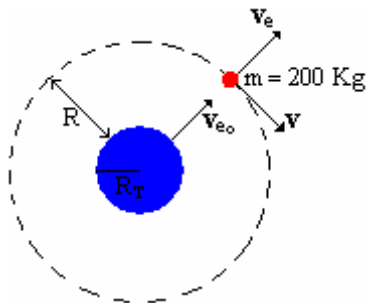
**Modelo 2008. Problema 1B.-** Un satélite artificial de 200 kg describe una órbita circular alrededor de la Tierra. La velocidad de escape a la atracción terrestre desde esa órbita es la mitad que la velocidad de escape desde la superficie terrestre.

- Calcule la fuerza de atracción entre la Tierra y el satélite.
- Calcule el potencial gravitatorio en la órbita del satélite.
- Calcule la energía mecánica del satélite en la órbita.
- ¿Se trata de un satélite geoestacionario? Justifique la respuesta.

Datos: Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

Masa de la Tierra  $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ ; Radio de la Tierra  $R_T = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$

**Solución.**



Para resolver las diferentes cuestiones que plantea el problema hace falta conocer el radio de la órbita donde se encuentra el satélite, para ello se informa que la velocidad de escape en la órbita ( $v_e$ ) es la mitad que la velocidad de escape desde la superficie terrestre ( $v_{e_0}$ ).

Se denomina velocidad de escape de un cuerpo (cohete, satélite,...), a la velocidad que este debe adquirir, en el momento de ser lanzado, para que escape del campo gravitatorio del planeta en el que se encuentra. Se calcula mediante un balance energético.

La energía de escape es la diferencia entre la energía en el infinito (0) y la energía mecánica total en la órbita, siendo el infinito el punto donde la interacción gravitatoria se anula.

Si denominamos  $v$  a la velocidad del satélite en la órbita:

$$E(\text{Escape}) = E(\text{Infinito}) - E(\text{Órbita})$$

$$\frac{1}{2} m v_e^2 = 0 - \left( \underbrace{-G \frac{Mm}{R}}_{E_p} + \underbrace{\frac{1}{2} m v^2}_{E_c} \right)$$

La energía cinética en la órbita se puede expresar en función del radio de la órbita igualando la fuerza de atracción gravitacional con la fuerza centrípeta.

$$F_g = F_c \quad G \frac{Mm}{R^2} = m \frac{v^2}{R} \quad v^2 = G \frac{M}{R}$$

Sustituyendo la expresión  $v^2$  en el balance energético y operando se despeja la velocidad de escape en la órbita:

$$\frac{1}{2} m v_e^2 = G \frac{Mm}{R} - \frac{1}{2} m \cdot G \frac{M}{R} \quad \frac{1}{2} m v_e^2 = G \frac{Mm}{R} - \frac{1}{2} G \frac{Mm}{R} \quad \frac{1}{2} m v_e^2 = \frac{1}{2} G \frac{Mm}{R}$$

$$v_e^2 = G \frac{M}{R} \quad v_e = \sqrt{G \frac{M}{R}}$$

La velocidad de escape desde la superficie terrestre se calcula de igual forma, teniendo en cuenta, que en la superficie terrestre solo hay energía potencial.

$$\frac{1}{2} m v_{e_0}^2 = 0 - \left( -G \frac{Mm}{R_T} \right) \quad ; \quad v_{e_0} = \sqrt{2G \frac{M}{R_T}}$$

Comparando las velocidades de escape se obtiene el radio de la órbita:

$$v_e = \frac{1}{2} v_{e_0} \quad ; \quad \frac{v_{e_0}}{v_e} = 2 \quad ; \quad \frac{\sqrt{2G \frac{M}{R_T}}}{\sqrt{G \frac{M}{R}}} = 2 \quad ; \quad \frac{2G \frac{M}{R_T}}{G \frac{M}{R}} = 2^2 \quad ; \quad \frac{R}{R_T} = 2 \quad ; \quad R = 2R_T$$

$$R = 2 \cdot 6,37 \times 10^6 \text{ m} = 12,74 \times 10^6 \text{ m}$$

a. 
$$F = G \frac{M \cdot m}{R^2} = 6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \times 10^{24} \cdot 200}{(12,74 \times 10^6)^2} = 491,5 \text{ N}$$

b. 
$$V = -G \frac{M}{R} = -6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \times 10^{24}}{12,74 \times 10^6} = -3,13 \times 10^7 \text{ J/kg}$$

c. 
$$E_m = -\frac{1}{2} G \frac{M \cdot m}{R} = -\frac{1}{2} 6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \times 10^{24} \cdot 200}{12,74 \times 10^6} = -3,13 \times 10^9 \text{ J}$$

d. Para que un satélite sea estacionario, su periodo debe ser de 24 horas. El periodo se puede calcular aplicando la 3ª ley de Kepler.

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} R^3 ; \quad T = \sqrt{\frac{4\pi^2}{GM} R^3} = \sqrt{\frac{4\pi^2}{6,67 \times 10^{-11} \cdot 5,98 \times 10^{24}} \cdot (12,74 \times 10^6)^3} = 14\,306 \text{ s} = 3\text{h } 58' 26''$$

El satélite no es geoestacionario

**Septiembre 2007. Cuestión 1.- a)** ¿Cuál es la aceleración de la gravedad en la superficie de un planeta esférico cuyo radio es la mitad del de la Tierra y posee la misma densidad media? **b)** ¿Cuál sería el período de la órbita circular de un satélite situado a una altura de 400 km respecto a la superficie del planeta?

Datos: Radio de la Tierra  $R_T = 6371 \text{ km}$

Aceleración de la gravedad en la superficie de la Tierra  $g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$

**Solución.**

a. La aceleración de la gravedad en la superficie de un planeta se puede expresar en función de la masa y el radio del planeta, igualando el peso en la superficie con la fuerza gravitacional.

$$P = F_G ; \quad m \cdot g = G \frac{M \cdot m}{R^2} ; \quad g = G \frac{M}{R^2}$$

La gravedad en el planeta que se pide se calcula por comparación con la gravedad terrestre.

$$g_T = G \frac{M_T}{R_T^2} \quad g_p = G \frac{M_p}{R_p^2}$$

Comparando

$$\frac{g_p}{g_T} = \frac{G \frac{M_p}{R_p^2}}{G \frac{M_T}{R_T^2}} = \frac{R_T^2 \cdot M_p}{R_p^2 \cdot M_T}$$

$$M = V \cdot \rho = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho$$

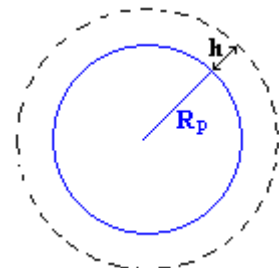
Teniendo en cuenta que  $\rho_T = \rho_p = \rho$

$$\frac{g_p}{g_T} = \frac{R_T^2 \cdot \frac{4}{3} \pi R_p^3 \cdot \rho}{R_p^2 \cdot \frac{4}{3} \pi R_T^3 \cdot \rho} \quad \text{Simplificando} \quad \frac{g_p}{g_T} = \frac{R_p}{R_T}$$

$$R_p = \frac{1}{2} R_T \quad \frac{g_p}{g_T} = \frac{\frac{1}{2} R_T}{R_T} \quad \frac{g_p}{g_T} = \frac{1}{2} \quad g_p = \frac{1}{2} g_T = \frac{1}{2} \cdot 9,8 = 4,9 \text{ m/s}^2$$

b. Utilizando la 3ª ley de Kepler:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_p} \cdot R^3$$





Donde  $R = R_p + h$  y el producto  $G \cdot M_p$  lo obtenemos de la aceleración de la gravedad en la superficie del planeta.

$$g_p = G \frac{M_p}{R_p^2} \Rightarrow G \cdot M_p = g_p \cdot R_p^2$$

Sustituyendo:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g_p \cdot R_p^2} \cdot R^3 = \frac{4\pi^2}{g_p \cdot R_p^2} \cdot (R_p + h)^3 \quad T = \sqrt{\frac{4\pi^2}{g_p \cdot R_p^2} \cdot (R_p + h)^3}$$

Sustituyendo por los datos del enunciado:

$$T = \sqrt{\frac{4\pi^2}{4.9 \cdot \left(\frac{6371 \times 10^3}{2}\right)^2} \cdot \left(\frac{6371 \times 10^3}{2} + 400 \times 10^3\right)^3} = 6049.6 \text{ s} \approx 100 \text{ min}$$

**Septiembre 2007. Problema 1A.-** Un satélite de masa 20 kg se coloca en órbita circular sobre el ecuador terrestre de modo que su radio se ajusta para que dé una vuelta a la Tierra cada 24 horas, así se consigue que siempre se encuentre sobre el mismo punto respecto a la Tierra (satélite geostacionario).

- a) ¿Cuál debe ser el radio de su órbita?  
 b) ¿Cuánta energía es necesaria para situarlo en dicha órbita?

Datos: *Constante de Gravitación Universal*  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$   
*Masa de la Tierra*  $M_T = 5,96 \times 10^{24} \text{ kg}$   
*Radio de la Tierra*  $R_T = 6371 \text{ Km}$

**Solución.**

a. Si un satélite describe una órbita geostacionaria alrededor de la Tierra, el periodo del satélite será de 24 horas, y el radio de la órbita se puede calcular teniendo en cuenta este dato.

$$F_G = F_c$$

$$G \frac{M m}{R^2} = m a_n : G \frac{M m}{R^2} = m \frac{v^2}{R} : v^2 = G \frac{M}{R}$$

Teniendo en cuenta que  $\left. \begin{matrix} v = \omega R \\ \omega = \frac{2\pi}{T} \end{matrix} \right\} : v = \frac{2\pi}{T} R$

$$\left(\frac{2\pi}{T} R\right)^2 = G \frac{M}{R} : \frac{4\pi^2}{T^2} = G \frac{M}{R^3} : R = \sqrt[3]{G \frac{MT^2}{4\pi^2}}$$

$$R = \sqrt[3]{6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \times 10^{24} \cdot (24 \cdot 3600)^2}{4\pi^2}} = 4,23 \times 10^7 \text{ m}$$

b. La energía necesaria para ponerle en órbita un satélite, es la diferencia entre la energía mecánica que tiene el satélite en la órbita y la que tiene en la superficie terrestre.

$$\Delta E = E_m(\text{órbita}) + E_m(\text{superficie})$$

$$E_m(\text{órbita}) = E_c + E_p = \frac{1}{2} m v^2 + \left(-G \frac{Mm}{R}\right)$$

La velocidad del satélite en la órbita se puede expresar en función de la masa de la Tierra y el radio de la tierra.

$$F_c = F_g \quad m \frac{v^2}{R} = G \frac{Mm}{R^2} \quad v^2 = G \frac{M}{R}$$

Sustituyendo en la expresión de la energía:

$$E_m(\text{órbita}) = \frac{1}{2} m \cdot G \frac{M}{R} + \left( -G \frac{Mm}{R} \right) = \frac{1}{2} G \frac{Mm}{R} - G \frac{Mm}{R} = -\frac{1}{2} G \frac{Mm}{R}$$

$$E_m(\text{superficie}) = -G \frac{Mm}{R_T}$$

En la superficie terrestre, el satélite solo tiene energía potencial.

Sustituyendo en el incremento de energía:

$$\Delta E = -\frac{1}{2} G \frac{Mm}{R} - \left( -G \frac{Mm}{R_T} \right) = GMm \cdot \left( \frac{1}{R_T} - \frac{1}{2R} \right)$$

$$\Delta E = 6,67 \times 10^{-11} \cdot 5,98 \times 10^{24} \cdot 20 \cdot \left( \frac{1}{6371 \times 10^3} - \frac{1}{2 \cdot 4,23 \times 10^7} \right) = 1,16 \times 10^9 \text{ J}$$

**Junio 2007. Cuestión 1.-** Sabiendo que la aceleración de la gravedad en un movimiento de caída libre en la superficie de la Luna es un sexto de la aceleración de la gravedad en la superficie de la Tierra y que el radio de la Luna es aproximadamente  $0,27 R_T$  (siendo  $R_T$  el radio terrestre), calcule:

- la relación entre las densidades medias  $\rho_{Luna} / \rho_{Tierra}$
- la relación entre las velocidades de escape de un objeto desde sus respectivas superficies  $(v_e)_{Luna} / (v_e)_{Tierra}$ .

**Solución.**

**a.** Este apartado se resuelve comparando la intensidad de campo gravitatorio ( $g$ ) en la superficie de la Tierra y en la superficie lunar.

La aceleración de la gravedad en la superficie de un planeta se puede expresar en función de la masa y el radio del planeta, igualando el peso en la superficie con la fuerza gravitacional.

$$P = F_G \quad ; \quad m \cdot g = G \frac{M \cdot m}{R^2} \quad ; \quad g = G \frac{M}{R^2}$$

$$\text{Para la superficie terrestre: } g_T = G \frac{M_T}{R_T^2}$$

$$\text{Para la superficie lunar: } g_L = G \frac{M_L}{R_L^2}$$

$$g_L = \frac{1}{6} g_T \quad \frac{g_L}{g_T} = \frac{1}{6} \quad \frac{G \frac{M_L}{R_L^2}}{G \frac{M_T}{R_T^2}} = \frac{1}{6} \quad \frac{M_L R_T^2}{M_T R_L^2} = \frac{1}{6}$$

Las masa de la tierra y de la luna se expresan en función de sus densidades

$$\frac{\rho_L V_L R_T^2}{\rho_T V_T R_L^2} = \frac{1}{6} \quad \frac{\rho_L \frac{4}{3} \pi R_L^3 R_T^2}{\rho_T \frac{4}{3} \pi R_T^3 R_L^2} = \frac{1}{6} \quad \frac{\rho_L R_L}{\rho_T R_T} = \frac{1}{6} \quad \frac{\rho_L}{\rho_T} = \frac{R_T}{6 R_L}$$

$$\frac{\rho_L}{\rho_T} = \frac{R_T}{6 \cdot 0,27 R_T} \quad \frac{\rho_L}{\rho_T} = 0,62$$

**b.** La velocidad de escape de un planeta se calcula por el principio de conservación de la energía, la energía mecánica en la superficie del planeta (suma de cinética y potencial) debe ser igual a la que tendrá cuando escape del campo gravitatorio, que será nula debido a que suponemos que llega con velocidad nula ( $E_c = 0$ ) y que esta a una distancia infinita ( $E_p = 0$ ).

$$\frac{1}{2} m v^2 - G \frac{Mm}{R_T} = 0$$

Simplificando las masas se despeja  $v$ .

$$\frac{1}{2}v^2 = G \frac{M}{R_T} : v = \sqrt{2G \frac{M}{R_T}}$$

$$\left. \begin{aligned} (v_e)_{Luna} &= \sqrt{2G \frac{M_L}{R_L}} \\ (v_e)_{Tierra} &= \sqrt{2G \frac{M_T}{R_T}} \end{aligned} \right\} : \frac{(v_e)_{Luna}}{(v_e)_{Tierra}} = \frac{\sqrt{2G \frac{M_L}{R_L}}}{\sqrt{2G \frac{M_T}{R_T}}} = \sqrt{\frac{M_L R_T}{M_T R_L}}$$

$$\frac{(v_e)_{Luna}}{(v_e)_{Tierra}} = \sqrt{\frac{\frac{4}{3}\pi R_L^3 \cdot \rho_L R_T}{\frac{4}{3}\pi R_T^3 \cdot \rho_T R_L}} = \sqrt{\frac{R_L^2 \cdot \rho_L}{R_T^2 \cdot \rho_T}} = \sqrt{\frac{(0,27 \cdot R_T)^2}{R_T^2} \cdot 0,62} = 0,27 \cdot \sqrt{0,62} = 0,21$$

**Junio 2007. Problema 1B.-** Fobos es un satélite de Marte que gira en una órbita circular de 9380 km de radio, respecto al centro del planeta, con un periodo de revolución de 7,65 horas. Otro satélite de Marte, Deimos, gira en una órbita de 23460 km de radio. Determine:

- La masa de Marte.
- El período de revolución del satélite Deimos.
- La energía mecánica del satélite Deimos.
- El módulo del momento angular de Deimos respecto al centro de Marte.

Datos: Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ Kg}^{-2}$

Masa de Fobos =  $1,1 \times 10^{16} \text{ Kg}$ ; Masa de Deimos =  $2,4 \times 10^{15} \text{ Kg}$

**Solución.**

**a.** Para calcular la masa de Marte (M) se tiene en cuenta que si Fobos realiza una órbita circular alrededor de Marte, la suma de fuerzas que actúan sobre Fobos será igual a la fuerza centrípeta que actúa sobre él.

$$F_g = F_c \quad G \frac{M \cdot m_f}{R^2} = m_f \frac{v^2}{R} \quad G \frac{M}{R} = v^2 \quad M = \frac{v^2 \cdot R}{G} = \frac{(\omega \cdot R)^2 \cdot R}{G} = \frac{\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 R^3}{G}$$

$$M = \frac{4\pi^2 R^3}{G \cdot T^2} = \frac{4\pi^2 \cdot (9,38 \times 10^6)^3}{6,67 \times 10^{-11} \cdot (7,62 \cdot 3600)^2} = 6,49 \times 10^{23} \text{ Kg}$$

**b.** El periodo de Deimos se puede calcular aplicando la 3ª ley de Kepler.

$$\frac{T^2}{R^3} = \text{cte} \Rightarrow \frac{T_D^2}{R_D^3} = \frac{T_f^2}{R_f^3}$$

$$T_D = T_f \cdot \sqrt{\frac{R_D^3}{R_f^3}} = 7,62 \cdot \sqrt{\frac{(23,46 \times 10^6)^3}{(9,38 \times 10^6)^3}} = 30,14 \text{ h} = 1 \text{ d } 6 \text{ h } 8 \text{ min}$$

**c.**

$$E_m = E_c + E_p = \frac{1}{2} m_D v^2 + \left(-G \frac{M m_D}{R_D}\right) = \left\{v^2 = G \frac{M}{R_D}\right\} = -\frac{1}{2} G \frac{M m_D}{R_D}$$

$$E_m = -\frac{1}{2} \cdot 6,67 \times 10^{-11} \frac{6,49 \times 10^{23} \cdot 2,4 \times 10^{15}}{23,46 \times 10^6} = -2,2 \times 10^{21} \text{ J}$$

**d.**  $\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v}$  En módulo  $L = r \cdot mv \cdot \text{sen } \alpha$

Aplicando a Deimos:

$$L_D = r_D \cdot m_D v_D \cdot \text{sen } \alpha \quad r_D \perp v_D \Rightarrow \alpha = 90 ; \text{sen } \alpha = 1$$

$$L_D = r_D \cdot m_D v_D = r_D \cdot m_D \cdot \omega_D \cdot r_D = r_D^2 \cdot m_D \cdot \frac{2\pi}{T_D}$$

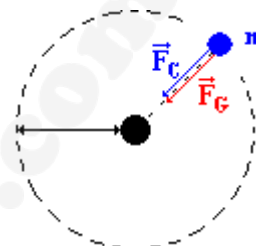
$$L_D = (23,46 \times 10^6)^2 \cdot 2,4 \times 10^{15} \cdot \frac{2\pi}{30,14 \cdot 3600} = 7,65 \times 10^{25} \text{ N m}$$

**Modelo 2007. Cuestión 1.-** Un objeto de 5 kg de masa posee una energía potencial gravitatoria  $E_p = -2 \times 10^8 \text{ J}$  cuando se encuentra a cierta distancia de la Tierra.

- Si el objeto a esta distancia estuviera describiendo una órbita circular. ¿cuál sería su velocidad?
- Si la velocidad del objeto a esa distancia fuese de 9 km/s, ¿cuál sería su energía mecánica? ¿Podría el objeto estar describiendo una órbita elíptica es este caso?

**Solución.**

a) Sobre un objeto que describe una órbita circular la única fuerza que a actúa sobre él es la fuerza de atracción gravitatoria, es una fuerza centrípeta dirigida hacia el centro de la tierra.



$$F_g = F_c$$

$$G \frac{M_T \cdot m}{d^2} = m \frac{v^2}{d} \quad \text{despejando} \quad v = \sqrt{\frac{G \cdot M_T}{d}}$$

Por otro lado, la energía potencial gravitatoria es:

$$E_p = -G \frac{M_T \cdot m}{d} = -2 \times 10^8 \text{ J} \Rightarrow G \frac{M_T}{d} = \frac{2 \times 10^8 \text{ J}}{m(\text{kg})}$$

Sustituyendo en la expresión de la velocidad:

$$v = \sqrt{G \frac{M_T}{d}} = \sqrt{\frac{2 \times 10^8 \text{ J}}{m(\text{kg})}} = \sqrt{\frac{2 \times 10^8 \text{ J}}{5 \text{ kg}}} \approx 6324 \text{ m/s} \approx 6,3 \text{ Km/s}$$

b) La energía mecánica es la suma de la energía potencial y de la energía cinética.

$$E_m = E_p + E_c = E_p + \frac{1}{2} m v^2 = -2 \times 10^8 + \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot (9000)^2 = 2,5 \times 10^6 \text{ J}$$

Si la energía mecánica es mayor que cero, el objeto se escapa del campo gravitatorio, y por tanto no describe ningún tipo de órbita.

**Nota**

El criterio que se debe seguir para evaluar el tipo de órbita es el siguiente:

- Si  $E_M > 0$ , el objeto se escapa del campo gravitatorio, llegando al infinito con velocidad, seguirá una trayectoria hiperbólica.
- Si  $E_M = 0$ , el objeto se escapa del campo gravitatorio, llegando al infinito sin velocidad (caso teórico, el tiempo que tardaría sería infinito), seguirá una trayectoria parabólica
- Si la  $E_M < 0$ , el objeto queda atrapado en el campo gravitatorio. En este caso se pueden dar tres situaciones diferentes:
  - $\frac{1}{2} |E_p| < E_c < |E_p|$  El objeto describe una órbita elíptica, aumentando la excentricidad de la elipse a medida que aumente la velocidad (energía cinética).
  - $\frac{1}{2} |E_p| = E_c$  El objeto describe una órbita circular.
  - $\frac{1}{2} |E_p| > E_c$  El objeto no describe ningún tipo de órbita y acaba colapsando contra el planeta.

**Septiembre 2006. Cuestión 1.-**

- a) Desde la superficie de la Tierra lanza verticalmente hacia arriba un objeto con una velocidad  $v$ . Si se desprecia el rozamiento, calcule el valor de  $v$  necesario para que el objeto alcance una altura igual al radio de la Tierra.
- b) Si se lanza el objeto desde la superficie de la Tierra con una velocidad doble a la calculada en el apartado anterior, ¿escapará o no del campo gravitatorio terrestre?

Datos: Masa de la Tierra  $M_T = 5,98 \times 10^{24}$  kg      Radio de la Tierra  $R_T = 6370$  km  
 Constante de Gravitación  $G = 6,67 \times 10^{-11}$  N m<sup>2</sup> kg<sup>-2</sup>

**Solución.**

- a. Igualamos las energías mecánicas en la superficie de la Tierra y en la órbita con  $r = 2R_T$
- $$E_m(\text{Superficie}) = E_m(\text{Órbita})$$

$$-G \cdot \frac{M_T \cdot m}{R_T} + \frac{1}{2}mv^2 = -G \cdot \frac{M_T \cdot m}{2R_T}$$

Simplificando la masa  $m$  en toda la ecuación, se despeja la velocidad

$$\frac{1}{2}v^2 = G \cdot M_T \left( \frac{1}{R_T} - \frac{1}{2R_T} \right)$$

$$v^2 = 2G \cdot M_T \left( \frac{1}{R_T} - \frac{1}{2R_T} \right) \quad v = \sqrt{2GM_T \left( \frac{1}{2R_T} \right)} \quad v = \sqrt{\frac{G \cdot M_T}{R_T}}$$

Sustituyendo datos numéricos:

$$v = \sqrt{\frac{6,67 \times 10^{-11} \cdot 5,98 \times 10^{24}}{6,37 \times 10^6}} = 7913,1 \text{ m/s}$$

- b. Si escapa del campo gravitatorio, la energía mecánica final será la que tenga en el infinito (punto donde la tierra no ejerce influencia), que es igual a cero. Procediendo como en el apartado a

$$E_m(\text{Superficie}) = E_m(\text{Infinito})$$

$$-G \cdot \frac{M \cdot m}{R_T} + \frac{1}{2}mv^2 = 0$$

Dividiendo toda la ecuación por la masa del objeto:

$$-G \cdot \frac{M}{R_T} + \frac{1}{2}v^2 = 0$$

Para saber si el objeto escapa de la tierra, se calcula con la igualdad anterior la velocidad de escape de la tierra.

$$-G \cdot \frac{M}{R_T} + \frac{1}{2}v_{\text{esc}}^2 \geq 0 \quad v_{\text{esc}} \geq \sqrt{2G \cdot \frac{M}{R_T}} = \sqrt{2 \cdot 6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \times 10^{24}}{6,37 \times 10^6}} = 11190 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{objeto}} = 2 \cdot 7913,1 = 15826,2 > v_{\text{esc}}$$

Como la velocidad del objeto es superior a la de escape, el objeto **se escapa** del campo gravitatorio

**Junio 2006. Cuestión 1.-** Llamando  $g_0$  y  $V_0$  a la intensidad de campo gravitatorio y al potencial gravitatorio en la superficie terrestre respectivamente, determine en función del radio de la Tierra:

- a) La altura sobre la superficie terrestre a la cual la intensidad de campo gravitatorio es  $g_0/2$ .
- b) La altura sobre la superficie terrestre a la cual el potencial gravitatorio es  $V_0/2$ .

**Solución.**

El campo gravitatorio y el potencial gravitatorio a una distancia  $R$  del centro de la Tierra son, respectivamente y en valor absoluto:

$$g = G \frac{M_T}{R^2} \quad V = G \frac{M_T}{R}$$

donde  $G$  = constante de gravitación y  $M_T$  = masa de la tierra.

Por tanto en la superficie terrestre, donde la distancia al centro es el radio de la Tierra  $R_T$ .

$$g_o = G \frac{M_T}{R_T^2} \quad V_o = G \frac{M_T}{R_T}$$

a. Se busca la distancia  $R$  a la que se cumple:

$$g = \frac{g_o}{2}$$

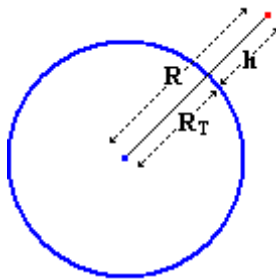
Sustituyendo por sus respectivas expresiones.

$$G \frac{M_T}{R^2} = \frac{1}{2} G \frac{M_T}{R_T^2}$$

Despejando  $R$ :

$$R^2 = 2R_T^2 \Rightarrow R = \sqrt{2}R_T$$

Para calcular la altura ( $h$ ) sobre la superficie se tiene en cuenta:



$$h = R - R_T$$

Como se ve en la figura.

$$h = \sqrt{2}R - R = (\sqrt{2} - 1)R_T = 0,41R_T$$

b. Se busca la distancia  $R$  al centro de la tierra a la que se cumple:

$$V = \frac{V_o}{2}$$

Sustituyendo por sus respectivas expresiones.

$$G \frac{M_T}{R} = \frac{1}{2} G \frac{M_T}{R_T}$$

Despejando  $R$ :

$$R = 2R_T.$$

Si  $h$  es la altura sobre la superficie, al igual que en el apartado anterior se tiene que:

$$h = R - R_T = 2R_T - R_T$$

$$h = R_T$$

**Junio 2006. Problema 1A.-** Un satélite artificial describe una órbita circular alrededor de la Tierra. En esta órbita la energía mecánica del satélite es  $-4,5 \times 10^9$  J y su velocidad es  $7610 \text{ m s}^{-1}$  Calcule:

- El módulo del momento lineal del satélite y el módulo del momento angular del satélite respecto al centro de la Tierra.
- El periodo de la órbita y la altura a la que se encuentra el satélite.

Datos: Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

Masa de la Tierra  $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$

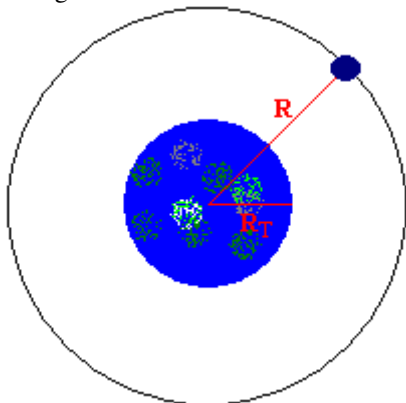
Radio de la Tierra  $R_T = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$

**Solución.**

Para resolver los apartados a) y b) es necesario conocer la masa del satélite y el radio de su órbita.

El radio se calcula teniendo en cuenta que en una órbita circular la fuerza centrífuga es igual a la

fuerza gravitatoria.



$$F_c = F_g \Rightarrow m \frac{v^2}{R} = G \frac{M_T m}{R^2}$$

Igualdad de la que se despeja el radio de la órbita.

$$R = \frac{GM_T}{v^2} \quad R = 6890 \text{ Km}$$

La energía mecánica en una órbita circular coincide con la mitad de la energía potencial.

$$E_m = \frac{1}{2} E_p = -\frac{1}{2} G \frac{M_T m}{R}$$

donde  $m$  es la masa del satélite.

$$m = -\frac{2 \cdot R \cdot E_m}{G \cdot M_T} \quad m = 155 \text{ kg}$$

a. El modulo del momento lineal es:

$$p = m \cdot v = 155 \text{ kg} \cdot 7610 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1180 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

El módulo del momento angular es:

$$L = m \cdot v \cdot R = 155 \text{ kg} \cdot 7610 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 6890 \times 10^6 \text{ m} = 8,13 \times 10^{12} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$$

b. Conociendo la velocidad y el radio de la orbita el periodo se calcula a partir de:

$$v = \frac{2\pi R}{T} \rightarrow T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi \cdot 6890 \times 10^6 \text{ m}}{7610 \text{ m s}^{-1}} = 5689 \text{ s}$$

La altura sobre la superficie es la diferencia entre el radio de la tierra y el de la órbita:

$$h = R - R_T = 6890 - 6370 = 520 \text{ Km}$$

### Modelo 2006. Cuestión 1.-

- Enuncie las tres leyes de Kepler sobre el movimiento planetario.
- Si el radio de la órbita de la Tierra es  $1,50 \times 10^{11} \text{ m}$  y el de Urano  $2,87 \times 10^{12} \text{ m}$  calcule el periodo orbital de Urano.

#### Solución.

a. Las tres leyes de Kepler son.

- Los planetas describen orbitas elípticas con el sol situado en un foco
- La velocidad areolar (el área que barre el vector de posición del planeta por unidad de tiempo) es constante.
- Los cuadrados de los periodos de revolución de los planetas son proporcionales a los cubos de sus distancias medias al sol.

b.

$$R_T = 1,50 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$R_u = 2,87 \times 10^{12} \text{ m}$$

De acuerdo con la tercera ley de Kepler  $T^2 = CR^3$  donde  $C$  es una constante que podemos calcular con los datos del radio de la orbita terrestre y de su periodo orbital que es un año.

$$T_T^2 = CR_T^3 \Rightarrow C = \frac{T_T^2}{R_T^3}$$

Como Urano cumple la misma relación

$$T_u^2 = CR_u^3 = \frac{T_T^2}{R_T^3} R_u^3 \Rightarrow T_u^2 = \frac{R_u^3}{R_T^3} T_T^2$$

$$T_u = \sqrt{\frac{R_u^3}{R_T^3}} T_T = \sqrt{\frac{(2,87 \times 10^{12} \text{ m})^3}{(1,50 \times 10^{11} \text{ m})^3}} \times 1 \text{ año} = 83,7 \text{ años}$$

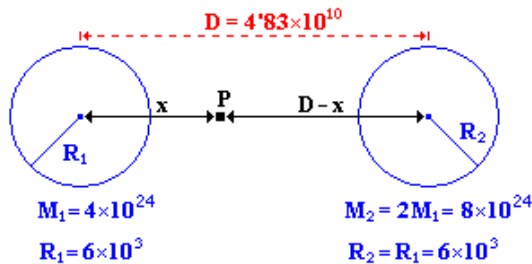
**Modelo 2006. Problema 1A.-** Se lanza una nave de masa  $m = 5 \times 10^3$  kg desde la superficie de un planeta de radio  $R_1 = 6 \times 10^3$  km y masa  $M_1 = 4 \times 10^{24}$  kg, con velocidad inicial  $v_0 = 2 \times 10^4$  m/s en dirección hacia otro planeta del mismo radio  $R_2 = R_1$  y masa  $M_2 = 2 M_1$ , siguiendo la línea recta que une los centros de ambos planetas. Si la distancia entre dichos centros es  $D = 4,83 \times 10^{10}$  m, determine:

- La posición del punto P en el que la fuerza neta sobre la nave es cero.
- La energía cinética con la que llegará la nave a la superficie del segundo planeta.

Datos: Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

**Solución.**

a.



Llamemos  $x$  a la distancia entre el planeta 1 y el punto P de manera que el módulo de la fuerza que sufre el satélite por la acción de la gravedad de cada planeta es:

$$F_1 = G \frac{M_1 m}{x^2} \quad F_2 = G \frac{M_2 m}{(D-x)^2}$$

Si ambas se igualan:

$$F_1 = F_2 \Rightarrow G \frac{M_1 m}{x^2} = G \frac{M_2 m}{(D-x)^2}$$

Teniendo en cuenta que  $M_2 = 2M_1$ , y simplificando la igualdad se obtiene una ecuación de 2º grado.

$$\frac{M_1}{x^2} = \frac{2M_1}{(D-x)^2} \Rightarrow 2x^2 = (D-x)^2 \Rightarrow x^2 + 2Dx - D^2 = 0$$

$$x = \frac{-2D \pm \sqrt{4D^2 + 4D^2}}{2} = -D \pm \sqrt{2}D : \begin{cases} x = (\sqrt{2} - 1)D \\ x = (-1 - \sqrt{2})D \end{cases}$$

Como es una distancia solo sirve la solución positiva

$$x = D(\sqrt{2} - 1) = 4,83 \times 10^{10} \text{ m} \cdot (\sqrt{2} - 1) = 2 \times 10^{10} \text{ m}$$

b. Teniendo en cuenta que la energía mecánica se conserva, se cumplirá:

$$E_M(\text{Superficie planeta 1}) = E_M(\text{Superficie planeta 2})$$

- $E_M(\text{Superficie planeta 1}) = E_c(\text{I}) + E_p(\text{I}) = \frac{1}{2} m v_1^2 + \left( -G \frac{M_1 m}{R_1} - G \frac{M_2 m}{D - R_1} \right)$
- $E_M(\text{Superficie planeta 2}) = E_c(\text{II}) + E_p(\text{II}) = \frac{1}{2} m v_2^2 + \left( -G \frac{M_2 m}{R_2} - G \frac{M_1 m}{D - R_2} \right)$

Teniendo en cuenta que  $R_1 = R_2 = R$ , y que  $M_1 = M$ ;  $M_2 = 2M_1 = 2M$

$$E_M(\text{I}) = \frac{1}{2} m v_1^2 - G \frac{M \cdot m}{R} - G \frac{2M \cdot m}{D - R} \quad E_M(\text{II}) = \frac{1}{2} m v_2^2 - G \frac{2M \cdot m}{R} - G \frac{M \cdot m}{D - R}$$

Igualando las energías:  $E_M(\text{I}) = E_M(\text{II})$

$$\frac{1}{2} m v_1^2 - G \frac{M \cdot m}{R} - G \frac{2M \cdot m}{D - R} = \frac{1}{2} m v_2^2 - G \frac{2M \cdot m}{R} - G \frac{M \cdot m}{D - R}$$

$\underbrace{\frac{1}{2} m v_2^2}_{E_c(\text{II})}$

$$E_c(\text{II}) = \frac{1}{2} m v_1^2 - G \frac{M \cdot m}{R} - G \frac{2M \cdot m}{D - R} - \left( -G \frac{2M \cdot m}{R} - G \frac{M \cdot m}{D - R} \right)$$



Agrupando términos

$$E_c(\text{II}) = \frac{1}{2}mv_1^2 + G \frac{M \cdot m}{R} - G \frac{M \cdot m}{D-R} = \frac{1}{2}mv_1^2 + G \cdot M \cdot m \cdot \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{D-R} \right)$$

$$E_c(\text{II}) = \frac{1}{2}5 \times 10^3 \cdot (2 \times 10^4)^2 + 6,67 \times 10^{-11} \cdot 4 \times 10^{24} \cdot 5 \times 10^3 \cdot \left( \frac{1}{6 \times 10^6} - \frac{1}{4,83 \times 10^{10} - 6 \times 10^6} \right)$$

$$E_c(\text{II}) = 1,22 \times 10^{12} \text{ J}$$

Debido a la enorme diferencia entre el radio de los planetas y la distancia entre ellos, se pueden despreciar las energías potenciales del planeta dos en la superficie del planeta 1 y del planeta 1 en la superficie del planeta 2 sin que se modifique sustancialmente el cálculo.

- $E_M(\text{Superficie planeta 1}) = E_c(\text{I}) + E_p(\text{I}) = \frac{1}{2}mv_1^2 - G \frac{M_1 m}{R_1}$
- $E_M(\text{Superficie planeta 2}) = E_c(\text{II}) + E_p(\text{II}) = \frac{1}{2}mv_2^2 - G \frac{M_2 m}{R_2}$

Teniendo en cuenta que  $R_1 = R_2 = R$ , y que  $M_1 = M$ ;  $M_2 = 2M_1 = 2M$

$$E_M(\text{I}) = \frac{1}{2}mv_1^2 - G \frac{M \cdot m}{R} \quad E_M(\text{II}) = \frac{1}{2}mv_2^2 - G \frac{2M \cdot m}{R}$$

Igualando las energías:  $E_M(\text{I}) = E_M(\text{II})$

$$\frac{1}{2}mv_1^2 - G \frac{M \cdot m}{R} = \frac{1}{2}mv_2^2 - G \frac{2M \cdot m}{R}$$

$$E_c(\text{II}) = \frac{1}{2}mv_1^2 - G \frac{M \cdot m}{R} - \left( -G \frac{2M \cdot m}{R} \right)$$

Agrupando términos

$$E_c(\text{II}) = \frac{1}{2}mv_1^2 + G \frac{M \cdot m}{R} = \frac{1}{2}5 \times 10^3 \cdot (2 \times 10^4)^2 + 6,67 \times 10^{-11} \frac{4 \times 10^{24} \cdot 5 \times 10^3}{6 \times 10^6} = 1,22 \times 10^{12} \text{ J}$$

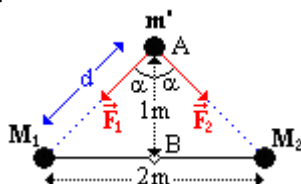
**Septiembre 2005. Cuestión 2.-** Dos masas iguales,  $M = 20 \text{ kg}$ , ocupan posiciones fijas separadas una distancia de  $2 \text{ m}$ , según indica la figura. Una tercera masa,  $m' = 0,2 \text{ kg}$ , se suelta desde el reposo en un punto  $A$  equidistante de las dos masas anteriores y a una distancia de  $1 \text{ m}$  de la línea que las une ( $AB = 1 \text{ m}$ ). Si no actúan más que las acciones gravitatorias entre estas masas, determine:

- La fuerza ejercida (módulo, dirección y sentido) sobre la masa  $m'$  en la posición  $A$ .
- Las aceleraciones de la masa  $m'$  en las posiciones  $A$  y  $B$ .

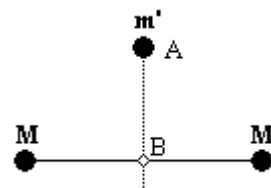
Dato: Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

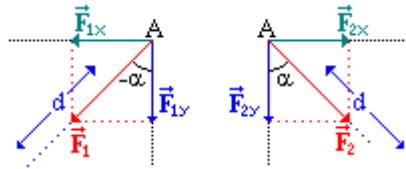
**Solución.**

- La expresión de la fuerza gravitatoria es  $F = G \frac{M \cdot M'}{d^2}$ , y la dirección es la que une las masas según muestra el esquema de la figura.



Las fuerzas  $\vec{F}_1$  y  $\vec{F}_2$  se descomponen en sus componentes vertical y horizontal.

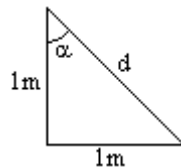




$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{1x} + \vec{F}_{1y} : \begin{cases} |\vec{F}_{1x}| = |\vec{F}_1| \cdot \text{sen}(-\alpha) \\ |\vec{F}_{1y}| = |\vec{F}_1| \cdot \text{cos}(-\alpha) \end{cases}$$

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_{2x} + \vec{F}_{2y} : \begin{cases} |\vec{F}_{2x}| = |\vec{F}_2| \cdot \text{sen} \alpha \\ |\vec{F}_{2y}| = |\vec{F}_2| \cdot \text{cos} \alpha \end{cases}$$

Por otra parte  $|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2| = G \frac{M \cdot m}{d^2}$ , por lo tanto hay que calcular d y  $\alpha$ .



d se halla por el teorema de Pitágoras

$$d = \sqrt{1^2 + 1^2} = \sqrt{2}m$$

$\alpha$  se halla teniendo en cuenta que es un triángulo isósceles rectángulo

$$\alpha = 45^\circ$$

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{1x} + \vec{F}_{1y} = |\vec{F}_{1x}| \vec{i} + |\vec{F}_{1y}| \vec{j} = G \frac{M_1 \cdot m'}{d^2} \cdot \text{sen}(-\alpha) \vec{i} + G \frac{M_1 \cdot m'}{d^2} \cdot \text{cos}(-\alpha) \vec{j}$$

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_{2x} + \vec{F}_{2y} = |\vec{F}_{2x}| \vec{i} + |\vec{F}_{2y}| \vec{j} = G \frac{M_2 \cdot m'}{d^2} \cdot \text{sen} \alpha \vec{i} + G \frac{M_1 \cdot m'}{d^2} \cdot \text{cos} \alpha \vec{j}$$

Sustituyendo por los valores:

$$\vec{F}_1 = 6'67 \cdot 10^{-11} \text{Nm}^2 \text{kg}^{-2} \frac{20 \text{kg} \cdot 0'2 \text{kg}}{\sqrt{2}^2 \text{m}^2} \cdot (\text{sen}(-45) \vec{i} + \text{cos}(-45) \vec{j}) = 1'33 \cdot 10^{-10} \left( -\frac{\sqrt{2}}{2} \vec{i} + \frac{\sqrt{2}}{2} \vec{j} \right)$$

$$\vec{F}_2 = 6'67 \cdot 10^{-11} \text{Nm}^2 \text{kg}^{-2} \frac{20 \text{kg} \cdot 0'2 \text{kg}}{\sqrt{2}^2 \text{m}^2} \cdot (\text{sen} 45 \vec{i} + \text{cos} 45 \vec{j}) = 1'33 \cdot 10^{-10} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} \vec{i} + \frac{\sqrt{2}}{2} \vec{j} \right)$$

La fuerza gravitatoria total ejercida por las masas M sobre la masa m' es la suma vectorial de  $\vec{F}_1$  y  $\vec{F}_2$ .

$$\vec{F}_1 = 1'33 \cdot 10^{-10} \left( -\frac{\sqrt{2}}{2} \vec{i} + \frac{\sqrt{2}}{2} \vec{j} \right) \text{N}$$

$$\vec{F}_2 = 1'33 \cdot 10^{-10} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} \vec{i} + \frac{\sqrt{2}}{2} \vec{j} \right) \text{N}$$

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 1'33 \cdot 10^{-10} \left( 0 \vec{i} + \sqrt{2} \vec{j} \right) \text{N}$$

operando para simplificar

$$\vec{F} = 1'89 \cdot 10^{-10} \vec{j} \text{N}$$

**b.** Si se aplica la ecuación de Newton en el punto A se obtiene la aceleración a la que se ve sometida la masa m' en dicho punto.

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \Rightarrow \vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{1'89 \cdot 10^{-10} \vec{j} \text{N}}{0'2 \text{kg}} = 9'43 \cdot 10^{-10} \vec{j} \text{m/s}^2$$

En el punto B, las fuerzas no tienen componente  $\vec{j}$  por lo que la fuerza resultante es nula y por tanto la aceleración en A también es nula.

**Septiembre 2005. Problema 1A.** Desde la superficie terrestre se lanza un satélite de 400 kg de masa hasta situarlo en una órbita circular a una distancia del centro de la Tierra igual a las 7/6 partes del radio terrestre. Calcule:

- La intensidad de campo gravitatorio terrestre en los puntos de la órbita del satélite.
- La velocidad y el periodo que tendrá el satélite en la órbita.
- La energía mecánica del satélite en la órbita
- La variación de la energía potencial que ha experimentado el satélite al elevarlo desde la superficie de la Tierra hasta situarlo en su órbita.

Datos: Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$

Masa de la Tierra  $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$

Radio de la Tierra  $R_T = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$

**Solución.**

a. La expresión del campo gravitatorio es:

$$\vec{g} = -G \cdot \frac{M}{R^2} \vec{U}_R$$

Donde  $\vec{U}_R$  es el vector unitario en la dirección del radio. La intensidad será el modulo de  $\vec{g}$ .

$$|\vec{g}| = g = G \cdot \frac{M}{R^2}$$

Teniendo en cuenta que el radio de la órbita es 7/6 del radio terrestre:

$$g = G \cdot \frac{M}{\left(\frac{7}{6} R_T\right)^2} = \frac{36}{49} \cdot G \frac{M_T}{R_T^2} = \frac{36}{49} \cdot g = 7,2 \text{ N/kg}$$

b. En una órbita circular la fuerza centrífuga compensa a la gravitatoria.

$$F_c = F_g \Rightarrow m \frac{v^2}{R} = G \frac{M_T \cdot m}{R^2}$$

Despejando la velocidad:

$$v = \sqrt{G \frac{M}{R}}$$

Teniendo en cuenta que el radio de la órbita es 7/6 del radio terrestre:

$$v = \sqrt{G \frac{M_T}{\frac{7}{6} R_T}} = \sqrt{6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2} \frac{5,98 \times 10^{24} \text{ kg}}{\frac{7}{6} \cdot 6,37 \times 10^6 \text{ m}}} = 7326 \text{ m/s}$$

Por ser un movimiento circular uniforme:

$$\left. \begin{array}{l} T = \frac{2\pi}{\omega} \\ v = \omega \cdot R \end{array} \right\} : T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi \cdot \frac{7}{6} \cdot R_T}{v} = \frac{2\pi \cdot \frac{7}{6} \cdot 6,37 \times 10^6 \text{ m}}{7326 \text{ m/s}} = 6374 \text{ s}$$

c. La energía mecánica es la suma de la cinética y la potencial.

$$E_m = E_c + E_p$$

Energía cinética:

$$\left. \begin{array}{l} E_c = \frac{1}{2} m v^2 \\ v = \sqrt{G \frac{M_T}{R}} \end{array} \right\} : E_c = \frac{1}{2} m \cdot \sqrt{G \frac{M_T}{R}}^2 = \frac{1}{2} G \frac{M_T m}{R}$$

Energía potencial

$$E_p = -G \frac{M_T m}{R}$$

Sumando los dos términos se obtiene la energía mecánica del satélite en la órbita.

$$E_m = E_c + E_p = \frac{1}{2} G \frac{M_T m}{R} + \left( -\frac{M_T m}{R} \right) = -\frac{1}{2} G \frac{M_T m}{R} = -\frac{1}{2} G \frac{M_T m}{\frac{7}{6} R_T}$$

sustituyendo valores

$$E_m = -\frac{1}{2} G \frac{M_T m}{\frac{7}{6} R_T} = -\frac{1}{2} 6'67 \times 10^{-11} \text{ Mm}^2 \text{ kg}^{-2} \frac{5'98 \times 10^{24} \text{ kg} \cdot 400 \text{ kg}}{\frac{7}{6} \cdot 6'37 \times 10^6 \text{ m}} = -1'07 \times 10^{10} \text{ J}$$

d. La variación de energía potencial es:

$$\Delta E_p = E_p(f) - E_p(i)$$

$$\left. \begin{array}{l} E_p(i) = -G \frac{M_T m}{R_T} \\ E_p(f) = -G \frac{M_T m}{R} \end{array} \right\} : \Delta E_p = -G \frac{M_T m}{R} - \left( -G \frac{M_T m}{R_T} \right) = G M_T m \cdot \left( \frac{1}{R_T} - \frac{1}{R} \right) = G M_T m \cdot \left( \frac{1}{R_T} - \frac{1}{\frac{7}{6} R_T} \right)$$

sustituyendo valores

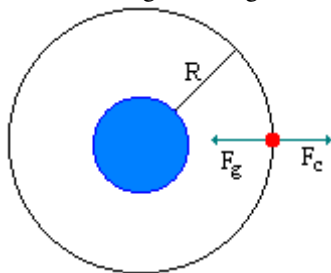
$$\Delta E_p = 6'67 \times 10^{-11} \cdot 5'98 \times 10^{24} \cdot 400 \cdot \left( \frac{1}{6'37 \times 10^6} - \frac{1}{\frac{7}{6} \cdot 6'37 \times 10^6} \right) = 3'6 \times 10^9 \text{ J}$$

### Junio 2005. Cuestión 2.-

- Deduzca la expresión de la energía cinética de un satélite en órbita circular alrededor de un planeta en función del radio de la órbita y de las masas del satélite y del planeta.
- Demuestre que la energía mecánica del satélite es la mitad de su energía potencial.

**Solución.**

a. Para deducir la  $E_c$ , primero se calcula la velocidad del satélite en la órbita, para ello se iguala la fuerza centrífuga con la gravitatoria



$$\begin{aligned} |\vec{F}_g| &= |\vec{F}_c| \\ G \cdot \frac{M \cdot m}{R^2} &= m \cdot \frac{v^2}{R} \Rightarrow v^2 = G \cdot \frac{M}{R} \\ E_c &= \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} m \cdot G \frac{M}{R} = \frac{1}{2} G \frac{M \cdot m}{R} \end{aligned}$$

b. Para calcular la energía mecánica se suman la cinética y la potencial.

$$E_M = E_c + E_p = \frac{1}{2} G \frac{M \cdot m}{R} - G \frac{M \cdot m}{R} = -\frac{1}{2} G \frac{M \cdot m}{R} = \frac{1}{2} \left( -G \frac{M \cdot m}{R} \right) = \frac{1}{2} E_p$$

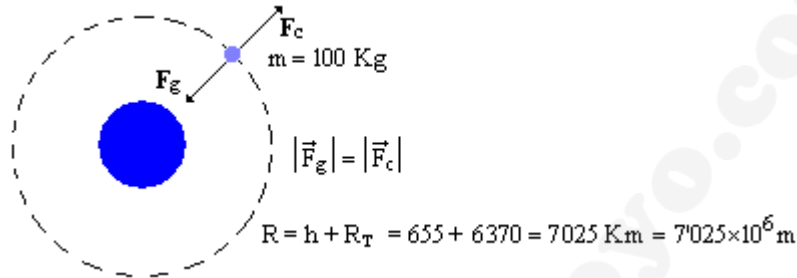
**Junio 2005. Problema 1A.-** Un satélite artificial de la Tierra de 100 kg de masa describe una órbita circular a una altura de 655 Km. Calcule:

- El periodo de la órbita.
- La energía mecánica del satélite.
- El módulo del momento angular del satélite respecto al centro de la Tierra.
- El cociente entre los valores de la intensidad de campo gravitatorio terrestre en el satélite y en la superficie de la Tierra.

$$\begin{aligned} \text{Datos: Masa de la Tierra} & M_T = 5'98 \times 10^{24} \text{ kg} \\ \text{Radio de la Tierra} & R_T = 6'37 \times 10^6 \text{ m} \\ \text{Constante de Gravitación Universal} & G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2} \end{aligned}$$

**Solución.**

**a.**



Al ser una órbita circular:  $|\vec{F}_g| = |\vec{F}_c|$

$$G \cdot \frac{M \cdot m}{R^2} = m \cdot \frac{v^2}{R} \quad \Rightarrow \quad v^2 = G \cdot \frac{M}{R}$$

Por otra parte en un movimiento circular se cumple:

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{2\pi}{\omega} \\ v &= \omega \cdot R \end{aligned} \right\} : T = \frac{2\pi \cdot R}{v}$$

sustituyendo la velocidad:

$$\begin{aligned} T &= \frac{2\pi \cdot R}{\sqrt{\frac{G \cdot M}{R}}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{R^3}{G \cdot M}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{(7'025 \times 10^6 \text{ m})^3}{6'67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ Kg}^{-2} \cdot 5'98 \times 10^{24} \text{ Kg}}} = 5857'8 \text{ s} \\ T &= \frac{5857'8 \text{ s}}{3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} = 1 \text{ h } 37' 82'' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b.} \quad E_m &= E_c + E_p = \frac{1}{2} m v^2 + \left( -G \frac{M m}{R} \right) = \left\{ v^2 = G \frac{M}{R} \right\} = -\frac{1}{2} G \frac{M m}{R} \\ E_m &= -\frac{1}{2} 6'67 \times 10^{-11} \cdot \frac{5'98 \times 10^{24} \cdot 100}{7'025 \times 10^6} = -2'8 \times 10^9 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c.} \quad |\vec{L}| &= |\vec{R} \times \vec{p}| ; L = R \cdot p \cdot \text{sen } 90^\circ = R \cdot m v = R \cdot m \sqrt{G \frac{M}{R}} = m \sqrt{G \cdot M \cdot R} \\ L &= 100 \cdot \sqrt{6'67 \times 10^{-11} \cdot 5'98 \times 10^{24} \cdot 7'025 \times 10^6} = 5'3 \times 10^{12} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

**d.** Igualando el peso con la fuerza gravitacional, se obtiene una expresión de la intensidad de campo gravitatorio en función de la masa del planeta y del radio (distancia al centro)

$$g = G \frac{M}{R^2}$$

Aplicando esta expresión en la superficie de la tierra y en la orbita del satélite se puede obtener

el cociente de las intensidades.

$$\left. \begin{aligned} g_T &= G \frac{M_T}{R_T^2} \\ g_{Sat} &= G \frac{M_T}{R_{Sat}^2} \end{aligned} \right\} \cdot \frac{g_{Sat}}{g_T} = \frac{G \frac{M_T}{R_{Sat}^2}}{G \frac{M_T}{R_T^2}} \text{ Simplificando } \frac{g_{Sat}}{g_T} = \left( \frac{R_T}{R_{Sa}} \right)^2 = \left( \frac{6'37 \times 10^6}{7'025 \times 10^6} \right)^2 = 0'82$$

**Modelo 2005. Cuestión 1.-** Razone si son verdaderas o falsas las siguientes afirmaciones:

- Un objeto de masa  $m_1$  necesita una velocidad de escape de la Tierra el doble que la que necesita otro objeto de masa  $m_2 = m_1/2$
- Se precisa realizar más trabajo para colocar en una misma órbita un satélite de masa  $m_1$  que otro satélite de masa  $m_2 = m_1/2$ , lanzados desde la superficie de la Tierra.

**Solución.**

**a. FALSO.** La velocidad de escape desde la superficie de la tierra se puede deducir sabiendo que la energía a una distancia infinita de la tierra es cero, y por tanto, si la energía que tiene un cuerpo en la superficie terrestre es:

$$E_{Sup} = -G \cdot \frac{M_T \cdot m_1}{R_T} \text{ (Energía potencial gravitatoria)}$$

habrá que imprimirle una energía cinética de escape:

$$E_c(Esc) = \frac{1}{2} m_1 \cdot v_{Esc}^2$$

de forma que.

$$E_{Sup} + E_c(Esc) = 0$$

sustituyendo las expresiones de ambas energías se despeja la velocidad de escape.

$$-G \cdot \frac{M_T \cdot m_1}{R_T} + \frac{1}{2} m_1 \cdot v_{Esc}^2 = 0$$

$$v_{Esc} = \sqrt{2G \cdot \frac{M_T}{R_T}}$$

Expresión que pone de manifiesto que la velocidad de escape de un planeta no depende de la masa del cuerpo, por tanto la velocidad de escape será idéntica para ambos cuerpos.

**b. VERDADERO.** Si consideramos el campo gravitatorio como puramente conservativo:

$$W = -\Delta E_p = E_{p_o} - E_{p_f}$$

$$W = -G \cdot \frac{M_T \cdot m_1}{R_T} - \left( -G \cdot \frac{M_T \cdot m_1}{r} \right) \quad \therefore W = G \cdot M_T \cdot m_1 \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R_T} \right)$$

donde  $r > R_T$

Como vemos, este trabajando si que depende de la masa del cuerpo  $m_1$ , (además de ser negativo, lo que indica que el trabajo lo realizamos nosotros "en contra" del campo, gastamos energía)

Según se observa en la formula anterior, si  $m_2 = \frac{m_1}{2}$

$$W = G \cdot M_T \cdot \frac{m_1}{2} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R_T} \right)$$

Cuanto mayor es la masa del cuerpo, más trabajo tenemos que realizar, por tanto, el satélite de masa  $m_1$  requiere efectuar mas trabajo que el de masa  $m_2 = m_1/2$

**Septiembre 2004. Cuestión 1.** La luz solar tarda 8,31 minutos en llegar a la Tierra y 6,01 minutos en llegar a Venus. Suponiendo que las órbitas descritas por ambos planetas son circulares, determine:

- el periodo orbital de Venus en torno al Sol sabiendo que el de la Tierra es de 365,25 días
- la velocidad con que se desplaza Venus en su órbita.

Dato: Velocidad de la luz en el vacío  $c = 3 \times 10^8$  m/s

**Solución.**

a. El periodo T se define como:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \left\{ \omega = \frac{v}{R} \right\} = \frac{2\pi}{v/R} \quad ; \quad T = \frac{2\pi R}{v}$$

En el caso de orbitas circulares, la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo debe ser igual a la fuerza centrípeta igualando la fuerza centrífuga a la gravitatoria se obtiene una expresión para la velocidad en la órbita:

$$F_g = F_c \quad G \frac{Mm}{R^2} = m \frac{v^2}{R} \quad v^2 = G \frac{M}{R}$$

Operando con las dos expresiones:

$$\left. \begin{array}{l} T = \frac{2\pi R}{v} \Rightarrow T^2 = \frac{4\pi^2 R^2}{v^2} \\ v^2 = G \frac{M}{R} \end{array} \right\} : T^2 = \frac{4\pi^2 R^2}{\frac{GM}{R}} = 4\pi^2 \frac{R^3}{GM} \rightarrow T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} R^3 \rightarrow \text{Ley de Kepler}$$

teniendo en cuenta que G y M(masa de Sol) son constantes,  $\frac{T^2}{R^3} = \text{cte}$ , y aplicando a las orbitas de la Tierra y de Venus

$$\frac{T_t^2}{R_t^3} = \frac{R_t^3}{R_v^3} \rightarrow T_v^2 = T_t^2 \frac{R_v^3}{R_t^3}$$

Los radios de la Tierra y de Venus se calculan a partir del tiempo que tarda en llegar la luz a cada uno de los planetas en un M.R.U.

$$t_t = 8,31 \text{ min} \cdot \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} = 498,6 \text{ seg}$$

$$t_v = 6,01 \text{ min} \cdot \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} = 360,6 \text{ seg}$$

multiplicando por la velocidad de la luz tenemos la distancia de la tierra al sol y de Venus al Sol.

$$R_T = d_{T-S} = 498,6 \text{ seg} \cdot 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1496 \times 10^8 \text{ m}$$

$$R_V = d_{V-S} = 360,6 \text{ seg} \cdot 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1082 \times 10^8 \text{ m}$$

$$T_v = \sqrt{T_t^2 \frac{R_v^3}{R_t^3}} = \sqrt{(365,25 \text{ días})^2 \cdot \left( \frac{1082 \times 10^8}{1496 \times 10^8} \right)^3} = 223,15 \text{ días}$$

b. La velocidad orbital de Venus será:

$$T = \frac{2\pi R_v}{V} \rightarrow V = \frac{2\pi R_v}{T_v} = 2\pi \times \frac{1082 \times 10^8 \text{ m}}{223,15 \times 24 \times 3600 \text{ s}} = 35261 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**Septiembre 2004. Problema 1A.** Un planeta esférico tiene 3200 km de radio y la aceleración de la gravedad en su superficie es  $6,2 \text{ m s}^{-2}$ . Calcule:

- La densidad media del planeta y la velocidad de escape desde su superficie.
- La energía que hay que comunicar a un objeto de 50 kg de masa para lanzarlo desde la superficie del planeta y ponerlo en órbita circular alrededor del mismo, de forma que su periodo sea de 2 horas.

Datos: Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

**Solución.**

a. Igualando el peso de los cuerpos en el planeta con la fuerza de atracción gravitacional:

$$m \cdot g = G \frac{M \cdot m}{R^2}$$

se obtiene una expresión de g en función de la masa y radio del planeta

$$g = G \frac{M}{R^2}$$

La masa de un sólido se puede expresar en función del volumen y la densidad( $\rho$ ), y para sólidos esféricos, el volumen se puede expresar en función del radio.

$$\left. \begin{array}{l} M = V \cdot \rho \\ V = \frac{4}{3} \pi \cdot R^3 \end{array} \right\} : M = \frac{4}{3} \pi \cdot R^3 \cdot \rho$$

sustituyendo en la expresión de g

$$g = G \frac{\frac{4}{3} \pi \cdot R^3 \cdot \rho}{R^2} \quad : \quad g = \frac{4}{3} \pi \cdot G \cdot R \cdot \rho$$

expresión de la que se puede despejar la densidad del planeta en función del radio y gravedad del mismo.

$$\rho = \frac{3g}{4\pi \cdot R \cdot G} = \left\{ \begin{array}{l} g = 6'2 \text{ m/s}^2 \\ R = 3200 \text{ Km} = 3'2 \times 10^6 \text{ m} \end{array} \right\} = \frac{3 \cdot 6'2}{4\pi \cdot 3'2 \times 10^6 \cdot 6'67 \times 10^{-11}} = 6934'7 \text{ kg/m}^3$$

La velocidad de escape del planeta se puede calcular por el principio de conservación de la energía, la energía mecánica en la superficie terrestre (suma de cinética y potencial) debe ser igual a la que tendrá cuando escape del campo gravitatorio, que será nula debido a que suponemos que llega con velocidad nula ( $E_c = 0$ ) y que esta a una distancia infinita ( $E_p = 0$ ).

$$\frac{1}{2} m v_e^2 - G \frac{M m}{R} = 0$$

Simplificando las masas se despeja v.

$$\frac{1}{2} v_e^2 = G \frac{M}{R} \quad : \quad v_e = \sqrt{2G \frac{M}{R}}$$

Como se desconoce la masa del planeta, se puede resolver de dos formas diferentes, relacionando M con la aceleración de la gravedad en la superficie del planeta y el radio, o calculando la masa del planeta con la densidad y el volumen.

Relacionando M con g y R: De la expresión  $g = G \frac{M}{R^2}$ , se despeja el producto  $G \cdot M = g \cdot R^2$ , sustituyendo

en la expresión de la velocidad de escape:

$$v_e = \sqrt{2 \frac{g \cdot R^2}{R}} = \sqrt{2g \cdot R} = \sqrt{2 \cdot 6,2 \cdot 3,2 \times 10^6} = 6299,2 \text{ m/s}$$

Calculando la masa con la densidad del planeta:  $M = V \cdot \rho = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho$

$$M = \frac{4}{3} \pi \cdot (3,2 \times 10^6)^3 \cdot 6934,7 = 9,52 \times 10^{23}$$

Sustituyendo en la expresión de la velocidad de escape:

$$v_e = \sqrt{2 \cdot 6,67 \times 10^{-11} \frac{9,52 \times 10^{23}}{3,2 \times 10^6}} = 6299,8 \text{ m/s}$$

**b.** Por el principio de conservación de energía, la energía mecánica en la superficie es igual a la energía mecánica en la órbita.

$$\begin{aligned} E_m(\text{superficie}) &= E_m(\text{órbita}) \\ (E_c + E_p)_{\text{superficie}} &= (E_c + E_p)_{\text{órbita}} \end{aligned}$$



$$E_c(\text{superficie}) + \left(-G \frac{Mm}{R_P}\right)_{\text{superficie}} = \frac{1}{2} m v_{\text{órb}}^2 + \left(-G \frac{Mm}{R_{\text{órb}}}\right)$$

La velocidad en la órbita se puede expresar en función de la masa y del radio del planeta. En el caso de orbitas circulares, la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo debe ser igual a la fuerza centrípeta igualando la fuerza centrífuga a la gravitatoria se obtiene una expresión para la velocidad en la órbita:

$$F_g = F_c \quad G \frac{Mm}{R^2} = m \frac{v^2}{R} \quad v^2 = G \frac{M}{R}$$

$$E_c(\text{superficie}) + -G \frac{Mm}{R_P} = \frac{1}{2} m G \frac{M}{R_{\text{órb}}} + \left(-G \frac{Mm}{R_{\text{órb}}}\right)$$

$$E_c(\text{superficie}) - G \frac{Mm}{R_P} = -\frac{1}{2} G \frac{Mm}{R_{\text{órb}}} \quad E_c(\text{superficie}) = G \frac{Mm}{R_P} - \frac{1}{2} G \frac{Mm}{R_{\text{órb}}}$$

$$E_c(\text{superficie}) = GMm \left( \frac{1}{R_P} - \frac{1}{2R_{\text{órb}}} \right)$$

Para calcular el radio de la órbita se emplea el periodo. Partiendo de la expresión de  $v$  en función de  $M$  y  $R$  ( $v^2 = G \frac{M}{R}$ ), y teniendo en cuenta que:  $\left. \begin{matrix} v = \omega R \\ \omega = \frac{2\pi}{T} \end{matrix} \right\} v = \frac{2\pi}{T} R$

$$\left(\frac{2\pi}{T} R\right)^2 = G \frac{M}{R} \quad : \quad \frac{4\pi^2}{T^2} = G \frac{M}{R^3} \quad : \quad R = \sqrt[3]{G \frac{MT^2}{4\pi^2}}$$

$$R = \sqrt[3]{6,67 \times 10^{-11} \frac{9,52 \times 10^{23} \cdot (2 \cdot 3600)^2}{4\pi^2}} = 4,37 \times 10^6 \text{ m}$$

Sustituyendo los valores en la energía cinética:

$$E_c(\text{superficie}) = 6,67 \times 10^{-11} \cdot 9,52 \times 10^{23} \cdot 50 \cdot \left( \frac{1}{3,2 \cdot 10^6} - \frac{1}{2 \cdot 4,37 \times 10^6} \right) = 6,29 \times 10^8 \text{ J}$$

**Junio 2004. Cuestión 2.-** Plutón describe una órbita elíptica alrededor del Sol. Indique para cada una de las siguientes magnitudes si su valor es mayor, menor o iguala en el afelio (punto más alejado del Sol) comparando con el perihelio (punto más próximo al Sol):

- Momento angular respecto a la posición del Sol.
- Momento lineal.
- Energía potencial
- Energía mecánica.

**Solución.**

**a.** El momento angular alrededor del sol es constante ya que es una fuerza central.

**b.** El momento lineal es diferente. Se puede calcular teniendo en cuenta que  $\vec{L} = \text{Cte}$

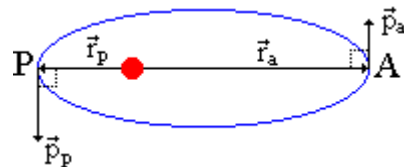
Dado que en el afelio y en el perihelio el ángulo entre  $\vec{r}$  y  $\vec{p}$  es de  $90^\circ$  el modulo de  $L$  queda

$$L_a = r_a \cdot p_a$$

$$L_p = r_p \cdot p_p$$

teniendo en cuenta que el momento angular es constante

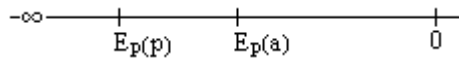
$$L_a = L_p \quad : \quad r_a p_a = r_p p_p \quad : \quad \frac{p_p}{p_a} = \frac{r_a}{r_p} > 1 (r_a > r_p) \Rightarrow p_p > p_a$$



- c. La energía potencial solo depende de la distancia:

$$E_p = -G \frac{M \cdot m}{r}$$

dado que el radio del afelio es mayor que el radio del perihelio,



se puede observar que en modulo  $|E_p(p)| > |E_p(a)|$  pero sin módulos  $E_p(a) > E_p(p)$  por lo que al conservarse la energía mecánica  $E_c(p) > E_c(a)$ .

- d. La energía mecánica permanece constante ya que no hay fuerzas de rozamiento.

**Modelo 2004. Cuestión 1.-** La velocidad de un asteroide es de 20 km/s en el perihelio y de 14 km/s en el afelio. Determine en esas posiciones cual es la relación entre:

- Las distancias al Sol en tomo al cual orbitan.
- Las energías potenciales del asteroide.

**Solución.**

a. El asteroide describe una órbita elíptica en torno a su Sol sometido a fuerzas centrales ( $\vec{r} \parallel \vec{F}$ ), y

por tanto  $\vec{M} = 0$ , lo cual supone que  $\vec{L} = \text{cte}$ . La constancia del momento angular, permite plantear que el momento angular en el perihelio (punto de la órbita más próximo al Sol) es igual al momento angular en el afelio (punto de la órbita más alejado del Sol).

$$\vec{L}_p = \vec{L}_a \quad \text{En módulo} \quad |\vec{r} \times \vec{p}|_p = |\vec{r} \times \vec{p}|_a ; \quad r_p \cdot mv_p \cdot \text{sen} \alpha = r_a \cdot mv_a \cdot \text{sen} \alpha$$

Simplificando la masa y teniendo en cuenta que el vector velocidad es tangente a la trayectoria, ( $\vec{r} \perp \vec{v}$ )  $\Rightarrow \alpha = 90^\circ$ .

$$r_p \cdot v_p \cdot \text{sen} 90 = r_a \cdot v_a \cdot \text{sen} 90 ; \quad r_p \cdot v_p = r_a \cdot v_a ; \quad \frac{r_p}{r_a} = \frac{v_a}{v_p}$$

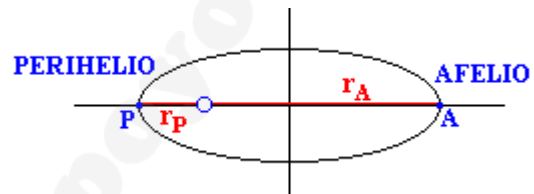
$$\frac{r_p}{r_a} = \frac{14}{20} = 0,7$$

- b. La energía potencial gravitatoria que tiene el asteroide en cada punto de la trayectoria, tiene la expresión:

$$E_p = -G \frac{M \cdot m}{r}$$

Si se aplica al afelio y perihelio y se compara:

$$\frac{(E_p)_p}{(E_p)_a} = \frac{-G \frac{M \cdot m}{r_p}}{-G \frac{M \cdot m}{r_a}} \quad \text{Simplificando y ordenando:} \quad \frac{(E_p)_p}{(E_p)_a} = \frac{r_a}{r_p} = \frac{1}{\frac{r_p}{r_a}} = \frac{1}{0,7} = 1,43$$



**Modelo 2004. Problema 1A.-** La sonda espacial Mars Odissey describe una órbita circular en torno a Marte a una altura sobre su superficie de 400 km. Sabiendo que un satélite de Marte describe órbitas circulares de 9390 km de radio y tarda en cada una de ellas 7'7 h, calcule:

- El tiempo que tardara la sonda espacial en dar una vuelta completa.
- La masa de Marte y la aceleración de la gravedad en su superficie.

Datos: Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$   
 Radio de Marte  $R_M = 3390 \text{ km}$

**Solución.**

a. Se pide el periodo de la

sonda:  $T = \frac{2\pi}{\omega}$

teniendo en cuenta que se cumple la 3ª ley de Kepler:

$$T^2 = k \cdot r^3$$

se relaciona el periodo de la sonda con el del satélite:

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{son}}^2 &= k \cdot r_2^3 \\ T_{\text{sat}}^2 &= k \cdot r_1^3 \end{aligned} \right\} : \text{son} \equiv \text{Sonda}; \text{sat} \equiv \text{satélite}$$

Dividiendo ambas expresiones y puesto que la k sólo depende del cuerpo en torno al cual se produce la orbita, el mismo valor en ambos casos:

$$\frac{T_{\text{son}}^2}{T_{\text{sat}}^2} = \frac{r_2^3}{r_1^3}$$

despejando  $T_{\text{son}}$ :

$$T_{\text{son}} = \left( \frac{T_{\text{sat}}^2 \cdot r_2^3}{r_1^3} \right)^{1/2}$$

sustituyendo los valores del problema y calculando:

$$T_{\text{son}} = 7108 \text{ seg.} = 1'97 \text{ H}$$

b. La masa de Marte se puede hallar teniendo en cuenta que para que el satélite describa una órbita circular en torno a Marte, la fuerza de atracción gravitacional debe ser igual a la fuerza centrípeta a la que se ve sometido el satélite. Si  $M \equiv$  masa de Marte;  $m \equiv$  masa del satélite:

$$G \frac{Mm}{r_1} = m \frac{v^2}{r_1} \quad G \frac{M}{r_1} = v^2 \quad \left. \begin{aligned} v &= \omega R \\ \omega &= \frac{2\pi}{T} \end{aligned} \right\} : v = \frac{2\pi}{T} R$$

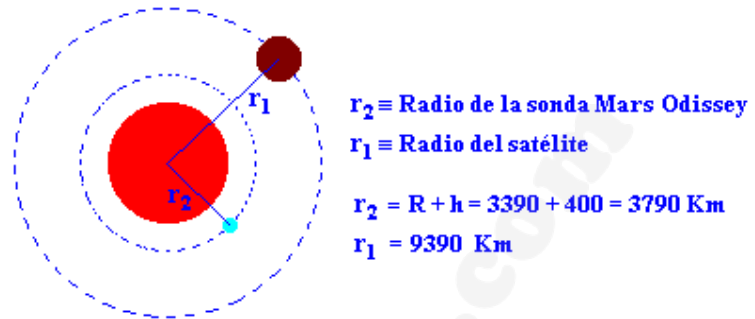
$$\left( \frac{2\pi}{T} R \right)^2 = G \frac{M}{R} \quad M = \frac{4\pi^2 r_1^3}{T^2 G}$$

$$M = \frac{4\pi^2 \cdot (9,39 \times 10^6)^3}{(7,7 \cdot 3600)^2 \cdot 6,67 \times 10^{-11}} = 6,38 \times 10^{23} \text{ kg}$$

Conocida la masa de Marte, la aceleración de la gravedad en su superficie se calcula igualando el peso a la fuerza gravitacional.

$$P = F \quad m \cdot g = G \frac{M \cdot m}{R_M^2} \quad g = G \frac{M}{R_M^2}$$

$$g = 6,67 \times 10^{-11} \frac{6,38 \times 10^{23}}{(3390 \times 10^3)^2} = 3,7 \text{ m/s}^2$$



**Septiembre 2003. Problema 1A.** Un satélite artificial de 100 kg de masa se encuentra girando alrededor de la Tierra en una órbita circular de 7100 km de radio. Determine:

- El periodo de revolución del satélite.
- El momento lineal y el momento angular del satélite respecto al centro de la Tierra.
- La variación de energía potencial que ha experimentado el satélite al elevarlo desde la superficie de la Tierra hasta esa posición.
- Las energías cinética y total del satélite.

Datos: Masa de la Tierra  $M_T = 5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$   
 Radio de la Tierra  $R_T = 6.37 \times 10^6 \text{ m}$   
 Constante de Gravitación Universal  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

**Solución.**

a. La relación entre el periodo  $T$  y la velocidad angular  $\omega$  es:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad -1-$$

A partir de la igualdad entre la fuerza centrípeta y la fuerza gravitatoria se obtiene la velocidad lineal, de esta la angular y de la angular el periodo.

$$\begin{aligned} \vec{F}_c &= \vec{F}_G \\ m \cdot \frac{v^2}{R} &= G \cdot \frac{m \cdot M_T}{R^2} \end{aligned}$$

despejando la velocidad

$$v = \sqrt{G \cdot \frac{M_T}{R}}$$

teniendo en cuenta que  $v = \omega \cdot R$  -2-

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{\sqrt{G \cdot \frac{M_T}{R}}}{R} = \sqrt{G \cdot \frac{M_T}{R^3}} = \sqrt{6.67 \times 10^{-11} \frac{5.98 \times 10^{24}}{(7.1 \times 10^6)^3}} = 1.056 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$$

despejando el periodo de -1- y sustituyendo la velocidad angular obtenida

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{1.056 \times 10^{-3}} = 5951 \text{ s} = 1 \text{ h } 39'$$

b. La expresión para el momento lineal es

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

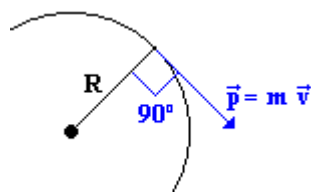
siendo su módulo

$$p = m \cdot v$$

utilizando la relación -2-

$$p = m \cdot \omega \cdot R = 100 \cdot 1.24 \times 10^{-3} \cdot 7.1 \times 10^6 = 7.49 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

la dirección y sentido de  $\vec{p}$  es la misma que la de  $\vec{v}$ , perpendicular al radio en todo punto de la trayectoria circular:



La expresión para el momento angular es

$$\vec{L} = \vec{R} \times m\vec{v}$$

que constituye el momento de la cantidad de movimiento (ó momento lineal). El módulo de  $\vec{L}$  es:

$$|\vec{L}| = R \cdot m \cdot v \cdot \sin \alpha$$

teniendo en cuenta que el ángulo formado por  $\vec{R}$  y  $m \cdot \vec{v}$  es de  $90^\circ$  en todo momento

$$|\vec{L}| = R \cdot m \cdot v \cdot \sin 90 = R \cdot m \cdot v$$

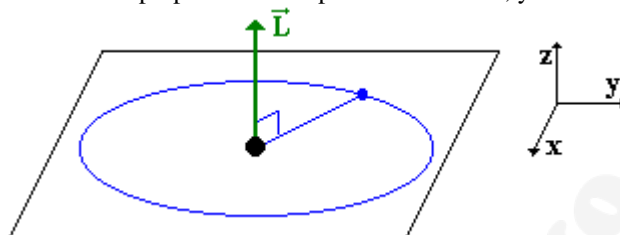
aplicando -2-

$$|\vec{L}| = R \cdot m \cdot v = R \cdot m \cdot \omega R = m \cdot \omega \cdot R^2$$

sustituyendo los valores numéricos:

$$|\vec{L}| = m \cdot \omega \cdot R^2 = 598 \times 10^{24} \cdot 124 \times 10^{-3} \cdot (637 \times 10^6)^2 = 3 \times 10^{35} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$$

La dirección del vector es perpendicular al plano de la órbita, y en dirección positiva (eje z)



c. La variación de energía potencial que experimenta el satélite al elevarlo desde la superficie de la tierra hasta su posición en la órbita, se obtiene restando la energía potencial que tiene el satélite en la órbita, menos la que tiene en la superficie de la tierra.

$$\Delta E_p = -G \cdot \frac{m \cdot M_T}{R} - \left( -G \cdot \frac{m \cdot M_T}{R_T} \right) = G \cdot m \cdot M_T \left( \frac{1}{R_T} - \frac{1}{R} \right)$$

sustituyendo los datos numéricos del problema:

$$\Delta E_p = G \cdot m \cdot M_T \left( \frac{1}{R_T} - \frac{1}{R} \right) = 667 \times 10^{-11} \cdot 100 \cdot 598 \times 10^{24} \left( \frac{1}{637 \times 10^6} - \frac{1}{71 \times 10^6} \right) = 644 \times 10^8 \text{ J}$$

d. Energía cinética:  $E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ .

La velocidad se calcula mediante la ecuación -2-

$$v = \omega \cdot R = 124 \times 10^{-3} \cdot 71 \times 10^6 = 8.804 \text{ m/s}$$

conocida la velocidad, la energía cinética se calcula sustituyendo en su expresión

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 100 \text{ kg} \cdot (8.804 \text{ m/s})^2 = 388 \times 10^9 \text{ J}$$

La energía total del satélite es la suma de su energía cinética más su energía potencial

$$E_T = \frac{1}{2} m \cdot v^2 + \left( -G \frac{m \cdot M_T}{R} \right) = \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 8.804^2 - 667 \times 10^{-11} \frac{100 \cdot 598 \times 10^{24}}{71 \times 10^6} = -174 \times 10^9 \text{ J}$$

**Junio 2003. Cuestión 1.** Suponiendo un planeta esférico que tiene un radio la mitad del radio terrestre e igual densidad de la Tierra, calcule:

- La aceleración de la gravedad en la superficie de dicho planeta.
- La velocidad de escape de un objeto desde la superficie del planeta, si la velocidad del escape desde la superficie terrestre es 11,2 km/s.

Datos: Aceleración de la gravedad en la superficie de la tierra  $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$

**Solución.**

$$R = \frac{1}{2} R_T \quad \rho(\text{densidad}) = \rho_T$$

$$\text{La masa del planeta es: } M = \rho \cdot V = \rho \frac{4}{3} \pi R^3 = \rho \frac{4}{3} \pi \frac{R_T^3}{2^3} = \frac{\pi \cdot \rho}{6} R_T^3 = \frac{1}{8} \frac{4}{3} \pi R_T^3 \rho = \frac{1}{8} M_T$$

a. 
$$g = G \frac{M}{R^2} = G \frac{M_T/8}{\left(\frac{R_T}{2}\right)^2} = \frac{1}{2} G \frac{M_T}{R_T^2} = \frac{1}{2} g_T = \frac{981}{2} \text{ m/s}^2 = 4905 \text{ m/s}^2$$

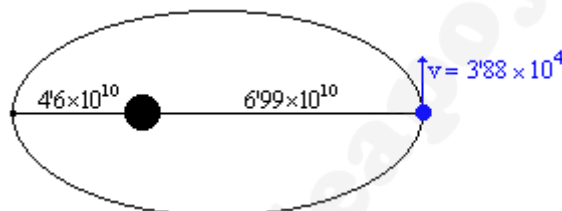
b. 
$$v_e = \sqrt{2gR} = \sqrt{2 \cdot \frac{1}{2} g_T \cdot \frac{1}{2} R_T} = \frac{1}{2} \sqrt{2g_T R_T} = \frac{11,2}{2} = 5,6 \text{ km/s}$$

**Junio 2003. Problema 1A.** Mercurio describe una órbita elíptica alrededor del Sol. En el afelio su distancia al Sol es de  $6,99 \times 10^{10}$  m, y su velocidad orbital es de  $3,88 \times 10^4$  m/s, siendo su distancia al Sol en el perihelio de  $4,60 \times 10^{10}$  m.

- Calcule la velocidad orbital de Mercurio en el perihelio.
- Calcule las energías cinética, potencial y mecánica de Mercurio en el perihelio.
- Calcule el módulo de su momento lineal y de su momento angular en el perihelio.
- De las magnitudes calculadas en los apartados anteriores, decir cuáles son iguales que en el afelio.

Datos: Masa de Mercurio	$M_M = 3,18 \times 10^{23} \text{ kg}$
Masa del Sol	$M_S = 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$
Constante de Gravitación Universal	$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$

**Solución.**



- a. Para hallar la velocidad en el perihelio de Mercurio con los datos del enunciado, se tiene en cuenta que orbita en torno al Sol debido a la acción de fuerzas centrales, y por tanto el momento angular ( $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$ ) permanece constante ( $\vec{L}_a = \vec{L}_p$ ).

Si  $\vec{L}_a = \vec{L}_p$ , también se cumple que  $|\vec{L}_a| = |\vec{L}_p|$

$$|\vec{L}| = r \cdot mv \cdot \text{sen } \alpha = \{\vec{r} \perp \vec{v}\} = r \cdot mv \cdot \text{sen } 90 = r \cdot mv$$

$$r_{\text{afelio}} \cdot m v_{\text{afelio}} = r_{\text{perihelio}} \cdot m v_{\text{perihelio}}$$

Simplificando la masa, se despeja la velocidad en el perihelio.

$$v_p = v_a \frac{r_a}{r_p} = 3,88 \times 10^4 \frac{6,99 \times 10^{10}}{4,6 \times 10^{10}} = 5,9 \times 10^4 \text{ m/s}$$

b. 
$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v_p^2 = \frac{1}{2} 3,18 \times 10^{23} \cdot (5,9 \times 10^4)^2 = 5,53 \times 10^{32} \text{ J}$$

$$E_p = -G \frac{M_S M_M}{r_p} = -6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{1,99 \times 10^{30} \cdot 3,18 \times 10^{23}}{4,60 \times 10^{10}} = -9,18 \times 10^{32} \text{ J}$$

$$E_M = E_C + E_P = 5,527 \times 10^{32} - 9,18 \times 10^{32} = -3,65 \times 10^{32} \text{ J}$$

c. 
$$|\vec{p}_p| = m |\vec{v}_p| = 3,18 \times 10^{23} \cdot 5,9 \times 10^4 = 1,88 \times 10^{28} \text{ kg m s}^{-1}$$

$$|\vec{L}_p| = |\vec{r} \times \vec{p}| = r_p \cdot p \cdot \text{sen } 90 = r_p \cdot m \cdot v_p = 4,60 \times 10^{10} \cdot 1,88 \times 10^{28} = 8,65 \times 10^{38} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$$

- d. La energía total se conserva durante todo el tiempo, en ausencia de rozamiento, por el principio de conservación de la energía, la energía mecánica permanece constante

El momento angular también se conserva, por estar sometido a fuerzas centrales ( $\vec{M} = 0$ ), y teniendo en cuenta que  $\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt} = 0 \Rightarrow \vec{L} = \text{cte}$

La energía potencial y cinética dependen del radio y de la velocidad respectivamente, como estos valores cambian del afelio al perihelio, las energías potencial y cinética no se conservan

El momento lineal también depende de la velocidad y por tanto tampoco se conserva constante.

**Septiembre 2002. Problema 1A.** Se pretende colocar un satélite artificial de forma que gire en una órbita circular en el plano del ecuador terrestre y en el sentido de rotación de la tierra. Si se quiere que el satélite pase periódicamente sobre un punto del ecuador cada dos días, calcule:

- La altura sobre la superficie terrestre a la que hay que colocar el satélite.
- La relación entre la energía que hay que comunicar a dicho satélite desde el momento de su lanzamiento en la superficie terrestre para colocarlo en esa órbita y la energía mínima de escape.

Datos: Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$   
 Radio de la Tierra  $R_t = 6370 \text{ km}$   
 Masa de la Tierra  $M_t = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$

**Solución.**

El periodo del satélite es  $T = 2$  días. Si lo pasamos a segundos:  
 $T = 2 \cdot 24 \cdot 3600 \quad T = 172.800 \text{ seg}$

**a.** Para calcular la altura  $h$ , se establece que la fuerza gravitatoria entre el satélite y la tierra es la fuerza centrípeta del movimiento:

$$G \frac{M_T m_s}{R^2} = m_s \frac{v^2}{R} \quad G \frac{M_T}{R} = v^2$$

Teniendo en cuenta que  $v = \omega \cdot R$  y que  $\omega = \frac{2\pi}{T}$

$$G \frac{M_T}{R} = \left( \frac{2\pi}{T} R \right)^2 \quad \text{Ordenando} \quad R^3 = \frac{G \cdot M_T}{4\pi^2} T^2$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M_T}{4\pi^2} T^2} = \sqrt[3]{\frac{6,67 \times 10^{-11} \cdot 5,98 \times 10^{24}}{4\pi^2} \cdot 172800^2} = 67,07 \times 10^6 \text{ m} = 67\,070 \text{ Km}$$

La altura sobre la superficie terrestre, se halla restando al radio de la orbita  $R$  (distancia entre los centros de masa), el radio de la tierra  $R_T$ .

$$h = R - R_T = 67.070 - 6.370 \quad h = 60700 \text{ km.}$$

**b.** La energía mínima del escape ( $\Delta E_e$ ), es aquella que hay que comunicar al satélite en la superficie de la tierra, para que venza la atracción gravitatoria de la tierra, es decir para llevarlo al infinito, donde  $E_m = 0$ .

$$\Delta E_e + \left( -G \frac{M_T m}{R_T} \right) = 0$$

despejando la energía de escape:

$$\Delta E_e = G \frac{M_T m}{R_T}$$

La energía que hay que comunicar al satélite para colocarlo en la orbita ( $\Delta E_o$ ) se obtiene de la igualdad:

$$\underbrace{-G \frac{M_T m}{R_T}}_{\text{Energía en la superficie terrestre}} + \Delta E_o = \underbrace{-G \frac{M_T m}{R} + \frac{1}{2} m v^2}_{\text{Energía en la órbita}}$$

$$\text{Teniendo en cuenta que } v^2 = G \frac{M_T}{R}$$

$$-G \frac{M_T m}{R_T} + \Delta E_o = -G \frac{M_T m}{R} + \frac{1}{2} m \cdot G \frac{M_T}{R}$$

Operando el segundo miembro, se despeja la energía necesaria para situarlo en la órbita.

$$-G \frac{M_T m}{R_T} + E_{\text{orbita}} = -\frac{1}{2} G \frac{M_T m}{R} \quad \Delta E_o = G \frac{M_T m}{R_T} - \frac{1}{2} G \frac{M_T m}{R}$$

La relación que se pide es:

$$\frac{\Delta E_o}{\Delta E_e} = \frac{G \frac{M_T m}{R_T} - \frac{1}{2} G \frac{M_T m}{R}}{G \frac{M_T m}{R_T}} = \frac{G \frac{M_T m}{R_T} - \frac{1}{2} G \frac{M_T m}{R}}{G \frac{M_T m}{R_T}} = 1 - \frac{R_T}{2R}$$

$$\frac{\Delta E_o}{\Delta E_e} = 1 - \frac{6370 \times 10^3}{2 \cdot 67070 \times 10^3} = 0,9525$$

**Junio 2002. Cuestión 1.** Un planeta esférico tiene un radio de 3000 km, y la aceleración de la gravedad en su superficie es  $6 \text{ m/s}^2$ .

a) ¿Cuál es su densidad media?

b) ¿Cuál es la velocidad de escape para un objeto situado en la superficie de este planeta?

Dato: Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$

**Solución.**

a. Se pide calcular la densidad de un planeta esférico conocido su radio ( $R = 3000 \text{ Km}$ ) y la aceleración de la gravedad en su superficie ( $g = 6 \text{ m/s}^2$ )

La expresión de la densidad media de un cuerpo es;

$$\rho = \frac{M}{V} : \begin{cases} M : \text{Masa de el cuerpo} \\ V : \text{volumen} \end{cases} \quad (1)$$

por tratarse de un objeto esférico;

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 \quad \text{donde } R \text{ es el radio del planeta.}$$

sustituyendo su valor  $R = 3000 \text{ Km} = 3 \times 10^6 \text{ m}$ , se obtiene:

$$V = \frac{4}{3} \pi (3 \cdot 10^6)^3 \quad V_p = 36\pi \cdot 10^{18} \text{ m}^3$$

El siguiente paso es hallar la masa del planeta ( $M$ ) para introducirla en (1) y hallar la densidad.

Para ello se utiliza el dato de la gravedad del planeta en la superficie ( $g = 6 \text{ m/s}^2$ )

La expresión para  $g$  es;

$$g = G \frac{M}{R^2}$$

de esta expresión, todos los datos son conocidos salvo  $M$  que se despeja;

$$M = \frac{g \cdot R^2}{G}$$

y sustituyendo sus valores numéricos:

$$M = \frac{6 \cdot (3 \cdot 10^6)^2}{6,67 \cdot 10^{-11}} \quad M_p = 8'096 \cdot 10^{23} \text{ kg}$$

Por tanto, de la expresión (1);

$$\rho = \frac{8'096 \cdot 10^{23} \text{ kg}}{36\pi \cdot 10^{18} \text{ m}^3} = 7158'4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

b. Para calcular la velocidad de escape para un objeto situado en la superficie de este planeta, se aplica el Principio de Conservación de la energía:  $E_i (R_p) = E_f (R = \infty)$



La velocidad de escape, es la que es necesario comunicar al objeto, para que se desplace desde la superficie de la tierra al infinito. Por convenio la  $E_f(R=\infty) = 0$ . En la superficie terrestre, será la suma de la  $E_p$  (gravitatoria) y la  $E_c$  que le comunicamos al objeto. Si tienen que ser iguales:

$$E_c + E_p(g) = 0 \quad \frac{1}{2}mv_e^2 - G \cdot \frac{M_p \cdot m}{R_p} = 0$$

despejando la  $v_e$ :

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM_p}{R_p}}$$

sustituyendo valores numéricos:

$$V_e = \sqrt{\frac{2 \cdot 6'67 \times 10^{-11} \times 8'09 \times 10^{23}}{3 \times 10^6}} \cong 6000 \left(\frac{m}{s}\right)$$

**Junio 2002. Problema 1A.** La velocidad angular con la que un satélite describe una órbita circular en torno al planeta Venus es  $\omega_1 = 1'45 \times 10^{-4}$  rad/s y su momento angular respecto al centro de la órbita es  $L_1 = 2'2 \times 10^{12}$  kg m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>.

- Determine el radio  $r_1$  de la órbita del satélite y su masa.
- ¿Qué energía preciso invertir para cambiar a otra órbita circular con velocidad angular  $\omega_2 = 10^{-4}$  rad/s?

Datos: Constante de Gravitación Universal  $G = 6'67 \times 10^{-11}$  Nm<sup>2</sup> kg<sup>-2</sup>.

Masa de Venus ( $M_V$ ) =  $4'87 \times 10^{24}$  kg.

**Solución.**

**a.** Para hallar el radio  $r_1$  de la orbita del satélite se tendrá en cuenta el hecho de que el satélite describe una trayectoria circular por lo que se la suma de fuerzas que actúan sobre el satélite será igual a la fuerza centrípeta.

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_c$$

Despreciando los efectos de rozamiento, la única fuerza que actúa sobre el satélite es el la fuerza gravitatoria.

$$\vec{F}_g = \vec{F}_c$$

Trabajando en módulo

$$m_s \frac{v_s^2}{R} = G \cdot \frac{M_V \cdot m_s}{R^2}$$

La velocidad orbital lineal del satélite ( $v_s$ ), se puede expresar en función de  $\omega$ :

$$v_s = \omega_1 \cdot R$$

sustituyendo en la igualdad anterior:

$$\frac{\omega_1^2 \cdot R^2}{R} = \frac{G \cdot M_V}{R^2}$$

despejando el radio

$$R^3 = \frac{G \cdot M_V}{\omega_1^2} \quad R = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M_V}{\omega_1^2}}$$

sustituyendo por los datos del enunciado

$$R = \sqrt[3]{\frac{6'67 \times 10^{-11} (\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}) \cdot 4'87 \times 10^{24} (\text{kg})}{(1'45 \times 10^{-4})^2 (\text{rad}^2 / \text{s}^2)}} = 24.906130'7 \left(\frac{m}{\text{rad}}\right) = 24.90613 (\text{Km})$$

Para hallar la masa del satélite, se puede utilizar el módulo del momento angular orbital del satélite

$$L = R \cdot m_s \cdot v_s$$

Si despejamos el valor de  $m_s$ :

$$m_s = \frac{L}{R \cdot v_s}$$

teniendo en cuenta que

$$v_s = \omega_1 \cdot R$$

se obtiene la una expresión de la masa del satélite, en función de los datos conocidos

$$m_s = \frac{L}{R^2 \omega_1}$$

sustituyendo

$$m_s = \frac{2'2 \times 10^{12} (\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})}{(24'9 \times 10^6)^2 (\text{m}/\text{rad})^2 1'45 \times 10^{-4} (\text{rad}/\text{s})} = 24'47 \text{ kg}$$

**b.** La energía que habrá que suministrar al satélite, para cambiarle a otra órbita con  $\omega_2 = 10^{-4}$  rad/s, será igual a la diferencia de energías entre la órbita final y la inicial.

La energía de un satélite en una órbita determinada viene dada por la expresión:

$$E_T = \frac{1}{2} m_s \cdot v_s^2 - G \cdot \frac{M_V \cdot m_s}{R}$$

teniendo en cuenta que  $v = \omega \cdot R$

$$E_T = \frac{1}{2} m_s \cdot \omega_s^2 \cdot R_s^2 - G \cdot \frac{M_V \cdot m_s}{R}$$

El incremento de energía que hay que suministrar al satélite por tanto será:

$$E_F - E_i = \left[ \frac{1}{2} m_s \cdot \omega_2^2 \cdot R_2^2 - G \cdot \frac{M_V \cdot m_s}{R_2} \right] - \left[ \frac{1}{2} m_s \cdot \omega_1^2 \cdot R_1^2 - G \cdot \frac{M_V \cdot m_s}{R_1} \right]$$

agrupando:

$$\Delta E = \frac{1}{2} m_s \cdot [\omega_2^2 \cdot R_2^2 - \omega_1^2 \cdot R_1^2] + G \cdot m_s \cdot M_V \left[ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right] \quad (1)$$

ecuación de la que únicamente se desconoce  $R_2$ .

Conocida la velocidad angular de la 2ª órbita ( $\omega_2 = 10^{-4}$  rad·s<sup>-1</sup>), podemos calcular el radio de la órbita ( $R_2$ ), aplicando la igualdad de fuerzas  $\bar{F}_N = \bar{F}_G$ , de modo que:

$$m_s \cdot \frac{v_s^2}{R_2} = G \cdot \frac{M_V \cdot m_s}{R_2^2}$$

expresando  $v_s$  en función de  $\omega$

$$\frac{\omega_2^2 \cdot R_2^2}{R_2} = \frac{G \cdot M_V}{R_2^2}$$

despejando  $R_2$ :

$$R_2^3 = \frac{G \cdot M_V}{\omega_2^2} \quad R_2 = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M_V}{\omega_2^2}}$$

sustituyendo datos:

$$R_2 = \sqrt[3]{\frac{6'67 \times 10^{-11} \cdot 4'87 \times 10^{24}}{10^{-4}}} = 31.906.923 \text{ m} = 31.906'9 \text{ Km}$$

Sustituyendo los valores conocidos en la expresión (1), el incremento de energía es:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot 24'47 \cdot \left[ (10^{-4})^2 \cdot (31'91 \times 10^6)^2 - (1'45 \times 10^{-4})^2 \cdot (24'91 \times 10^6)^2 \right] + 6'67 \times 10^{-11} \cdot 24'47 \cdot 4'87 \times 10^{24} \left[ \frac{1}{24'91 \times 10^6} - \frac{1}{31'91 \times 10^6} \right]$$

$$\Delta E = 3'496 \times 10^7 \text{ J}$$

**Modelo 2002. Cuestión 1.-**

- a) ¿A qué altitud tendrá una persona la mitad del peso que tiene sobre la superficie terrestre? Exprese el resultado en función del radio terrestre.
- b) Si la fuerza de la gravedad actúa sobre todos los cuerpos en proporción a sus masas, ¿por qué no cae un cuerpo pesado con mayor aceleración que un cuerpo ligero?

**Solución.**

a. Si se denomina como  $p$  al peso a una altura  $h$  y  $p_o$  al peso en la superficie terrestre, se pide calcular la altura a la que se cumple:

$$\frac{p}{p_o} = \frac{1}{2} \text{ o lo que es lo mismo: } \frac{mg}{mg_o} = \frac{1}{2} \text{ teniendo en cuenta que la masa no varía: } \frac{g}{g_o} = \frac{1}{2}$$

La intensidad de campo gravitatorio ( $g$ ) se puede expresar en función de la masa del planeta y de la distancia al centro, teniendo en cuenta que el peso es la fuerza gravitacional con la que el planeta atrae a cualquier masa.

$$p = F_g ; \quad mg = G \frac{Mm}{R^2} ; \quad g = G \frac{M}{R^2}$$

$$\text{En la superficie terrestre: } g_o = G \frac{M_T}{R_T^2}$$

$$\text{A una altura } h \text{ sobre la superficie terrestre: } g = G \frac{M_T}{(R_T + h)^2}$$

$$\text{Comparando: } \frac{g}{g_o} = \frac{G \frac{M_T}{(R_T + h)^2}}{G \frac{M_T}{R_T^2}} = \frac{R_T^2}{(R_T + h)^2} = \frac{1}{2}$$

$$\frac{R_T}{R_T + h} = \sqrt{\frac{1}{2}} \quad h = (\sqrt{2} - 1) \cdot R_T$$

b. Porque la intensidad de campo gravitatorio (aceleración de la gravedad), no depende de la masa de los cuerpos, depende de la masa del planeta y de la distancia al centro del planeta.

$$p = F_g ; \quad mg = G \frac{Mm}{R^2} ; \quad g = G \frac{M}{R^2}$$

**Modelo 2002. Problema 1A.-** Dos planetas de masas iguales orbitan alrededor de una estrella de masa mucho mayor. El planeta 1 se mueve en una órbita circular de radio  $10^{11}$  m y período de 2 años. El planeta 2 se mueve en una órbita elíptica, siendo su distancia en la posición más próxima a la estrella  $10^{11}$  m y en la más alejada,  $1,8 \times 10^{11}$  m.

- a) (0,5 puntos) ¿Cuál es la masa de la estrella?
- b) (0,5 puntos) Halle el período de la órbita del planeta 2.
- c) (1 puntos) Utilizando los principios de conservación del momento angular y de la energía mecánica, hallar la velocidad del planeta 2 cuando se encuentra en la posición más cercana a la estrella.

Datos: Constante de Gravitación Universal  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

**Solución.**

a. Si el planeta 1 describe una órbita circular en torno a la estrella, se debe cumplir:

$$F_g = F_c ; \quad G \frac{Mm_1}{R_1^2} = m_1 \frac{v^2}{R_1} ; \quad v^2 = G \frac{M}{R_1} ; \quad (\omega R_1)^2 = G \frac{M}{R_1} ; \quad \frac{4\pi^2}{T^2} R_1^2 = G \frac{M}{R_1} ;$$

$$M = \frac{4\pi^2 R_1^3}{T^2 G} = \frac{4\pi^2 \cdot (10^{11})^3}{(2 \cdot 365 \cdot 3600)^2 \cdot 6,67 \times 10^{-11}} = 1,49 \times 10^{29} \text{ kg}$$

b. Si en vez de despejar la masa se despeja el periodo:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} R^3$$

Por tratarse de una órbita elíptica, el radio se sustituye por la media aritmética de los radios del perihelio y del afelio.

$$a = \frac{r_p + r_a}{2} = \frac{10^{11} + 1,8 \times 10^{11}}{2} = 1,4 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$T = \sqrt{\frac{4\pi^2}{GM} a^3} = \sqrt{\frac{4\pi^2}{6,67 \times 10^{-11} \cdot 1,49 \times 10^{29}} \cdot (1,4 \times 10^{11})^3} = 1,044 \times 10^8 \text{ s} = 3,31 \text{ años}$$

c. Principio de conservación del momento angular:  $\vec{L} = \text{cte}$ , teniendo en cuenta que la velocidad es tangente a la trayectoria en cualquier punto de la órbita  $\vec{r} \perp \vec{v} \Rightarrow |\vec{L}| = r \cdot mv \cdot \text{sen}90 = r \cdot mv = \text{cte}$

$$\vec{L}_a = \vec{L}_p \Rightarrow |\vec{L}|_a = |\vec{L}|_p ; r_a \cdot mv_a = r_p \cdot mv_p ; r_a \cdot v_a = r_p \cdot v_p$$

Principio de conservación de la energía:  $E_m = \text{cte}$  ;  $E_m(a) = E_m(p)$

$$(E_p + E_c)_a = (E_p + E_c)_p ; -G \frac{Mm}{r_a} + \frac{1}{2} mv_a^2 = -G \frac{Mm}{r_p} + \frac{1}{2} mv_p^2$$

Simplificando m en la igualdad

$$-G \frac{M}{r_a} + \frac{1}{2} v_a^2 = -G \frac{M}{r_p} + \frac{1}{2} v_p^2 ; v_a^2 - v_p^2 = 2GM \left( \frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_p} \right)$$

Las dos ecuaciones que se obtienen permiten plantear un sistema de ecuaciones.

$$\begin{cases} r_a \cdot v_a = r_p \cdot v_p \\ v_p^2 - v_a^2 = 2GM \left( \frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_a} \right) \end{cases} ; \begin{cases} v_a = v_p \frac{r_p}{r_a} \\ v_p^2 - v_a^2 = 2GM \left( \frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_a} \right) \end{cases}$$

$$v_p^2 - \left( v_p \frac{r_p}{r_a} \right)^2 = 2GM \left( \frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_a} \right) ; v_p^2 \left( 1 - \frac{r_p^2}{r_a^2} \right) = 2GM \left( \frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_a} \right) ; v_p = \sqrt{\frac{2GM \left( \frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_a} \right)}{1 - \frac{r_p^2}{r_a^2}}}$$

Ordenando:

$$v_p = \sqrt{\frac{2GM}{r_a + r_p} \cdot \frac{r_a}{r_p}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,67 \times 10^{-11} \cdot 1,49 \times 10^{29}}{1,8 \times 10^{11} + 10^{11}} \cdot \frac{1,8 \times 10^{11}}{10^{11}}} = 11303,9 \text{ m/s}$$

**Septiembre 2001. Cuestión 1.-** Un proyectil de masa 10 kg se dispara verticalmente desde la superficie de la Tierra con una velocidad de 3200 m/s:

- ¿Cuál es la máxima energía potencial que adquiere?
- ¿En qué posición se alcanza?

Datos: Gravedad en la superficie de la Tierra =  $9,8 \text{ m s}^{-2}$ ; Radio medio de la Tierra =  $6,37 \times 10^6 \text{ m}$

**Solución.**

a. Suponemos que el campo gravitatorio terrestre es conservativo, es decir, despreciamos todo tipo de rozamiento o fricción con el aire. En este caso, la energía mecánica del sistema (proyectil) se conserva, por tanto:

$E_c + E_p$  (superficie de la tierra) =  $E_p$  (Altura máxima) -1- ya que se supone que cuando llega a su altura máxima, su velocidad es cero.

La energía potencial en la superficie terrestre:

$$g_0 = 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad E_p = m \cdot g_0 \cdot R_T \quad E_p = -6'24 \times 10^8 \text{ J}$$

Su energía cinética si  $v = 3200 \text{ m/s}$

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2 \quad E_c = 5'12 \times 10^7 \text{ J}$$

Su energía mecánica, suma de la potencial y cinética es:

$$E_m = -5'73 \cdot 10^8 \text{ J}$$

por la ecuación 1:  $-5'73 \times 10^8 \text{ J} = -G \cdot \frac{M_T \cdot m}{(R_T + h)} = E_p$  (altura máxima) -2-

Por tanto, la máxima energía potencial es:  $E_p = -5'73 \times 10^8 \text{ J}$

b. La posición h, la despejamos de la ecuación (2):

$$(R_T + h) = \frac{+G \cdot M_T \cdot m}{+5'73 \cdot 10^8 \text{ J}} \quad \text{despejando h} \quad h = \frac{g_o \cdot R_T^2 \cdot m}{5'73 \cdot 10^8 \text{ J}} - R_T$$

sustituyendo por los datos del problema:

$$h = 569'9 \text{ Km}$$

Altura a la que llega sobre la superficie terrestre.

**Junio 2001. Cuestión 1.** En el movimiento circular de un satélite en torno a la Tierra, determine:

- La expresión de la energía cinética en función de las masas del satélite y de la Tierra y del radio de la órbita.
- La relación que existe entre su energía mecánica y su energía potencial.

**Solución.**

a. En el movimiento circular de un satélite en torno a la tierra se cumple que:

$$m_s \frac{v^2}{R} = G \frac{M_T m_s}{R^2}$$

simplificando:

$$m_s v^2 = G \cdot \frac{M_T m_s}{R}$$

multiplicando por 1/2 toda la expresión anterior:

$$\frac{1}{2} m_s v^2 = \frac{1}{2} G \cdot \frac{M_T \cdot m_s}{R}$$

por tanto

$$E_c = \frac{1}{2} G \cdot \frac{M_T m_s}{R} \quad -1-$$

b. La energía mecánica de un satélite es una constante del movimiento, debido a que el campo gravitatorio es conservativo. Es igual a la suma de E cinética y E potencial.

$$E_m = E_c + E_p$$

$$E_m = \frac{1}{2} m v^2 - G \cdot \frac{M_T \cdot m_s}{R}$$

Se puede utilizar la expresión anterior -1-, y se ve que:

$$E_c = \frac{-1}{2} E_p = \frac{1}{2} G \cdot \frac{M_T \cdot m_s}{R}$$

Por tanto:

$$E_m = \frac{1}{2} G \cdot \frac{M_T \cdot m_s}{R} - G \cdot \frac{M_T \cdot m_s}{R} \quad E_m = \frac{-1}{2} G \cdot \frac{M_T \cdot m_s}{R} \quad E_m = \frac{E_p}{2}$$

**Junio 2001. Problema 1A.** Dos satélites artificiales de la Tierra  $S_1$  Y  $S_2$  describen en un sistema de referencia geocéntrico dos órbitas circulares, contenidas en un mismo plano, de radios  $r_1=8000$  km y  $r_2=9034$  km respectivamente.

En un instante inicial dado, los satélites están alineados con el centro de la Tierra y situados del mismo lado:

- ¿Qué relación existe entre las velocidades orbitales de ambos satélites?

- b) ¿Qué relación existe entre los periodos orbitales de los satélites? ¿Qué posición ocupará el satélite  $S_2$  cuando el satélite  $S_1$  haya completado seis vueltas, desde el instante inicial?

**Solución.**

a. Estableciendo que la fuerza gravitatoria es la fuerza normal del movimiento:

$$m_s \cdot \frac{v^2}{R} = G \cdot \frac{M_T m_s}{R^2}$$

despejando la velocidad ( $v$ ) se obtiene

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M_T}{R}}$$

aplicando a cada uno de los satélites está ecuación:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Para } S_1 : v_1 = \sqrt{\frac{G \cdot M_T}{R_1}} \quad (1) \\ \text{Para } S_2 : v_2 = \sqrt{\frac{G \cdot M_T}{R_2}} \quad (2) \end{array} \right\}$$

dividiendo la ecuación -1- entre la ecuación -2-, se obtiene la relación pedida

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}$$

Sustituyendo los datos numéricos:

$$\frac{v_1}{v_2} = 1'13$$

b. Para hallar la relación entre los periodos orbitales se parte de las ecuaciones:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad \omega = \frac{v}{R}$$

sustituyendo en la ecuación del periodo la velocidad angular

$$T = \frac{2\pi R}{v}$$

Aplicando la ecuación anterior para los dos satélites

$$\left. \begin{array}{l} T_1 = \frac{2\pi R_1}{v_1} \\ T_2 = \frac{2\pi R_2}{v_2} \end{array} \right\} 1$$

la relación entre los periodos se obtiene dividiendo ambas expresiones:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{v_2 R_1}{v_1 R_2}$$

Sustituyendo los valores numéricos y teniendo en cuenta que si  $\frac{v_1}{v_2} = 1'13 \Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{1'13}$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{1'13} \cdot \frac{8 \times 10^6}{9'034 \times 10^6} = 0'78$$

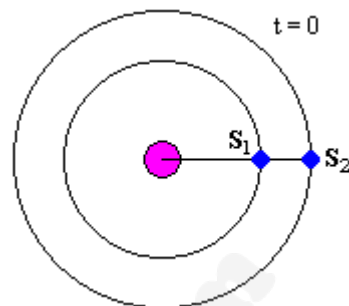
Los resultados permiten concluir que el satélite más cercano a la Tierra ( $S_1$ ) se mueve a mayor velocidad y completa una vuelta antes que el satélite más alejado ( $S_2$ ).

En cada vuelta, el satélite 1 se adelanta respecto del satélite 2:

$$\Delta\phi = 360^\circ \cdot (1 - 0,78) = 79,2^\circ$$

En seis vueltas el satélite 2 habrá perdido respecto de satélite 1:

$$\Delta\phi = 6 \times 79,2^\circ = 475,2^\circ = 360^\circ + 115,2^\circ$$



Por lo tanto, cuando el satélite 1 halla dado seis vueltas, el satélite 2 habrá dado cuatro vueltas y se encontrará a  $115,2^\circ$  de completar la quinta, por lo tanto su posición respecto a la posición inicial será de:

$$360^\circ - 115,2^\circ = 244,8^\circ = 244^\circ 48'$$

### Septiembre 2000. Cuestión 1

- a) ¿Con qué frecuencia angular debe girar un satélite de comunicaciones, situado en una órbita ecuatorial, para que se encuentre siempre sobre el mismo punto de la Tierra?  
 b) ¿A qué altura sobre la superficie terrestre se encontrará el satélite citado en el apartado anterior?

Datos: Gravedad en la superficie de la Tierra =  $9,8 \text{ m s}^{-2}$ ; Radio medio de la Tierra =  $6,37 \times 10^6 \text{ m}$

#### Solución.

a. Para que un satélite se encuentre siempre sobre el mismo punto, el periodo del satélite debe ser igual al periodo de la tierra, en su giro de rotación.

$$T = 1 \text{ día} = 24 \text{ horas} = 86400 \text{ seg}$$

$$\omega_{\text{ROT}} = \frac{2\pi}{T} \quad \omega_{\text{ROT}} = 7,27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

b. La altura se halla estableciendo que la  $F_{\text{gravitatoria}}$  es la que mantiene al satélite en su órbita circular:

$$F_G = F_N : G \cdot \frac{M_T \cdot m_s}{R^2} = m_s \cdot \frac{V_s^2}{R}$$

Despejando R:

$$R = \frac{G \cdot M_T}{V_s^2} \quad (1)$$

Si la velocidad o frecuencia angular es  $\omega = 7,27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$   $V_s = \omega R$  (2)

Sustituyendo en (1) la velocidad del satélite:

$$R = \frac{G \cdot M_T}{(\omega \cdot R)^2}$$

despejando el radio de la órbita

$$R = \left[ \frac{G \cdot M_T}{\omega^2} \right]^{1/3} \quad (3)$$

Ecuación de la que se desconoce la  $M_{\text{TERRA}}$ .

El producto  $G \cdot M_T$ , se puede obtener de la gravedad terrestre ya que la fuerza de atracción gravitacional en la superficie de la tierra es el peso:

$$m \cdot g_0 = G \cdot \frac{M_T \cdot m}{R_T^2}$$

simplificando

$$g_0 = \frac{G \cdot M_T}{R_T^2}$$

despejando el producto  $G \cdot M_T$ :

$$G \cdot M_T = g_0 R_T^2$$

sustituyendo en (3)

$$R = \left[ \frac{g_0 R_T^2}{\omega^2} \right]^{1/3} = \frac{9,8 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \cdot (6,37 \times 10^6 \text{ (m)})^2}{(7,27 \times 10^{-5} \text{ (rad/s)})^2} = 4,22 \times 10^7 \text{ m}$$

Al radio de la órbita hay que restarle el radio de la tierra para hallar la altura del satélite sobre la superficie terrestre.

$$\left. \begin{array}{l} R = R_T + h \\ h = R - R_T \end{array} \right\} : h = 3,85 \times 10^7 \text{ m}$$

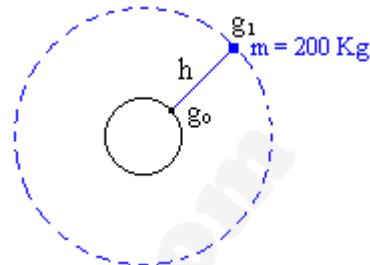
**Septiembre 2000. Problema 1A.** Un satélite artificial de 200 kg gira en una órbita circular a una altura  $h$  sobre la superficie de la Tierra. Sabiendo que a esa altura el valor de la aceleración de la gravedad es la mitad del valor que tiene en la superficie terrestre, averiguar:

- La velocidad del satélite
- Su energía mecánica

Datos: Gravedad en la superficie terrestre  $g = 9.8 \text{ m s}^{-2}$   
 Radio medio de la Tierra  $R = 6.37 \times 10^6 \text{ m}$

**Solución.**

**a.** La velocidad de un satélite en una órbita se puede calcular conociendo la altura ó radio de la órbita. Se pide calcular la velocidad de un satélite sabiendo que a esa altura la gravedad se reduce a la mitad



$$g_1 = \frac{1}{2} g_0 \quad (1)$$

Calculando los valores de  $g_1$  y  $g_0$ , y relacionándolos entre si:

$$g_0 = G \frac{M_T}{R_T^2} \quad \text{y} \quad g_1 = G \frac{M_T}{(R_T + h)^2} \quad (2)$$

sustituyendo (2) en (1):

$$G \frac{M_T}{(R_T + h)^2} = \frac{1}{2} \cdot G \frac{M_T}{R_T^2}$$

simplificando y ordenando

$$\frac{R_T^2}{(R_T + h)^2} = \frac{1}{2} \quad (3)$$

De (3) se despeja  $h$  transformando la expresión en una ecuación de 2º grado:

$$(R_T + h)^2 = 2R_T^2 \quad R_T^2 + h^2 + 2R_T \cdot h = 2R_T^2 \quad h^2 + 2R_T h - R_T^2 = 0$$

Resolviendo la ecuación:

$$h = (\sqrt{2} - 1)R_T \quad h = 2638540 \text{ m} = 2.64 \times 10^6 \text{ m}$$

Conocida la altura de la órbita, la velocidad del satélite, se halla igualando la fuerza atracción gravitacional con la fuerza centrípeta:

$$\bar{F}_g = \bar{F}_{\text{centrípeta}} \\ G \cdot \frac{M_T \cdot m}{R^2} = m \cdot \frac{v^2}{R} \quad v = \sqrt{G \cdot \frac{M_T}{R}} \quad (4)$$

donde  $R$  es la suma de la altura más el radio de la tierra.

$$R = h + R_T = 2.638.540 + 6.370.000 = 9.008.540 \text{ m} \quad R = 9.01 \times 10^6 \text{ m}$$

El producto  $G \cdot M_T$ , se obtiene de la expresión de  $g$  en la superficie terrestre.

$$g_0 = G \cdot \frac{M_T}{R_T^2} \Rightarrow G \cdot M_T = g_0 \cdot R_T^2 \quad (5)$$

sustituyendo en (4)

$$v = \sqrt{\frac{g_0 \cdot R_T^2}{R}}$$

sustituyendo por los valores numéricos

$$v = \sqrt{\frac{9.8 \cdot (6.37 \times 10^6)^2}{9.01 \times 10^6}} = 6643.4 \text{ m/s}$$

**b.** La energía mecánica del satélite en la órbita es la suma de la energía potencial más la energía cinética.

$$E_{\text{mec}} = -G \cdot \frac{M_T \cdot m}{R} + \frac{1}{2} m \cdot v^2$$



teniendo en cuenta la expresión -5-

$$E_{\text{mec}} = -\frac{m \cdot g_0 \cdot R_T^2}{R} + \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

sustituyendo por los datos

$$E_{\text{mec}} = -\frac{200 \cdot 9.8 \cdot (6.37 \times 10^6)^2}{9.01 \times 10^6} + \frac{1}{2} \cdot 200 \cdot 6643.4^2 = 4.41 \times 10^9 \text{ J}$$

**Junio 2000. Cuestión 1.**

- a) Enuncie la primera y la segunda ley de Kepler sobre el movimiento planetario.
- b) Compruebe que la segunda ley de Kepler es un caso particular del teorema de conservación del momento angular.

**Solución.**

a. **1ª Ley de Kepler:** Los planetas giran en torno al sol, en órbitas elípticas, teniendo al sol en uno de unos focos.

**2ª Ley de Kepler:** El radio vector de cualquier planeta, en su movimiento alrededor del sol, barre áreas iguales en tiempos iguales.

b. La 2ª ley de Kepler es consecuencia directa del Teorema de Conservación del Momento Angular

$$\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v}$$

En todo movimiento sometido a fuerzas centrales, como es el caso del movimiento planetario, el momento angular se conserva, ya que:

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} \text{ (Momento de la fuerza (gravitatoria))}$$

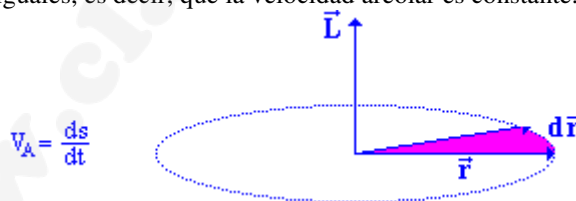
y puesto que  $\vec{r}$  y  $\vec{F}$  tienen la misma dirección, el ángulo que forman es cero, por lo que:

$$|\vec{M}| = |\vec{r}| \cdot |\vec{F}| \text{ sen } 0^\circ = 0$$

teniendo en cuenta esto

$$\begin{cases} \vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt} \\ \vec{M} = 0 \end{cases} : \frac{d\vec{L}}{dt} = 0 \Rightarrow \vec{L} = \text{cte}$$

La segunda ley de Kepler es consecuencia directa de esto, ya que dice que el radio vector barre áreas iguales en tiempos iguales, es decir, que la velocidad areolar es constante:



Según el dibujo, el diferencial de área (ds) es igual a:

$$ds = \frac{1}{2} |\vec{r} \times d\vec{r}|$$

si se deriva la expresión anterior respecto del tiempo

$$\frac{ds}{dt} = v_A = \frac{1}{2} \left| \vec{r} \times \frac{d\vec{r}}{dt} \right| \quad v_A = \frac{1}{2} |\vec{r} \times \vec{v}|$$

Dividiendo y multiplicando por m:  $v_A = \frac{1}{2m} |\vec{r} \times m\vec{v}| \quad v_A = \frac{1}{2m} |\vec{L}|$

Si se tiene en cuenta que el momento angular es constante en este tipo de movimiento

$$|\vec{L}| = \text{cte} \quad v_A = \text{cte}$$

**Junio 2000. Problema 1.** Se pone en órbita un satélite artificial de 600 kg a una altura de 1200 km sobre la superficie de la Tierra. Si el lanzamiento se ha realizado desde el nivel del mar, calcule:

- Cuánto ha aumentado la energía potencial gravitatoria del satélite.
- Qué energía adicional hay que suministrar al satélite para que escape a la acción del campo gravitatorio terrestre desde esa órbita.

Datos: Constante de Gravitación  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$   
 Masa de la Tierra  $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$   
 Radio medio de la Tierra  $R_T = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$

**Solución.**

**a.** Para ver cuánto ha aumentado la energía potencial del satélite, se calcula su valor para la superficie de la tierra y para la órbita:

$$E_{p_g(\text{sup})} = -G \cdot \frac{M_T \cdot m_s}{R_T}$$

$$E_{p_g(\text{órbita})} = -G \cdot \frac{M_T \cdot m_s}{R_T + h_{\text{Orb}}}$$

El aumento de  $E_p$ , será la diferencia entre la final y la inicial:

$$\Delta E_p = E_{p_f} - E_{p_i}$$

$$\Delta E_p = -G \cdot \frac{M_T \cdot m_s}{R_T + 1200} - \left( -G \cdot \frac{M_T \cdot m_s}{R_T} \right) = -G \cdot \frac{M_T \cdot m_s}{R_T + 1200} + G \cdot \frac{M_T \cdot m_s}{R_T} = G \cdot M_T \cdot m_s \left( \frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_T + 1200} \right)$$

Sustituyendo valores numéricos en la expresión anterior:

$$\Delta E_p = 6,67 \times 10^{-11} \cdot 5,98 \times 10^{24} \cdot 600 \cdot \left( \frac{1}{6,37 \times 10^6} - \frac{1}{6,37 \times 10^6 + 1,2 \times 10^6} \right) = 5,96 \times 10^9 \text{ J}$$

**b.** Energía adicional para que el satélite escape al campo gravitatorio terrestre:

$$E_{\text{órbita}} + E_{\text{escape}} = 0 \quad ; \quad E_{\text{escape}} = -E_{\text{órbita}}$$

$$E_{\text{órbita}} = E_p + E_c = -G \frac{M_T m_s}{(R_T + 1200)} + \frac{1}{2} m v^2$$

Teniendo en cuenta que  $F_g = F_c$ ;  $G \frac{M_T m_s}{(R_T + h)^2} = m_s \frac{v^2}{R_T + h}$  ;  $v^2 = G \frac{M_T}{R_T + h}$

$$E_{\text{órbita}} = -G \frac{M_T m_s}{(R_T + 1200)} + \frac{1}{2} m G \frac{M_T}{R_T + h} = -\frac{1}{2} G \frac{M_T m_s}{(R_T + 1200)}$$

$$E_{\text{escape}} = -E_{\text{órbita}} = \frac{1}{2} G \frac{M_T m_s}{R_T + h} = \frac{1}{2} 6,67 \times 10^{-11} \frac{5,98 \times 10^{24} \cdot 600}{6,37 \times 10^6 + 1,2 \times 10^6} = 1,58 \times 10^9 \text{ J}$$