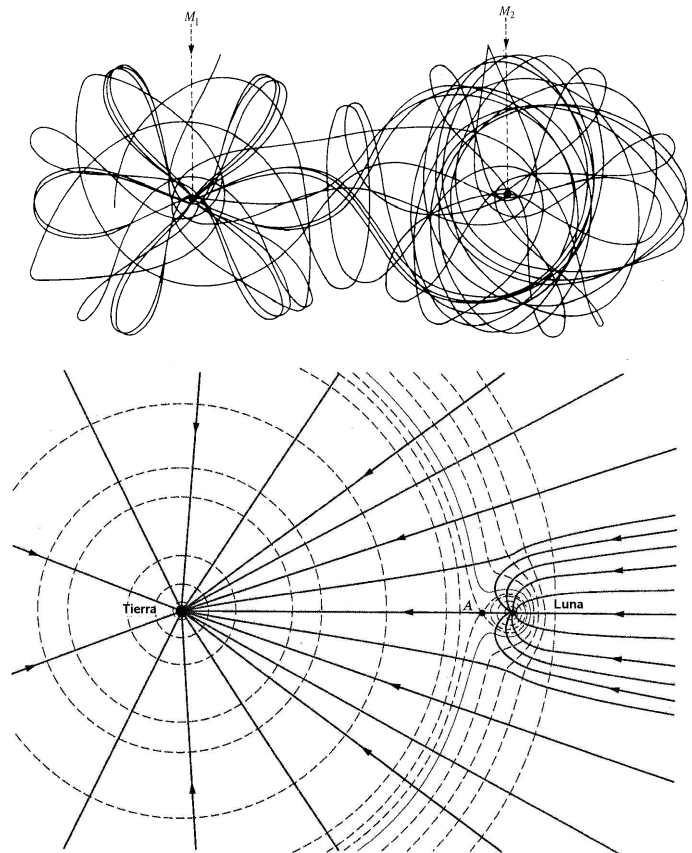


Física Computacional

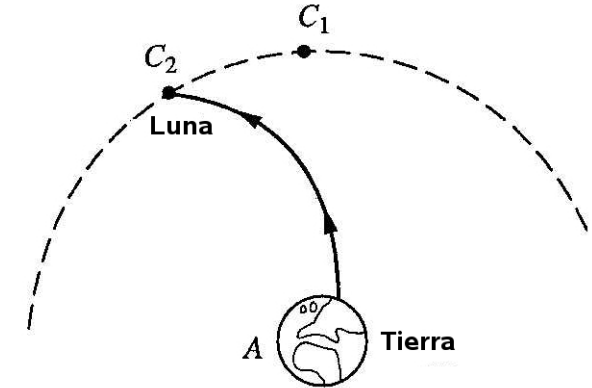
**El problema de los tres cuerpos: Algoritmo de Runge-Kutta**

## 1. Introducción.

- Enviar una nave a la Luna, el cuerpo celeste más próximo a la Tierra, a una distancia media aproximada de 384.400 km, implica considerar el **problema de tres cuerpos** que se mueven bajo la acción de fuerzas gravitatorias mutuas.
- El problema de dos cuerpos es resoluble en general —se puede reducir al de un solo cuerpo— pero la adición de un tercero lo hace irresoluble. Así, pues, el problema del movimiento de tres cuerpos que interactúan entre sí a través de fuerzas gravitatorias sigue sin resolverse por métodos analíticos al cabo de más de 200 años de estudio.
- Como la masa de la nave es en cualquier caso muy pequeña en comparación con las de la Tierra y la Luna, cabe considerar el caso simplificado, conocido como el **problema restringido de los tres cuerpos**, en el que la masa de uno de ellos es despreciable frente cualquiera de las otras dos.
- Bajo estas condiciones la masa pequeña no perturba el movimiento de las mayores, moviéndose éstas sobre órbitas elípticas en torno a su centro de masa común. No obstante estas simplificaciones, el problema tampoco es resoluble en general y las trayectorias pueden ser “caóticas”.
- En la figura de la derecha se muestra el posible movimiento de una masa  $M_3$  en el campo gravitatorio que crean dos masas grandes e iguales  $M_1$  y  $M_2$ . Para simplificar, se ha supuesto que  $M_1$  y  $M_2$  se mueven en órbita circular alrededor de su centro de masas, y se ha escogido un sistema de referencia centrado en dicho círculo y que rota de forma que  $M_1$  y  $M_2$  parecen estar en reposo.

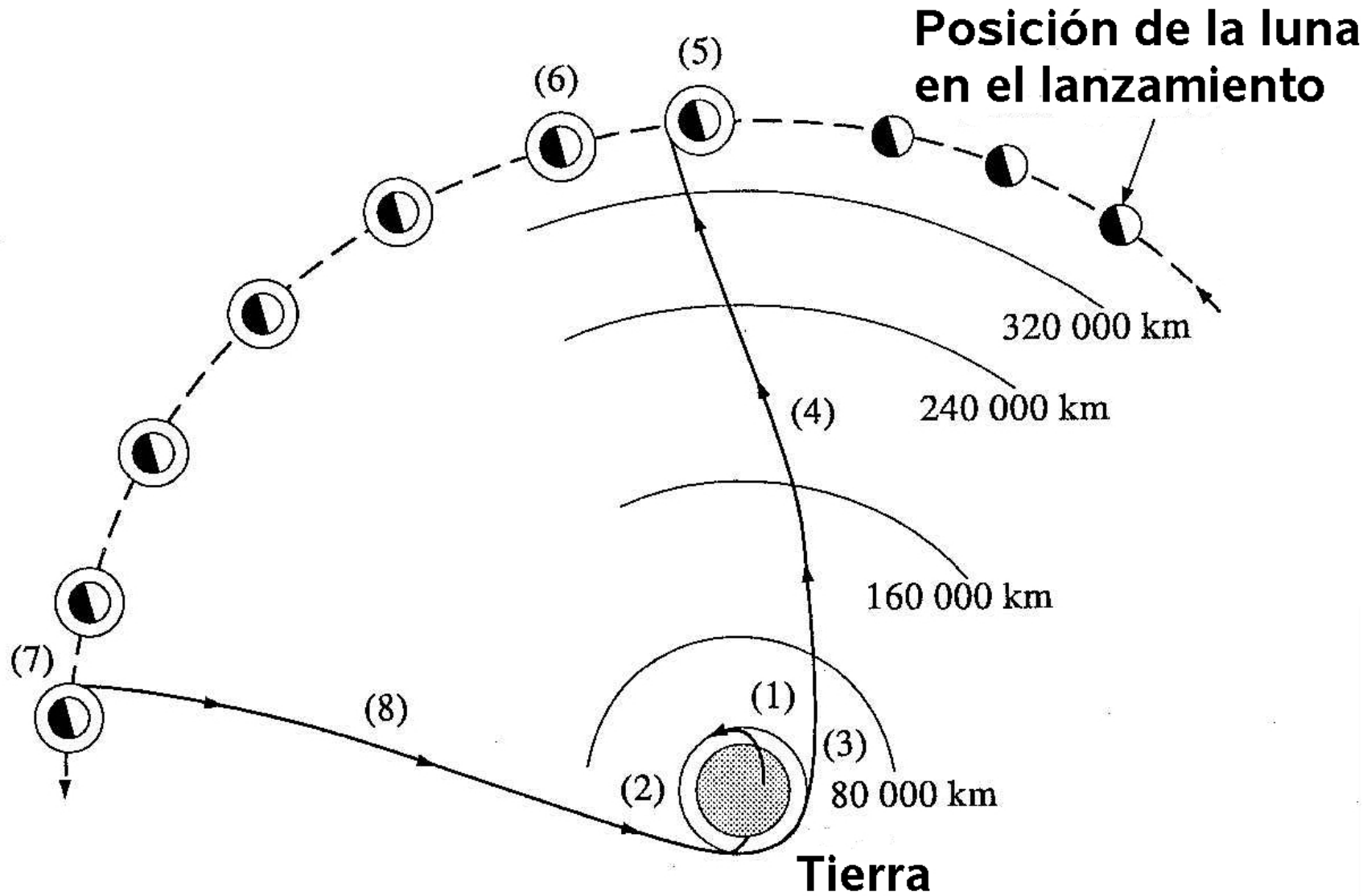


- En el diagrama a continuación se representan las líneas de fuerza y superficies equipotenciales del campo gravitatorio creado por el sistema Tierra-Luna, suponiendo ambas fijas y despreciando el efecto del Sol. Obsérvese que las líneas de fuerza no son radiales. En el punto A el campo resultante es nulo (Am J. Phys. **33**, 712 (1965)).



- Aquí vamos a suponer la Tierra inmóvil y que la Luna sigue una órbita circular a su alrededor, como se representa en la figura a la derecha.
- La posición de la Luna en el momento del lanzamiento es  $C_1$  y la de llegada  $C_2$ . La trayectoria de la nave es por tanto una línea curva cuyo cálculo es, como se ha dicho, muy complicado.
- Puede ocurrir que la nave, en vez de caer en la Luna, pase cerca de su superficie. En este caso, dependiendo de su velocidad y de la distancia de aproximación máxima, la nave seguirá diferentes trayectorias. Puede quedar retenida en una órbita estable en torno la Luna, pasar cerca de ella y regresar a la Tierra o bien desviarse y perderse en el Sistema Solar.
- Este fue el caso de la sonda Luna 1, lanzada por la antigua Unión Soviética en enero de 1959. Después de acercarse a 8.000 km, Luna 1 entró en órbita elíptica alrededor del Sol con un periodo de 443 días. La primera sonda en llegar a la Luna fue la Luna 2, lanzada en septiembre de 1959 y cuyo viaje duró 35 horas.
- La siguiente figura muestra las fases de la misión Apolo que llevó a Armstrong y Aldrin a la superficie de la Luna en julio de 1969. En ella se observa que después del lanzamiento (1) la nave se coloca en una órbita terrestre (2) de la que se separa en el punto (3), para seguir hacia la Luna a lo largo de la trayectoria (4) hasta entrar en órbita lunar (5). Posteriormente, el módulo lunar descendió hasta la superficie de la Luna (6) y, después de completar la misión, regresó a los módulos de comando y de servicio, que habían permanecieron en órbita (7), para iniciar el viaje de regreso (8).



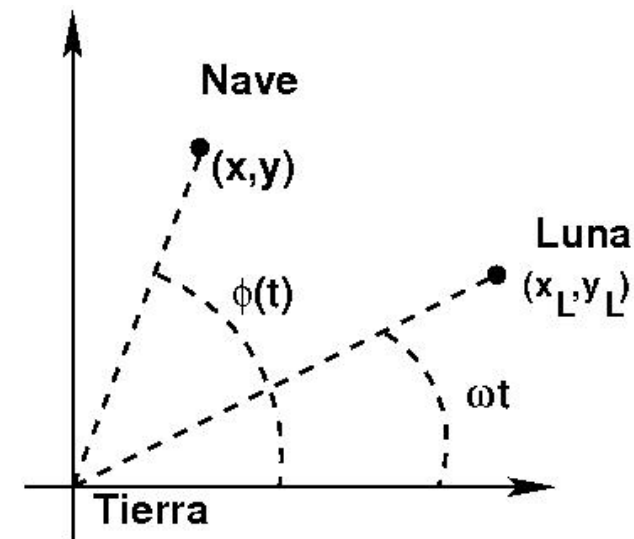




MTDA	S
CRIA	C
MTIA	X1
MT2A	X2
CRIA	BI
CPJA	BO
CPJA	PU
TYIA	TY
CRIA	SI
LPJA	LO
MT2A	GO

## 2. Modelo

- Nuestro sistema se compone de **tres cuerpos** —Tierra, Luna y nave espacial— que consideramos **sin estructura interna y caracterizados de forma única por sus masas**,  $M_T$ ,  $M_L$  y  $m$ , respectivamente. La única interacción presente es la gravitatoria.
- Vamos a suponer, por simplicidad, que **todos los cuerpos se mueven en el mismo plano** y, además, que **la Luna gira con velocidad angular constante** alrededor de la Tierra en una órbita de radio fijo  $d_{TL}$ .
- **La nave parte de la superficie terrestre con velocidad  $v_0$  y ángulo  $\theta_0$**  con respecto a unos ejes arbitrarios centrados en la Tierra que suponemos fija.
- Finalmente, la nave puede gastar una cierta **cantidad de energía  $E$**  en cambiar de velocidad mediante la **acción de un motor**. Supondremos que este motor funciona como un pulso instantáneo.
  - Tomamos como **origen** del sistema de referencia el **centro de la Tierra**.
  - La **Luna**, puesto que se mueve con **velocidad angular  $\omega$  constante** alrededor de la Tierra, tendrá las coordenadas temporales  $x_L(t) = d_{TL} \cos(\omega t)$  e  $y_L(t) = d_{TL} \sin(\omega t)$ .
  - Falta encontrar las **ecuaciones del movimiento de la nave espacial**. Sean  $x(t)$  e  $y(t)$  las coordenadas de la nave en el instante  $t$ . Puesto que la interacción tiene simetría polar, conviene trabajar con **coordenadas polares**:  $x(t) = r(t) \cos \phi(t)$ ,  $y(t) = r(t) \sin \phi(t)$ , donde  $r(t) = [x(t)^2 + y(t)^2]^{1/2}$  no es más que la distancia cuadrática de la nave a la Tierra.



- En estas coordenadas, la **distancia de la nave a la Luna** es, por aplicación del teorema del coseno,  $r_L(r, \phi, t) = [r(t)^2 + d_{TL}^2 - 2r(t)d_{TL} \cos(\phi - \omega t)]^{1/2}$ .
- La **energía cinética** de la nave es

$$T = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) = \frac{1}{2}m(\dot{r}^2 + r^2\dot{\phi}^2), \quad (1)$$

y la **energía potencial**

$$V = -G\frac{mM_T}{r} - G\frac{mM_L}{r_L(r, \phi, t)}. \quad (2)$$

- A partir de ellas se construye el **lagrangiano**,  $L = T - V$ . Para obtener el **hamiltoniano** se han de calcular los **momentos conjugados**:

$$p_r = \frac{\partial L}{\partial \dot{r}} = m\dot{r}, \quad p_\phi = \frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} = mr^2\dot{\phi}. \quad (3)$$

Así, el **hamiltoniano** queda

$$H = p_r\dot{r} + p_\phi\dot{\phi} - L = \frac{p_r^2}{2m} + \frac{p_\phi^2}{2mr^2} - G\frac{mM_T}{r} - G\frac{mM_L}{r_L(r, \phi, t)}. \quad (4)$$

- Finalmente, las **ecuaciones del movimiento de la nave** son



$$\dot{r} = \frac{\partial H}{\partial p_r} = \frac{p_r}{m}, \quad (5)$$

$$\dot{\phi} = \frac{\partial H}{\partial p_\phi} = \frac{p_\phi}{mr^2}, \quad (6)$$

$$\dot{p}_r = -\frac{\partial H}{\partial r} = \frac{p_\phi^2}{mr^3} - G\frac{mM_T}{r^2} - G\frac{mM_L}{r_L^3(r, \phi, t)} [r - d_{TL} \cos(\phi - \omega t)], \quad (7)$$

$$\dot{p}_\phi = -\frac{\partial H}{\partial \phi} = -G\frac{mM_L}{r_L^3(r, \phi, t)} r d_{TL} \sin(\phi - \omega t). \quad (8)$$

### 3. Método numérico

- Hemos de resolver numéricamente el anterior conjunto de **cuatro ecuaciones diferenciales no lineales**. Para ello, utilizamos el **algoritmo de Runge-Kutta de cuarto orden** que, en resumen, funciona como sigue.

- Sea la **ecuación diferencial** a resolver,

$$\dot{y}(t) = f(y(t), t), \quad (9)$$

donde  **$y(t)$  es un vector de  $N$  dimensiones**.

- Sea  **$y(t_0) = y_0$  dado**. Entonces,  $y(t_0 + h)$  se puede aproximar por

$$y(t_0 + h) = y(t_0) + \frac{1}{6} [k^{(1)} + 2k^{(2)} + 2k^{(3)} + k^{(4)}] + O(h^5), \quad (10)$$

donde

$$k^{(1)} = hf(y_0, t_0), \quad (11)$$

$$k^{(2)} = hf\left(y_0 + \frac{k^{(1)}}{2}, t_0 + \frac{h}{2}\right), \quad (12)$$

$$k^{(3)} = hf\left(y_0 + \frac{k^{(2)}}{2}, t_0 + \frac{h}{2}\right), \quad (13)$$

$$k^{(4)} = hf(y_0 + k^{(3)}, t_0 + h). \quad (14)$$

- En general, el algoritmo de iteración para una [sistema arbitrario de  \$N\$  ecuaciones diferenciales](#)  $\dot{y}_n(t) = f_n(y_1, y_2, \dots, y_N; t)$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) es:

1. Dar  $y_n = y_n(0)$  para  $t = 0$  y  $n = 1, 2, \dots, N$ .

2. Evaluar  $k_n^{(1)} = hf_n(y_1, y_2, \dots, y_N; t)$  para  $n = 1, 2, \dots, N$

3. Evaluar  $k_n^{(2)} = hf_n\left(y_1 + \frac{k_1^{(1)}}{2}, y_2 + \frac{k_2^{(1)}}{2}, \dots, y_N + \frac{k_N^{(1)}}{2}; t + \frac{h}{2}\right)$  para  $n = 1, 2, \dots, N$ .

4. Evaluar  $k_n^{(3)} = hf_n\left(y_1 + \frac{k_1^{(2)}}{2}, y_2 + \frac{k_2^{(2)}}{2}, \dots, y_N + \frac{k_N^{(2)}}{2}; t + \frac{h}{2}\right)$  para  $n = 1, 2, \dots, N$ .

5. Evaluar  $k_n^{(4)} = hf_n(y_1 + k_1^{(3)}, y_2 + k_2^{(3)}, \dots, y_N + k_N^{(3)}; t + h)$  para  $n = 1, 2, \dots, N$ .

6.  $y_n(t + h) = y_n(t) + \frac{1}{6} [k_n^{(1)} + 2k_n^{(2)} + 2k_n^{(3)} + k_n^{(4)}]$ .

7.  $t = t + h$ . Ir a (2).

- El [porqué de esta estructura recursiva](#) se explica en el [apéndice B](#), donde hace la derivación detallada del algoritmo de orden 2, se esboza la derivación del de orden 3 y se justifica el uso generalizado del de orden 4.
- El [error cometido con este algoritmo es de orden  \$h^5\$](#) , luego cuanto más pequeño sea  $h$  tanto más preciso será el cálculo, aunque más se tardará en alcanzar tiempo largos. Antes de elegir un valor de  $h$  comentamos las [escalas típicas de tiempo del problema](#).
- Una nave espacial en órbita terrestre tiene un periodo de unos 90 minutos. Por tanto, para describir con precisión una de tales órbitas se debería escoger  $h \leq 1$  minuto.
- Por otra parte, si la nave se encuentra a [mitad de camino](#) entre la Tierra y la Luna, [los tiempos característicos de los cambios de velocidad son del orden de las horas](#).
- De esta forma, se ve que si se quiere describir conjuntamente las órbitas y los desplazamientos entre la Tierra y la Luna [se debe usar el paso más pequeño, esto es,  \$h \simeq 1\$  minuto](#). Esta elección supone realizar unas  $10^4$  iteraciones del anterior algoritmo en una misión típica de una semana, lo que hace que el cálculo sea lento.
- Se puede evitar esto [adaptando el valor de  \$h\$  a cada momento de la evolución](#). El siguiente algoritmo realiza esta función:
  1. Dar una  $h$  inicial,  $t = 0$ , y el error máximo que se tolera  $\epsilon \simeq h^5$ ,  $t_0$  e  $y_0(t_0)$ .
  2. Evaluar  $\epsilon = 16|y(t_0 + h; h/2) - y(t_0 + h; h)|/15$ . En caso de que  $y$  tenga varias componentes se ha de calcular el  $\epsilon$  de cada una ellas y tomar el máximo.
  3. Evaluar  $h_{\max} = h/s$ , donde  $s = \max\{(\epsilon/\epsilon_{\max})^{0,2}, 10^{-8}\}$ .
  4. Si  $s > 2$ , entonces  $h = h_{\max}$ . Ir a (2). Si  $s < 2$ , entonces  $t = t + h$  e  $y = y(t_0 + h; h/2)$
  5. Si  $h < h_{\max}$ , entonces  $h = 2h$ . Ir a (2).

- La idea principal del algoritmo anterior es estudiar la variación relativa del error que se obtiene cuando se realiza un iteración de paso  $h$  en comparación con dos iteraciones de paso  $h/2$ .
  - Sea  $y(t + h_1; h_2)$  el resultado de iterar varias veces con  $h = h_2$  hasta hacer evolucionar el sistema un tiempo  $t + h_1$ . En particular, se sabe que el error del algoritmo de Runge-Kutta es del orden  $\epsilon_h = Ch^5$  cuando la iteración tiene un paso  $h$ . El error acumulado tras dos iteraciones de paso  $h/2$  será del orden de  $\epsilon_{h/2} = 2C(h/2)^5 = \epsilon_h/16$ . Esto es,  $\epsilon_h - \epsilon_{h/2} = 15\epsilon_h/16$ , luego  $\epsilon_h = 16(\epsilon_h - \epsilon_{h/2})/15$ .
  - Puesto que  $y(t + h; h) = y_{\text{exacta}}(t + h) + \epsilon_h$  e  $y(t + h; h/2) = y_{\text{exacta}}(t + h) + \epsilon_{h/2}$ , se tiene que  $\epsilon_h \simeq 16[y(t_0 + h; h/2) - y(t_0 + h; h)]/15$ . Conociendo  $\epsilon_h$  y la tolerancia  $\epsilon_{\text{max}}$  se obtiene el paso  $h_{\text{max}}$  correspondiente al máximo error tolerado. Así, sabiendo que  $\epsilon_h/\epsilon_{\text{max}} = h^5/h_{\text{max}}^5$  se obtiene  $h_{\text{max}} = h(\epsilon_{\text{max}}/\epsilon_h)^{1/5}$ .
  - Si  $h_{\text{max}} < h/2$  quiere decir que se ha evaluado las trayectorias utilizando  $h/2$ , que da errores mayores que la tolerancia y, por tanto, hemos de recalcular todo con un  $h$  menor, en particular  $h = h_{\text{max}}$ . Si la  $h$  inicial es menor que  $h_{\text{max}}$ , quiere decir que estamos realizando el cálculo con excesiva precisión y, por tanto, se puede incrementar  $h$ , en particular  $h = 2h$ .
- Por último, comentamos la influencia de los valores de las variables en el cálculo. Como es bien sabido, el ordenador introduce una fuente de error intrínseco debido al redondeo que efectúa en cada operación aritmética, error que se amplifica cuando se trabaja con variables con valores muy dispares entre sí. Para minimizar este efecto se debe intentar que las variables  $r, \phi, p_r$  y  $p_\phi$  sean del mismo orden de magnitud. Una forma de conseguirlo es reescalarlas, lo cual se puede hacer de varias formas.
- En particular, se puede usar:  $\tilde{r} = r/d_{TL}$ ,  $\phi, \tilde{p}_r = p_r/md_{TL}$  y  $\tilde{p}_\phi = p_\phi/md_{TL}^2$ . En este caso, las ecuaciones de movimiento son

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{r}} &= \tilde{p}_r, & \dot{\tilde{p}}_r &= \frac{\tilde{p}_\phi^2}{\tilde{r}^3} - \Delta \left\{ \frac{1}{\tilde{r}^2} + \frac{\mu}{\tilde{r}^3} [\tilde{r} - \cos(\phi - \omega t)] \right\}, \\ \dot{\phi} &= \frac{\tilde{p}_\phi}{\tilde{r}^2}, & \dot{\tilde{p}}_\phi &= -\frac{\Delta\mu\tilde{r}}{\tilde{r}^3} \sin(\phi - \omega t), \end{aligned}$$

donde  $\Delta \equiv GM_T/d_{TL}^3$ ,  $\mu \equiv M_L/M_T$  y  $\tilde{r}' \equiv [1 + \tilde{r}^2 - 2\tilde{r}\cos(\phi - \omega t)]^{1/2}$ .

- Los **valores numéricos** que deben usarse son:  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$ ,  $M_T = 5,9736 \times 10^{24} \text{ kg}$ ,  $M_L = 0,07349 \times 10^{24} \text{ kg}$ ,  $d_{TL} = 3,844 \times 10^8 \text{ m}$  y  $\omega = 2,6617 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ . Además, como la nave despegue desde la superficie terrestre y llegar a la lunar, son necesarios los radios de la Tierra,  $R_T = 6,378160 \times 10^6 \text{ m}$ , y de la Luna,  $R_L = 1,7374 \times 10^6 \text{ m}$ .

#### 4. Problemas:

- **Obligatorio:** diseñar y escribir el programa que resuelve las ecuaciones del movimiento de una nave moviéndose bajo la acción de los campos gravitatorios terrestre y lunar.
  - **Comparar las trayectorias** y tiempos de cálculo obtenidos cuando se utiliza  **$h$  fija** o la  **$h$  adaptada**.
  - Demostrar que  **$H' = H - \omega p_\phi$  es una constante del movimiento**, esto es,  $\dot{H}' = 0$ . Utilizar este hecho para conocer el error acumulado por la utilización del algoritmo de Runge-Kutta adaptativo.
- **Voluntario 1:** Se ha detectado un meteorito esférico de 10000 metros de radio y densidad  $2,08\text{gr}/\text{cm}^3$  acercándose a la Tierra con velocidad radial (respecto de la Tierra) de  $5000\text{m}/\text{s}$ , y velocidad angular cero. Es un meteorito de tipo **extinción** y se decide enviar una nave con una cabeza nuclear que al explotar dividirá el meteorito en dos, dándole a cada uno de los trozos una componente perpendicular a su velocidad de caída que se espera sea lo suficientemente grande para que no lleguen los trozos a colisionar con la Tierra. En el momento del despegue de la nave, el meteorito se encuentra a una distancia de 10 veces la distancia entre la Tierra y la Luna.
  - Diseñar la misión de intercepción sabiendo que la nave, antes de explotar tiene que depositarse sobre la superficie del meteorito con velocidad relativa cero. Para ello se ha de utilizar la Luna como elemento necesario para la aproximación de la nave al meteorito. La nave puede corregir su rumbo varias veces durante

su viaje de intercepción. Se piden los valores  $\theta_0$  y  $v_0$  y los instantes en los que se deben encender los motores. Notar que éstos siempre dan el mismo pulso instantáneo, cuya magnitud también se ha de proporcionar como parte del diseño de la misión. También se pide dar la duración total de la misión y el gasto energético de la misma.

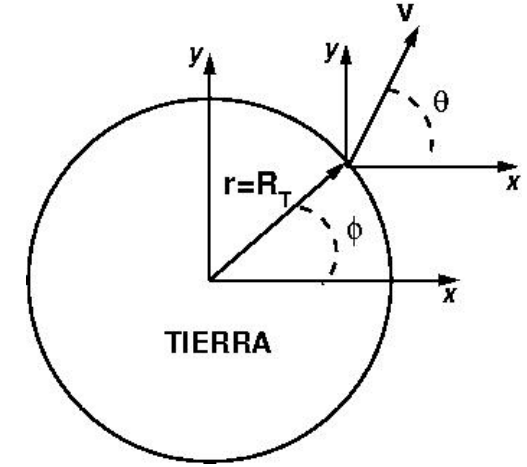
- Una vez el misil se deposita en el asteroide se supone que en ese instante se detona la cabeza nuclear de la nave. Si toda la energía de la detonación se invierte en dotar a los dos trozos del asteroide de una velocidad perpendicular  $v$ , estimar la potencia mínima necesaria (en kilotones) para que las trayectorias de los trozos no impacten con la Tierra. lo que imprime una velocidad perpendicular a la trayectoria  $v$ . Estudiar las trayectorias de los trozos del asteroide en función de  $v$ . Notar que la mayor cabeza nuclear fabricada tiene 50 megatones.
- Estudiar las trayectoria futuras de los trozos y comprobar si pueden o no colisionar con la Tierra, se escapan de su atracción gravitatoria o quedan en órbita alrededor de ella.

Opciones en el diseño de la misión: (1) El meteorito es influido o no por la gravedad de la Luna, (2) La posición inicial de la Luna es aleatoria o no.

- **Voluntario 2:** Diseñar una misión para una nave que viaje a Marte y se quede orbitando en el planeta. Se tendrán en cuenta las interacciones de la nave con el Sol, la Tierra y Marte. Para ello obtener las ecuaciones del movimiento suponiendo conocidas las órbitas de la Tierra y Marte. En el diseño de la misión se puede incluir el uso de motores (pulsos instantáneos) para corregir la trayectoria y/o quedar en órbita alrededor de Marte. En cualquier caso se ha de detallar la energía total utilizada para ello y justificar de que manera se podría obtener. Calcular el tiempo del viaje suponiendo varias condiciones iniciales. Ayuda: Utilizar la órbita de transferencia de Hohmann.

## Appendix A. Sobre las condiciones iniciales

- Resolver las 4 ecuaciones de movimiento requiere **proporcionar los valores iniciales de  $r, \phi, p_r$  y  $p_\phi$** .
- Los dos primeros determinan el punto de lanzamiento del cohete. En cuanto a los valores iniciales de los **momentos  $p_r$  y  $p_\phi$** , magnitudes de las que por lo general no se tiene intuición, pueden obtenerse a partir de la **velocidad de lanzamiento  $\mathbf{v} = (\dot{x}, \dot{y}) = (v \cos(\theta), v \sin(\theta))$**  sin más que recurrir a la definiciones.
- Así, se tienen las **relaciones**



$$\begin{aligned}\tilde{p}_r &= \frac{p_r}{md_{TL}} = \frac{m}{md_{TL}} \frac{dr}{dt} = \frac{1}{d_{TL}} \frac{d}{dt} \sqrt{x^2 + y^2} = \frac{x\dot{x} + y\dot{y}}{rd_{TL}} \\ &= \frac{xv \cos(\theta) + yv \sin(\theta)}{rd_{TL}} = \frac{rv \cos(\theta) \cos(\phi) + rv \sin(\theta) \sin(\phi)}{rd_{TL}} = \tilde{v} \cos(\theta - \phi), \\ \tilde{p}_\phi &= \frac{p_\phi}{md_{TL}^2} = \tilde{r}^2 \frac{d}{dt} \arctan\left(\frac{y}{x}\right) = \frac{\tilde{r}^2}{1 + y^2/x^2} \frac{d}{dt} \left(\frac{y}{x}\right) = \frac{\tilde{r}^2}{r^2} (\dot{y}x - y\dot{x}) = \tilde{r}\tilde{v} \sin(\theta - \phi).\end{aligned}$$

- Salvo que el punto de lanzamiento está sobre la superficie de la Tierra,  $r = R_T$ , no existe un método general para asignar valores iniciales al resto de variables,  $\phi, \theta$  y  $v$ . Es aconsejable, no obstante, que  **$v$  sea próxima a la velocidad de escape**, puesto que éste es el **mínimo valor que garantiza que la nave tiene la energía suficiente para escapar del campo gravitatorio de la Tierra**. Finalmente, hay **mucha libertad para escoger  $\phi$  y  $\theta$** , que dependen de dónde esté situada la Luna en el momento del lanzamiento.

## Appendix B. El método de Runge-Kutta

- Sea la **ecuación diferencial de primer orden**

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y), \quad (\text{B.1})$$

con la **condición inicial**  $y(x_0) = y_0$ , que pretendemos resolver en el **intervalo**  $[a, b]$ .

- Para ello, consideramos un **conjunto de puntos de**  $[a, b]$ , **equiespaciados**, entre los cuales está el punto  $x_0$ <sup>2</sup>.
- Sea  $y(x)$  una solución exacta de la ecuación e  $y_j \approx y(x_j)$  los **valores aproximados** resultado del cálculo numérico. En los **métodos monopaso**, el valor aproximado de  $y(x_{j+1})$  viene dado mediante

$$y_{j+1} = y_j + hg(x_j, y_j, f, h). \quad (\text{B.2})$$

- Por ejemplo, **desarrollando en serie de Taylor**,

$$y_{j+1} = y_j + hy'_j + \frac{h^2}{2}y''_j + \frac{h^3}{6}y'''_j + O(h^4). \quad (\text{B.3})$$

Usando la aproximación más simple se obtiene el **método de Euler**,  $y_{j+1} = y_j + hf(x_j, y_j)$ , en el que se observa que  $g$  es la propia función  $f$  de la ecuación diferencial, es decir, la pendiente en  $(x_j, y_j)$ . En este caso **el error es del orden de**  $h^2$ . Veamos cómo, con muy poco esfuerzo, se pueden obtener resultados mejores.

- En el método de Runge-Kutta (RK),  $g$  es una media ponderada de valores de  $f(x, y)$  en el intervalo  $[x_j, x_{j+1}]$ , y se dice que es de **orden**  $m$  si alcanza una **precisión equiparable a la del desarrollo de Taylor de ese orden**.

\*\*En general, dado un paso  $h$  arbitrario,  $[x_0 - mh, x_0 + mh]$  no coincide con  $[a, b]$ , es decir, los extremos  $a$  y  $b$  no coincidirán con puntos de división. Esto carece de importancia y escogeremos el intervalo de máxima longitud  $[x_0 - mh, x_0 + mh]$  contenido en  $[a, b]$ .



- Una característica del método RK es que **hace uso de la función  $f$  pero no de sus derivadas**.
- Exponemos a continuación el **método de segundo orden**:

$$y_{j+1} = y_j + h[ak_1 + bk_2]. \quad (\text{B.4})$$

El **primer término** de la media ponderada es siempre la **pendiente al principio del intervalo**,  $k_1 = f(x_j, y_j) = y'(x_j)$ . En cuanto al **segundo término**,

$$k_2 = f(x_j + \lambda h, y_j + \mu h k_1), \quad (\text{B.5})$$

donde  $0 < \lambda \leq 1$ .

- Los coeficientes  $a, b$  y los números  $\lambda, \mu$  se fijan **imponiendo que el algoritmo sea compatible con un desarrollo de Taylor de orden 2**, y se ha impuesto la forma  $\mu h k_1$  del segundo incremento para facilitar dicha comparación.
- Desarrollando  $k_2$ ,

$$f(x_j + \lambda h, y_j + \mu h k_1) = k_1 + \partial_x f(x_j, y_j) \lambda h + \partial_y f(x_j, y_j) \mu h k_1 + O(h^2), \quad (\text{B.6})$$

resulta

$$y_{j+1} = y_j + h(a + b)k_1 + h^2 b [\partial_x f(x_j, y_j) \lambda + \partial_y f(x_j, y_j) \mu k_1] + O(h^3). \quad (\text{B.7})$$

- **Comparamos** ahora esta última expresión con el **desarrollo de Taylor** de  $y(x_{j+1}) = y(x_j + h)$ ,

$$y(x_{j+1}) = y(x_j) + h y'(x_j) + \frac{h^2}{2} y''(x_j) + \dots \quad (\text{B.8})$$

Sustituyendo  $y(x_j)$  por su valor aproximado  $y_j$  y notando que

$$y''(x_j) = \partial_x f(x_j, y_j) + \partial_y f(x_j, y_j) f(x_j, y_j) \quad (\text{B.9})$$

resulta

$$y_{j+1} \approx y_j + hf(x_j, y_j) + \frac{h^2}{2} [\partial_x f(x_j, y_j)\lambda + \partial_y f(x_j, y_j)\mu f(x_j, y_j)]. \quad (\text{B.10})$$

- Comparando, se llega al sistema  $a + b = 1$ ,  $b\lambda = 1/2$ ,  $b\mu = 1/2$ , que es indeterminado. Dejando libre  $b$ , resulta  $a = 1 - b$ ,  $\lambda = \mu = 1/2b$ . Si  $b = 1$ , lo que proporciona un método particular RK, conduce a  $a = 0$  y  $\lambda = \mu = 1/2$ . En definitiva,

$$y_{j+1} = y_j + \frac{h}{2} f\left(x_j + \frac{h}{2}, y_j + \frac{h}{2}k_1\right). \quad (\text{B.11})$$

- Un RK de tercer orden viene dado por

$$y_{j+1} = y_j + h[ak_1 + bk_2 + ck_3], \quad (\text{B.12})$$

con

$$\begin{aligned} k_1 &= f(x_j, y_j), \\ k_2 &= f(x_j + \lambda h, y_j + \mu h k_1), \\ k_3 &= f(x_j + \lambda_2 h, y_j + \mu_2 k_2 + (\lambda_2 - \mu_2) h k_1). \end{aligned} \quad (\text{B.13})$$

- Los tres pesos,  $a, b, c$  y los cuatro coeficientes incrementales  $\lambda, \mu, \lambda_2$  y  $\mu_2$  se calculan desarrollando  $k_2$  y  $k_3$  en serie de Taylor de dos variables hasta orden  $h^2$ , e identificando los factores que multiplican a  $h$ ,  $h^2$  y  $h^3$  con los correspondientes del desarrollo de Taylor de una variable de  $y(x_j + h)$ . El sistema de ecuaciones así obtenido es indeterminado, y sus distintas soluciones corresponden a diferentes esquemas RK.

- El RK de cuarto orden conjuga bien la precisión con el esfuerzo de computación. Uno de ellos es

$$\begin{aligned}y_{j+1} &= y_j + h\left[\frac{1}{6}k_1 + \frac{1}{3}k_2 + \frac{1}{3}k_3 + \frac{1}{6}k_4\right], \\k_1 &= f(x_j, y_j), \quad k_2 = f\left(x_j + \frac{h}{2}, y_j + \frac{h}{2}k_1\right), \\k_3 &= f\left(x_j + \frac{h}{2}, y_j + \frac{h}{2}k_2\right), \quad k_4 = f(x_j + h, y_j + hk_3).\end{aligned}\tag{B.14}$$