

# PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE LA ASTRONAUTICA (\*)

Satélites artificiales. El cohete. Los combustibles  
La relación de masas. Progresos de la Astronáutica

Por IGNACIO RIOS CHACON, Catedrático  
de Física del Instituto de Plasencia.

CONSIDERAMOS este tema de interés para los alumnos del curso Preuniversitario, no sólo por el gran desarrollo adquirido por la astronáutica en los últimos años, sino también porque permite utilizar un tema de actualidad para provocar el repaso de conceptos fundamentales de la Física, como son: el campo gravitatorio, el principio de conservación de la cantidad de movimiento, la ley de las áreas, etc.

## SATELITES ARTIFICIALES

Si lanzamos proyectiles o cuerpos al espacio más allá de la atmósfera terrestre (para evitar los rozamientos que la atmósfera ejerce sobre los mismos) y con velocidades crecientes, describirán, en principio, trayectorias de tipo parabólico bien conocidas (tiro parabólico) cuyo alcance aumentará proporcionalmente a esas velocidades de tiro. Ahora bien, llegará un momento en que este alcance será tal, que el proyectil dará una vuelta completa (órbita) a la superficie terrestre y si la fuerza centrífuga en este giro iguala al peso del proyectil,

$m$  masa del proyectil

$$mg = m \frac{v^2}{x} \quad v \text{ velocidad}$$

$x$  radio de las órbitas

$g$  valor de la gravedad en las órbitas

---

(\*) Lección desarrollada ante los alumnos del Curso Preuniversitario del Instituto Nacional de Enseñanza Media "Gabriel y Galán", de Plasencia.

se convertirá en un «satélite circular artificial» de nuestro planeta, no volviendo a caer sobre el mismo. Despejando la velocidad en la fórmula anterior, encontraremos la velocidad mínima necesaria para que esto ocurra:

$$[1] \quad v = \sqrt{gx}$$

y teniendo en cuenta que

$g_0$  gravedad en la superficie terrestre

$$g = g_0 \frac{R^2}{x^2} \quad R \text{ radio terrestre}$$

$x$  radio de las órbitas

expresión que puede calcularse dividiendo los valores de la gravedad en las órbitas y en la superficie del planeta

$$\left. \begin{aligned} g &= G \frac{M}{x^2} \\ g_0 &= G \frac{M}{R^2} \end{aligned} \right\} \frac{g}{g_0} = \frac{R^2}{x^2}$$

la expresión [1] podrá escribirse en la forma

$$v = \sqrt{g_0 R^2/x}$$

De esta expresión podremos deducir los valores mínimos que debe adquirir el proyectil para girar en órbita circular de radio  $x$  alrededor de nuestro planeta. Observemos también que esta velocidad disminuirá al aumentar el radio de las órbitas y, por tanto, tendrá su valor máximo sobre la superficie terrestre (caso puramente teórico).

Como ejemplo, calcularemos esta velocidad para el caso de un satélite lanzado desde una altura de 400 kilómetros sobre la superficie terrestre y en un lugar en que  $g_0 = 9,8 \text{ m/s}^2$

$$v = \sqrt{9,8 \frac{6.400.000^2}{6.800.000}} = 7.683 \text{ m/s} = 7,683 \text{ km/s}$$

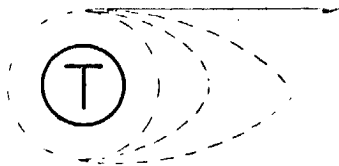
Conocidas estas velocidades podremos también calcular los períodos de revolución de estos satélites por la expresión

$$T = \frac{2 \pi x}{v}$$

que para el caso del ejemplo anterior valdrá:

$$T = 2 \pi \frac{6.800.000}{7.683} = 5.551,7^s = 92 \text{ m } 31,7 \text{ s}$$

Superadas estas velocidades mínimas necesarias, para que el satélite describa órbitas circulares, las órbitas pasarán a ser elípticas (como las de todo cuerpo sometido a fuerzas centrales que, en este caso son las de gravitación universal) «satélites elípticos». Podemos considerar los satélites circulares como un caso particular de estos otros satélites elípticos. Estas órbitas elípticas tendrán por «perigeo» el punto de lanzamiento, aumentando en longitud el eje mayor de las mismas proporcionalmente a la velocidad comunicada al proyectil y, por tanto, también aumentará la distancia desde su «apogeo» a la superficie de nuestro planeta.



Estos satélites elípticos cumplirán la ley de las áreas, ya que estarán sometidos a la fuerza central de la atracción terrestre; por tanto, si llamamos  $ds$  al área barrida por el radio vector que une el centro de la tierra con el del satélite en un tiempo  $dt$ , la constancia de la velocidad areolar nos permitirá escribir

$$\frac{ds}{dt} = r \cdot v = \omega r^2 = K \text{ (constante)}$$

donde  $r$ ,  $v$ ,  $\omega$  representan el radio vector, la velocidad lineal y la velocidad angular, respectivamente, de un punto cualquiera de la

órbita. Conociendo estas velocidades en un punto cualquiera, podremos conocer sus valores en otro punto de radio vector  $r'$  mediante la igualdad

$$rv = r'v' \quad \text{o bien} \quad \omega'r'^2 = \omega r^2$$

Calcularemos como ejemplo la velocidad  $v'$  que presentará un satélite en su apogeo, situado a 2.000 kilómetros de distancia de la superficie terrestre, sabiendo que en su perigeo situado a una altura de 500 kilómetros presenta una velocidad de 10 km/s. (Radio terrestre 6.400 km.)

$$v' = \frac{v \cdot r}{r'} = \frac{6.900 \text{ km } 10 \text{ km/s}}{8.400 \text{ km}} = 8,2 \text{ km/s}$$

Si continuamos aumentando la velocidad de lanzamiento de estos satélites llegará un momento, y para una velocidad determinada, en que se liberarán de las fuerzas de atracción terrestres. Esto ocurrirá cuando su energía cinética iguale al trabajo necesario para alejarlos desde las órbitas hasta el infinito, venciendo para esto las fuerzas de gravitación universal. Este trabajo podremos calcularlo de la siguiente forma:

$$T = \int_R^{\infty} F \, dx = \int_R^{\infty} G \frac{Mm}{x^2} \, dx = G \frac{Mm}{x}$$

$G$  = constante de gravitación universal

$M$  = masa terrestre

$m$  = masa del satélite

e igualando este trabajo a la energía cinética:

$$G \frac{M \cdot m}{x} = \frac{1}{2} m v_0^2$$

podremos despejar la velocidad necesaria para su liberación  $v_0$ , llamada «velocidad de escape»

$$[2] \quad = \sqrt{\frac{2GM}{x}}$$

y teniendo en cuenta que

$$g_0 = G M/R^2$$

la ecuación anterior podrá escribirse en la forma :

$$v_0 = \sqrt{2 g_0 R^2/x}$$

Así, para el caso de un satélite situado a 400 kilómetros de altura, la velocidad de escape será :

$$v_0 = \sqrt{2 \cdot 9,8 \frac{6.400.000^2}{6.800.000}} = 10.800 \text{ m/s} = 10,8 \text{ km/s}$$

y como podemos comprobar por la fórmula [2] estas velocidades de escape serán tanto menores cuanto mayor sea el radio de las órbitas de los satélites.

Rebasadas estas velocidades de escape, los satélites se perderán para siempre en el espacio, describiendo ramas de hipérbola cuyos focos coincidirán con el centro de la tierra.

De todo lo visto se deduce que para lanzar un satélite artificial serán necesarias dos condiciones :

1.<sup>a</sup> Elevarlo hasta más allá de la atmósfera terrestre, para evitar que la resistencia del aire lo frene y acabe por caer.

2.<sup>a</sup> Comunicarle una velocidad mínima necesaria con el fin de que su peso quede equilibrado por la fuerza centrífuga del giro. Como hemos comprobado por un ejemplo numérico, esta velocidad mínima es muy elevada, oscilando sus valores entre los 7,9 kilómetros por segundo a 0 km/s (es decir, sobre la superficie terrestre), caso puramente teórico y los 6,9 km/s a 2.000 km.

## EL COHETE

Las enormes velocidades requeridas para poner el satélite en órbita, deben adquirirse progresivamente mediante «el cohete» por varios motivos :

1.º Porque no hay posibilidad de adquirirlas mediante un tiro directo, como el de un cañonazo.

2.º Para evitar la enorme resistencia que la atmósfera ejercería a grandes velocidades y que es proporcional al cuadrado de éstas ( $R = Kv^2$ ).

3.º Para evitar fuerzas de inercia considerables, que necesariamente se producen siempre que existe una aceleración. Estas fuerzas de inercia se manifiestan en sentido contrario al movimiento y tomarán el valor:

$$f = - m a$$

$a = \text{aceleración}$   
 $m = \text{masa del cohete}$

y según el valor de esta aceleración, podrían llegar a ser muy peligrosas.

El cohete portador del satélite, podemos definirlo como un proyectil autopropulsado, que partiendo del suelo con velocidad nula, va adquiriendo ésta progresivamente. Consiste esencialmente en un cilindro que contiene productos químicos cuyos gases de combustión son expulsados a gran velocidad por un conducto llamado tobera, procedentes de una cámara de combustión, creando por reacción una fuerza de tracción.

El hecho de ser autopropulsado, significa que tiene autonomía completa de movimiento, pudiendo moverse en el vacío con la misma velocidad que en la atmósfera al no encontrar resistencia alguna, por lo que resulta ser el vehículo ideal para moverse en el espacio. Como durante la primera parte de su trayectoria atravesará la atmósfera, debe tener una forma adecuada para ello (forma aerodinámica).

Para calcular la velocidad del cohete en un instante cualquiera de su trayectoria, nos basaremos en el principio de conservación de la cantidad de movimiento, expresado en la forma:

$$d(mv) = 0$$

o bien:

$$m dv = -v dm$$

$m$  = masa de los gases expulsados

$dv$  = incremento de velocidad

$dm$  = masa de los gases expulsados

$v$  = velocidad de escape de los gases de combustión

despejando  $dv$  e integrando

$$v = \int dv = -v \int_{m_0}^m \frac{dm}{m} = -v [\ln m]_{m_0}^m = -v \ln \frac{m}{m_0} \quad [3]$$

El cociente  $m_0/m$  entre la masa inicial  $m_0$  y la masa en un instante cualquiera, recibe el nombre de *relación de masas*.

De esta fórmula deducimos que para aumentar la velocidad del cohete es preciso aumentar la velocidad de salida de los gases, lo que es un problema simplemente de combustibles, o bien de aumentar la relación de masas del mismo.

Si considerásemos las fuerzas que actúan en sentido contrario al cohete, es decir, resistencia del aire y atracción gravitatoria, la ecuación [3] tomaría la forma:

$$v = V \ln R - gt - R$$

$r$  = relación de masas

$R$  = resistencia del aire

$t$  = tiempo de combustión de los gases

## LOS COMBUSTIBLES

Los combustibles más apropiados serán aquellos que den lugar a reacciones de combustión más enérgicas, dando lugar a productos de reacción expulsados, lo más ligeros posibles, puesto que al ser su masa menor y para una misma energía de combustión, aumentará su velocidad de eyección de acuerdo con la ecuación:

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

Los combustibles más utilizados en los primeros tiempos de astronáutica fueron: la pólvora de cañón, los hidrocarburos, el alcohol, etc.; utilizándose como comburantes, el oxígeno, ozono,  $H_2O_2$ ,  $NO_3H$ , etc. En estas combustiones se producen velocidades de eyección del orden de los 3 km/s. Con la mezcla oxidrica estas velocidades son del orden de los 5 km/s. En la actualidad, el gran desarrollo de las químicas del boro y del litio ha permitido disponer de combustibles mucho más enérgicos: los hidroburos y los hidru-

ros del Li. Los primeros son análogos a los hidrocarburos; el boro mismo que el carbono, se combina con el hidrógeno, dando lugar a los hidroboruros. Pero mientras la combustión de un gramo de hidrocarburo desprende por término medio 10 calorías, la de un hidroboruro desprende 16. Para la técnica astronáutica esto es una verdadera revolución, pudiendo alcanzarse velocidades de eyección del orden de los 4 km/s. En cuanto a los hidruros del Li, debemos tener en cuenta que no sólo produce reacciones de combustión más energéticas que las correspondientes a los hidrocarburos, sino que los productos de la combustión serán mucho más livianos, ya que el  $\text{Li}_2\text{O}$  que se forma es más ligero que el  $\text{CO}_2$  que se formaría en la combustión de los hidrocarburos, pudiendo alcanzarse velocidades de eyección del orden de los 5 km/s. También es posible que la combustión del hidruro de Li se realice no con  $\text{O}_2$ , sino con flúor,  $\text{F}_2$ , alcanzándose en este caso velocidades del orden de los 6 km/s. No queremos olvidar tampoco la posibilidad de utilización de ciertos metales como combustibles, tal es el caso del Al y del Mg, con producción de velocidades de eyección muy considerables. Los progresos constantes de la química permiten albergar esperanzas cada vez más prometedoras en este sentido.

## LA RELACION DE MASAS

La velocidad del cohete no sólo puede aumentar incrementando la velocidad de eyección de los gases de combustión con la producción de supercombustibles, sino también aumentando la relación de masas del mismo y de acuerdo con la ecuación [3].

Esta ecuación nos pone de manifiesto que para conseguir velocidades del orden de los 10 km/s. y para combustibles cuyas velocidades de eyección oscilen entre los dos y los cinco km/s., serán necesarias relaciones de masas que oscilen entre los 10 y los 100.

Una fórmula que permite aumentar la relación de masas, consiste en que el cohete portador expulse los depósitos de combustible a medida que éstos se agotan. Este es el fundamento de los cohetes compuestos o múltiples constituidos esencialmente por dos o más cohetes simples. El primer cohete, llamado «cohete madre», alojará en su interior al segundo cohete y así sucesivamente. En el último cuerpo se alojará la carga útil o satélite propiamente dicho. Parece ser que para la mayoría de los combustibles clásicos resultan aconsejables los cohetes de tres cuerpos, mientras que para conseguir en ambos casos alcanzar las velocidades características



necesarias para depositar los satélites en sus órbitas; es decir, aproximadamente los 8 km/s.

Sin embargo, no olvidemos la conveniencia de conseguir estas velocidades de eyección cada vez mayores con el fin de poder disminuir estas relaciones de masa y conseguir que la masa final del satélite sea lo más elevada posible con respecto a la masa del cohete portador y poder así albergar en su interior la mayor cantidad posible de material instrumental y equipos e incluir incluso astronautas.

El proceso de lanzamiento de un satélite por medio de un cohete de tres cuerpos, consiste en un ascenso vertical a velocidad creciente, seguido inmediatamente de una inclinación progresiva de forma que al agotarse el primer cuerpo del combustible, y desprenderse éste a una altura de unos 100 km, el cohete haya adquirido ya una inclinación aproximada de unos 60°, para lo que debe ser teledirigido desde la tierra. A la segunda etapa le corresponde imprimir velocidad al aparato. Una vez que esta segunda etapa ha agotado también su combustible y cae al suelo, se habrán alcanzado aproximadamente 250 km de altura y alcanzado una velocidad de unos 4 km/s., dejándose entonces avanzar al cohete según una trayectoria puramente balística con el fin de que se incline cada vez más aproximándose a una trayectoria horizontal.

La tercera etapa tiene por finalidad aumentar la velocidad hasta conseguir la velocidad característica necesaria para la órbita (aproximadamente los 8 km/s. y lanzar el satélite acompañando al verdadero satélite en su movimiento, o bien cayendo sobre la superficie terrestre.

## LOS PROGRESOS DE LA ASTRONAUTICA

La astronáutica no puede ser considerada como una ciencia independiente; sus progresos están íntimamente relacionados con el progreso de otras ciencias: la metalúrgia, la química, la electrónica, etc. Así, el desarrollo de la metalúrgia permitirá disponer de metales y aleaciones de mayor resistencia y menor densidad, problema éste importantísimo en la construcción del cuerpo del cohete. Por otra parte la necesidad de que los dispositivos electrónicos utilizados sean lo más precisos posibles y tengan el menor peso posible exige también un gran desarrollo de esta ciencia. La relación entre la velocidad del cohete y los combustibles utilizados ya ha sido estudiada, pero con los mejores combustibles, hemos visto

que estas velocidades de eyección alcanzaban velocidades del orden de los 5 ó 6 km/s. Con respecto a este particular hacemos referencia a las prometedoras esperanzas que en este sentido ofrece la energía nuclear con la que podrían crear velocidades de eyección fabulosas con el inconveniente, sin embargo, del paso de los reactores, provocado principalmente por las necesarias corazas protectoras de los neutrones perdidos y de las partículas radioactivas desprendidas en toda reacción nuclear.

En resumen, el desarrollo de la astronáutica mide y acelera el progreso científico e industrial, y es en este sentido como resulta totalmente justificado el que el hombre se lance a esa gran quimera que significa la conquista del espacio.

## **Se anuncia un trascendental descubrimiento científico que afecta a la antimateria**

**Podría repercutir en la teoría de Einstein**

UNA revista científica de Nueva York informa acerca de un descubrimiento que puede hacer tambalearse los fundamentos de la física moderna. Se trata de las acciones de ciertas partículas atómicas las cuales hasta ahora eran consideradas idénticas entre sí.

El descubrimiento se refiere a la interacción electromagnética del núcleo de los átomos que controlan todas las reacciones eléctricas, magnéticas, atómicas y químicas.

Básicamente, el descubrimiento hace desmoronarse una de las leyes fundamentales de la física, según la cual las partículas atómicas opuestas, con excepción de las que poseen cargas eléctricas contrarias, tienen una conducta totalmente simétrica.

Aunque no pueden conocerse de momento las consecuencias prácticas que puede acarrear este descubrimiento, es posible que tenga efectos sobre la teoría de la relatividad de Einstein.

El informe ha aparecido en la revista "Letters", publicada por la Sociedad de Física Norteamericana. Se refiere a los experimentos llevados a cabo por el doctor Paolo Franzini, de treinta y cinco años, de la Universidad de Columbia, y por su esposa, Juliet Lee-Franzini, en el reactor nuclear gigante del laboratorio de Brookhaven, cerca de Nueva York. Su descubrimiento coincide con el realizado por otros dos equipos norteamericanos científicos.

Los tres equipos, de forma independiente, han descubierto que las partículas positivas que se escinden del mesón "Eta" neutro tienen por término medio una energía del 5 al 9 por 100 superior a la de sus correlativas partículas negativas. Una implicación inmediata de este descubrimiento se encuentra en el extraño mundo de la antimateria. Las partículas de la antimateria, descubiertas la pasada década y que corresponden a cada partícula de materia, no son, de acuerdo con el nuevo descubrimiento, como se pensaba la imagen idéntica de la materia.

Según algunos físicos, existe en alguna parte un universo entero hecho de antimateria. Otras teorías afirman que existen mundos de antimateria en las distancias infinitas del universo físico. Por consiguiente, puede decirse que también existirá el "antihombre". El problema se encuentra en que la materia y la antimateria no son compatibles y que se aniquilarían mutuamente en una inconmensurable explosión de energía si se juntaran alguna vez.