

Física de vuelos espaciales

José Fernando Isaza Delgado | Diógenes Campos Romero

José Fernando Isaza Delgado

Ingeniero eléctrico de la Universidad Nacional de Colombia, con maestría en Matemáticas de la Universidad de Strasbourg y maestría en Física Universidad Nacional de Colombia.

Doctor Honoris Causa de la Universidad de Caldas y doctor Honoris Causa de la Universidad Nacional de Colombia. Ha sido profesor de la Universidad Nacional de Colombia, de la Universidad de los Andes, de la Escuela de Ingeniería Julio Garavito y de la Universidad Central en las áreas de matemáticas, física, vuelos espaciales y física de la ciencia ficción. También ha sido autor y coautor de libros en las áreas de energía, cambio climático, gravitación, ecología y sistemas dinámicos.

Fue miembro del grupo de investigación de las Naciones Unidas, Gobierno de Canadá, en energía en países en vías de desarrollo (1983-1985), así como miembro del grupo Misión de Sabios Colombia 2020, en el área de energías renovables. Es miembro honorario de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Ha sido Miembro del Consejo Superior de la Universidad Nacional de Colombia y Rector de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano; actualmente, forma parte de su Consejo Directivo.

Física de vuelos espaciales

José Fernando Isaza Delgado
Diógenes Campos Romero

Isaza Delgado, José Fernando, 1946-

Física de los vuelos espaciales / José Fernando Isaza Delgado, Diógenes Campos Romero, 1946-. -
Bogotá: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2021.

264 páginas : ilustraciones, figuras, gráficas, fórmulas, tablas ; 24 cm.

ISBN 978-958-725-296-5

1. Viajes interplanetarios. 2. Dédalo (Mitología griega). 3. Física - Teorías. 4. Leyes de Kepler. 5.
Astronáutica. 6. Vuelo espacial a Marte. I. Campos Romero, Diógenes, autor. II. Tít.

CDD 629.41

Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano

Carrera 4 N° 22-61 - PBX 2427030 - www.utadeo.edu.co

© José Fernando Isaza Delgado, Diógenes Campos Romero

© Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano

Carlos Sánchez Gaitán

RECTOR

Andrés Franco Herrera

VICERRECTOR ACADÉMICO

Liliana Álvarez Revelo

VICERRECTORA ADMINISTRATIVA

Marco Giraldo Barreto

JEFE DE PUBLICACIONES

ISBN impreso: 978-958-725-296-5

ISBN epub: 978-958-725-298-9

ISBN digital: 978-958-725-297-2

DOI: <https://doi.org/10.21789/9789587252965>

EQUIPO EDITORIAL

Marco Giraldo Barreto

JEFE DE PUBLICACIONES

Luis Carlos Celis Calderón

COORDINACIÓN GRÁFICA Y DISEÑO

Mary Lidia Molina Bernal

COORDINACIÓN EDITORIAL

Juan Carlos García

COORDINACIÓN REVISTAS

Sandra Guzmán

DISTRIBUCIÓN Y VENTAS

María Teresa Murcia

ASISTENTE ADMINISTRATIVA

EDICIÓN

Marco Giraldo Barreto

Leonardo Andrés Paipilla Pardo

CORRECCIÓN DE ESTILO

Federico Guerrero Isaza

Martina Guerrero Isaza

ILUSTRACIÓN DE CUBIERTA

Luis Carlos Celis Calderón

DISEÑO PORTADA

Diógenes Campos Romero

DIAGRAMACIÓN

Diógenes Campos Romero

Marco Giraldo Barreto

REVISIÓN EDITORIAL

Imagerinting Ltda.

IMPRESIÓN

En nombre de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Editorial Utadeo le agradece a usted, el lector de esta obra, por apoyar la labor de todas las personas que hacen posible este trabajo al adquirir este libro de manera legal. Asimismo, le agradecemos el interés por el conocimiento que producen nuestros investigadores y el apoyo para que este saber tenga mayor alcance.

Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano | Vigilada Mineducación.

Reconocimiento de personería jurídica: Resolución No. 2613 de 14 de agosto de 1959, Minjusticia.

Acreditación institucional de alta calidad, 6 años: Resolución 4624 del 21 de marzo de 2018, Mineducación.

Impreso en Colombia - Printed in Colombia © Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin autorización de la universidad.

*Dedico este trabajo a mis nietos.
Anita, Emilio, Federico y
Martina; me acompañaron en las
visitas a museos aeroespaciales y
con buen criterio me aconsejaron
qué juguetes comprar para
comprender mejor los conceptos
de cohetería.*

José Fernando Isaza Delgado

*La idea de estas notas de clase
surgió durante los seminarios que
dicté sobre física y matemática de
los vuelos espaciales.*

José Fernando Isaza Delgado

Índice general

1. Introducción	17
1.1. De la pólvora al cohete	17
1.2. El mito de Dédalo	21
1.3. De Herón a Julio Verne	24
1.4. Los pioneros de los vuelos espaciales	28
Referencias	32
2. El cohete modelo y la ecuación de Tsiolkovsky	35
2.1. Principio del movimiento de un cohete	35
2.2. Principio de la turbina de un avión a reacción	39
2.3. El cohete modelo	40
2.4. Ecuación del cohete	44
2.5. Ecuación de Tsiolkovsky	49
2.5.1. Relaciones útiles	53
2.6. El combustible de los cohetes	54
2.7. Movimiento vertical de un cohete	63
2.8. Altitud y dinámica del cohete	72
2.8.1. Cambio gravitacional con la altitud	72
2.8.2. Cambio de la densidad atmosférica con la altitud	74
2.8.3. Efectos de la altitud sobre la ecuación demovimiento del cohete	75
2.9. Velocidad de escape	78
2.10. Modelo para el consumo de combustible	83
2.11. El Saturno V en trayectoria vertical	93
2.11.1. Influencia de la altitud en la dinámica del cohete	98
Referencias	103
3. El reingreso de una nave a la atmósfera	105
3.1. Reingreso de una nave a la Tierra	105
3.2. El regreso a la Tierra	107
3.2.1. Sistema de coordenadas polares	109
3.2.2. Fuerzas expresadas en coordenadas polares	112
3.3. El proceso de reentrada a la atmósfera	115
Referencias	119

4. Movimiento de satélites y planetas	121
4.1. Particularidades del sistema solar	121
4.2. Sistema Sol-planeta, movimiento bajo una fuerza central	124
4.2.1. Conservación del momento angular	126
4.2.2. Ecuación de movimiento de un planeta	128
4.2.3. Segunda ley de Kepler	130
4.2.4. Órbita elíptica	131
4.2.5. Primera ley de Kepler	134
4.2.6. Tercera ley de Kepler	140
4.3. Energía, velocidad y momento angular en órbitas elípticas	142
4.4. Tiempo de vuelo en una órbita elíptica	144
4.5. Anomalía y anomalía promedio	149
4.6. Ecuación vis-viva	151
4.6.1. Longitud de arco en una elipse	153
4.7. Anotaciones sobre los satélites artificiales	157
4.7.1. Satélite geoestacionario	161
4.7.2. Ejemplo: velocidad de escape	163
4.8. Órbitas hiperbólicas	164
4.8.1. El paso de una órbita elíptica a una hiperbólica	168
4.9. Transferencia de Hohmann	169
4.10. Ley de Titius-Bode	173
4.11. Esfera de influencia gravitacional	175
4.12. Sistema de n partículas	177
4.13. Sistema: Sol, planeta, nave espacial	180
4.13.1. Atracción gravitacional del Sol y del planeta sobre el satélite	184
Referencias	189
5. Viaje de la Tierra a Marte	191
5.1. Elementos históricos	191
5.2. Viaje tripulado a Marte	195
5.3. Órbita de transferencia de la Tierra a Marte	196

5.4. Estimación del tiempo de viaje Tierra-Marte	200
5.4.1. Posición relativa de los planetas para el lanzamiento	203
5.4.2. El regreso a la Tierra desde Marte	205
5.4.3. Período sinódico	207
5.5. Cálculo de la velocidad inicial de la nave	211
5.5.1. Velocidad inicial en la órbita de Hohmann	212
5.5.2. Trayectoria hiperbólica rumbo a Marte	213
5.5.3. Nave en la esfera de influencia de Marte	214
5.5.4. Estimativo del combustible para un viaje de ida	215
5.5.5. Estadía en Marte	218
5.5.6. Tiempo mínimo de espera	219
5.6. Órbita de menor tiempo, no Hohmann	222
5.6.1. Velocidad inicial +0 del cohete	225
5.6.2. Velocidad del cohete a la salida de la superficie terrestre	226
5.6.3. Velocidad al interceptar la órbita de Marte	227
5.6.4. Combustible para bajar a la superficie de Marte	228
5.6.5. Combustible necesario	229
5.7. Ecuación de Kepler y órbitas no Hohmann	231
5.7.1. Parámetros de la elipse interplanetaria	232
5.7.2. Anomalía excéntrica (elipse)	234
5.8. Ciencia ficción	240
5.9. Misiles intercontinentales	243
5.9.1. Tiempo de vuelo	248
5.10. Gravedad en una estación espacial	249
5.10.1. Efecto de la velocidad de la Tierra	252
Referencias	253

Índice alfabético	255
--------------------------	------------

Prefacio

La era espacial inició a mediados del siglo XX, cuando la ahora extinta Unión Soviética lanzó el Sputnik 1 el 4 de octubre de 1957, el cual se convirtió en el primer satélite artificial de la historia. Los Estados Unidos, por su parte, lanzaron con éxito el Explorer 1 el 31 de enero de 1958. Estos dos eventos constituyen el inicio de la carrera espacial entre las dos superpotencias de la Guerra Fría, que concluyó con la caída del muro de Berlín en 1989. La misión Apolo-Soyuz, lanzada el 15 de julio de 1975, constituye la primera misión conjunta entre los antiguos rivales (EE.UU. - URSS) para dar paso a la participación de varios países en la conquista del espacio.

Este libro introduce al lector en ideas que están en la base de los avances científicos y tecnológicos y que se desarrollaron en las décadas pasadas, desde 1957, sin desconocer el conocimiento ya distante de las leyes de Kepler, la fuerza de gravitación de Newton o las ideas de los pioneros de la conquista del espacio. Hoy en día, la humanidad dispone de sistemas GPS, sondas que han visitado varios planetas, asteroides y cometas; algunas han regresado a

la Tierra con muestras de material espacial, otros se encuentran viajando por el espacio interestelar.

Los siguientes comentarios preliminares buscan facilitar la lectura del documento:

1. Las referencias se citan en cada capítulo usando un paréntesis cuadrado y un número [#] (por ejemplo [5]), y el conjunto se incluye al final de cada capítulo.
2. Por convención usamos el punto (.) como separador decimal y un espacio en blanco para separar la parte entera en millares, si ésta tiene cinco o más dígitos. Esta preferencia se debe a que buena parte de los cálculos realizados se hicieron en Wolfram-Mathematica, aplicación que utiliza el punto como separador decimal.

Agradecimiento a Marco Giraldo Barreto, editor de publicaciones de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, por su valiosa e integral contribución a la realización de este trabajo, al igual que a Leonardo Andrés Paipilla Pardo por las correcciones de estilo realizadas en algunos capítulos.

Los autores

Bogotá D.C., abril de 2021

Introducción

Se esbozan elementos históricos sobre el origen de los cohetes, la importancia que tuvo el descubrimiento de la pólvora, el papel de la ciencia ficción en el interés de los pioneros de la cohetería.

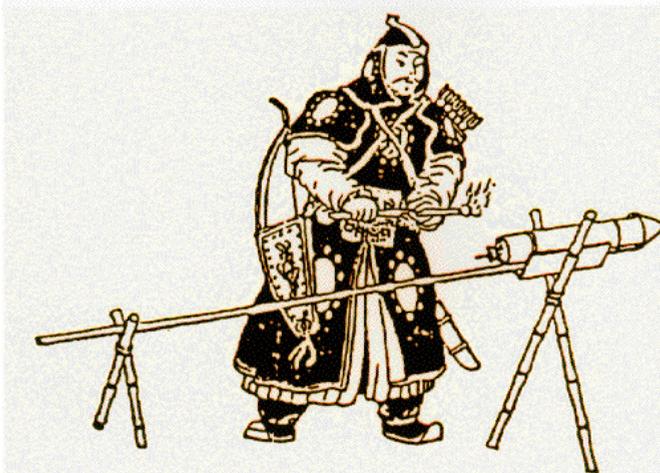
1.1. De la pólvora al cohete

En el siglo XVI, Francis Bacon (1561-1626), Jean Fernal (1497-1558) y Jerome Cardano (1501-1576) hicieron referencia a tres grandes invenciones provenientes de la China [1, 2]: la brújula, el arte de la impresión y la pólvora.

Muy probablemente, la pólvora se descubrió en China accidentalmente, cuando los alquimistas chinos intentaron producir oro o preparar un elixir para la inmortalidad, prácticas cuya iniciación se ubica en la dinastía Han (202 a.C. - 220 d.C.). En algún momento se descubrió una sustancia altamente inflamable formada por una mezcla de carbón (C_7H_4O), azufre (S) y salitre (nitrate de potasio, KNO_3) conocida como *polvo negro*, una sustancia precursora de la pólvora o una forma débil de ésta.

La pólvora encontró aplicaciones en China como elemento de diversión en funciones religiosas o ceremoniales y en obras como la construcción de canales. Los registros conocidos muestran que la pólvora no se usó en el campo de batalla antes del siglo X, y a mediados del mismo se inventó la *lanza de fuego*, la cual consistía en un tubo de bambú con pólvora en el interior, capaz de lanzar llamas y que se utilizó como arma en los campos de batalla. Para el mismo momento se inventaron en China los fuegos artificiales con el fin de espantar los espíritus malignos.

El tubo de bambú se cerraba por un extremo para crear una cámara, mientras que el otro extremo se dejaba parcialmente abierto para permitir que los gases generados por la combustión escaparan e



http://space.about.com/od/spaceexplorationhistory/ss/rockethistory1_3.htm

Figura 1.1. El polvo negro permitió a los chinos la construcción de los primeros cohetes (imagen de dominio público).

impulsaran el dispositivo hacia adelante. Así, los primeros cohetes tienen origen posiblemente en la lanza de fuego, cuando los chinos descubrieron que los tubos de bambú llenos de pólvora podían impulsarse por los gases que escapaban.

De esta manera, la invención del polvo negro dio inicio al desarrollo de los cohetes [4], invento cuyo origen se ubica con buena probabilidad en el período de la dinastía Sung (960-1279 d.C.). Los cohetes de ese entonces requerían pólvora con una composición de al menos un 70% de salitre, un 20% de carbón y un 10% de azufre; la estabilidad se regulaba atando al tubo de bambú

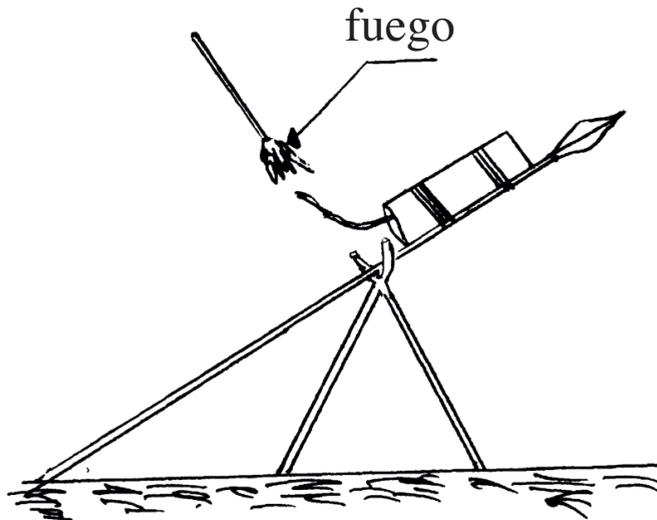


Figura 1.2. Lanza de fuego voladora usada por las tropas chinas contra los mongoles en la batalla de Kai Feng Fu en 1232 (adaptada de [3]).

una varilla ligera y los cohetes se lanzaban empleando arcos o dispositivos como los que se muestran en las figuras 1.1 y 1.2.

Es interesante anotar que en un trabajo de Chou Mi (1232-1298) se describe una especie de cohete primitivo denominado “ratón de tierra”, que se presentó a comienzos del siglo XIII a la Emperatriz madre, quien reaccionó con susto al verlo serpentear salvajemente en el piso y desplazarse bajo la silla [3]. El primer uso de los cohetes en la guerra se registra para el año 1232, cuando los chinos repelieron la invasión de los mongoles empleando las lanzas de fuego en la batalla de Kai-Keng. Después de esta batalla los mongoles desarrollaron sus propios cohetes y pudieron ser los responsables de la difusión de esta tecnología hacia Europa [5].

La referencia más antigua a la fórmula química de la pólvora se encuentra en la obra *Wu-Ching Tsung-Yao* ([6], “Colección de las más importantes técnicas militares”), publicada en el año 1044, escrita por Tseng Kung-lian (998-1078) y Ting Tu (990-1053) por mandato del Emperador Renzong (1022-1063) de la dinastía Sung. En esa obra se describen nueve clases de armas y tres recetas antiguas para la producción de pólvora [3]. En Occidente, la primera mención a la pólvora se encuentra en el libro *Sobre el uso del fuego para conflagrar a los enemigos* (en el original, *Liber Ignium ad Comburendos Hostes*), un trabajo escrito en latín, compilado en el siglo XIV, que en unas 18 páginas describe 34 recetas con diferentes propósitos; la copia más antigua existente data del año 1300 y se encuentra en el Vaticano [7]. Originalmente, esta obra

se atribuyó a Marcus Graecus (posiblemente un pseudónimo), pero análisis posteriores sugieren que fue escrita por un árabe o un habitante de la región arábiga [3].

De la breve historia anterior se desprenden elementos importantes para la tecnología de los cohetes:

1. El *combustible* empleado, en el que la preexistencia del polvo negro y la pólvora fue fundamental para dar origen a los cohetes;
2. El *propósito del cohete*, que en su origen se orientó hacia la diversión y hacia la guerra;
3. El *diseño del cohete*, en el que el sistema de propulsión desempeña un papel fundamental para poder cumplir con el propósito elegido;
4. La *estabilización* de la trayectoria, para que el dispositivo permita la realización del propósito que se ha definido.

1.2. El mito de Dédalo

Cuenta la leyenda que Dédalo (“Daedalus”) fue un ingeniero, arquitecto e inventor que nació en Atenas hace unos 4000 años, en la Edad de Bronce; viajó a Creta a trabajar en la corte del rey Minos y de la reina Pasiphae. Poseidón hizo emerger de los mares un hermoso toro blanco (el Toro de Creta) con la promesa del rey de que lo sacrificaría en honor de la deidad. Al incumplir el

rey su promesa, Poseidón, en un acto de venganza hizo que la reina sintiera una pasión incontrolable por el toro, para dar a luz al Minotauro (toro de Minos), una criatura mitad hombre, mitad toro. Por encargo del rey Dédalo diseño y construyó entonces un laberinto para confinar a tal criatura [8, 9].

Para evitar que se difundiera entre el público la noticia de la existencia del laberinto, el Rey Minos, quien controlaba a Creta por tierra y agua, confinó a Dédalo en una torre. Al sentirse prisionero, Dédalo fabricó dos pares de alas, un par para él y otro para su hijo Ícaro, con el fin de escapar volando. Según la leyenda, la cera de velas se usó para pegar las plumas a los marcos metálicos livianos; Ícaro desobedeció las instrucciones de su padre de no acercarse al Sol, que desintegró sus alas, y por ello cayó al mar y se ahogó. Los griegos no sabían que, al elevarse al Sol, la temperatura de la atmósfera desciende y, por lo tanto, la cera de las alas no se derretiría. Según la leyenda, la cera de velas se usó para pegar las plumas a los marcos metálicos livianos.

Ficción o realidad, la fábula muestra que la idea de conquistar el aire e imitar las aves para poder volar existe desde la antigüedad. Ícaro es así el primer astronauta que fallece en un viaje espacial.

El *proyecto Dédalo* se bautiza en honor al personaje de la leyenda. Entre 1973 y 1978, un grupo de científicos de la Sociedad Interplanetaria Británica, dirigidos por Alan Bond, realizó uno de los primeros estudios detallados sobre los requerimientos para un vehículo interestelar [5, pág. 96]. Se demostró que el viaje a

las estrellas es una posibilidad práctica viable con vehículos no tripulados de alta velocidad. Se adoptaron ciertas directrices: el vehículo debe usar las tecnologías actuales y del futuro cercano, ser capaz de alcanzar su destino dentro de la duración de una vida humana, y su diseño ser flexible para poderse enviarse a diferentes estrellas. Estas directrices garantizan que las personas vinculadas al proyecto alcancen a vivir para ver sus resultados y que diferentes estrellas puedan investigarse usando el mismo tipo de vehículo.

En el proyecto Dédalo se seleccionó como objetivo la estrella de Barnard, una enana roja situada en la constelación *Ophiuchus*, a 5.9 años luz de la Tierra, y que posiblemente tiene al menos un planeta.

Para alcanzar esa estrella en 50 años se necesitaría viajar al 12 % de la velocidad de la luz, unos 36 000 km/s. Cohetes con combustible químico no son viables para cumplir este objetivo, por lo que se requerirían cohetes con impulsión nuclear.

Conclusiones:

1. La imaginación es una fuente de transformación de la realidad. Lo que era imaginable en la época de Dédalo no era viable en la realidad.
2. Hoy en día la realidad ha superado el mito: los medios de transporte aéreo permiten el desplazamiento simultáneo de cientos de personas, el hombre ha llegado a la Luna y ha avanzado en la

aventura espacial que comenzó con Yuri Gagarín el 12 de abril de 1961.

1.3. De Herón a Julio Verne

Herón de Alejandría (10 - 70 a.C) fue un matemático e ingeniero griego que se distinguió por ser un gran inventor, y a quien se le considera como el experimentador más grande de la antigüedad y padre de la física [10]. Su invención más famosa es la pila eólica (*aeolipile*), la cual se muestra en la figura 1.3. En la mitología clásica, Eolo es el dios de los vientos y *eólico* significa perteneciente o relativo al viento.

La pila eólica es el primer dispositivo conocido que genera un movimiento giratorio mediante vapor. Consta de un recipiente de agua con una fuente de calor colocada debajo, con tubos de cobre que se extienden hacia arriba y sirven como un pivote para una esfera rotante. Al exterior de la esfera se ubican dos boquillas creadas con el doblado de un tubo, de tal manera que fuera de la superficie de la esfera se forma una especie de L. El vapor de agua ingresa a la esfera por la tubería de cobre y escapa a través de las boquillas, haciendo que la esfera gire sobre su eje (en razón de la ley de acción-reacción de Newton). Este dispositivo es un antecesor del sistema de propulsión de los cohetes.

gigantesco, instalado en un hueco profundo de la Tierra, dispara hacia la Luna una bala de gran tamaño en cuyo interior van los viajeros; la bala se desplaza a una velocidad de 10 kilómetros por segundo, con un tiempo de vuelo estimado en 97 horas y 20 minutos. La bala orbita la Luna y la tripulación, después de encontrar la forma para regresar, se devuelve a la Tierra y cae en el océano Pacífico. Por su lado, obras de H. G. Wells, como *La guerra de los mundos* (1898) y *Los primeros hombres en la Luna*



Figura 1.4 Carátula de un libro de Julio Verne: *De la Tierra a la Luna*, 1865.

(1901) estimulan la imaginación de los lectores sobre la posible existencia de selenitas y civilizaciones extraterrestres.

La primera película que se rodó en un estudio cinematográfico fue *Viaje a la Luna*, dirigida por George Méliès en 1902, quien se inspiró en las novelas de Verne y Wells. Méliès fue mago por lo que se tomó más libertades narrativas que Verne, quien tenía conocimientos de física. En su película, Méliès hace lanzar la tripulación sin dotarla de trajes espaciales y sin suministro de oxígeno; el retorno a la Tierra es maravilloso, como la Tierra está abajo de la Luna, acerca la tripulación a una especie de precipicio y se precipitan al planeta, cayendo en el mar.

El 2 de enero de 1959 se lanzó la primera sonda espacial hacia la Luna, el vehículo soviético automatizado *Luna I* [12]. Por un error de programación, el vehículo no impactó la Luna pero, después de treinta y cuatro horas de vuelo, alcanzó su aproximación más cercana a la superficie lunar el 4 de enero de 1959, a una distancia de 5885 kilómetros. En 1969, tuvo lugar la misión *Apollo 11*, primera misión tripulada (Neil Armstrong, Buzz Aldrin y Michael Collins), que llega a la superficie lunar después de tres días, tres horas y cuarenta y nueve minutos de vuelo [13]. El 20 de julio de 1969, Neil Armstrong y Buzz Aldrin hicieron historia al dar los primeros pasos de un ser humano en otro cuerpo planetario.

De lo anterior se concluye:

1. La imaginación, la capacidad de invención del ser humano y su deseo de conquistar el espacio han permitido pasar de la ciencia ficción a la realidad.
2. Unos cien años después de la obra de Julio Verne se inició la conquista del espacio exterior con el envío de la sonda *Luna 1* y de la misión *Apollo 11*.

1.4. Los pioneros de los vuelos espaciales

La coherencia para los vuelos espaciales fue estimulada principalmente por los trabajos de Konstantin E. Tsiolkovsky (1857-1935) en Rusia, Robert Hutchings Goddard (1882-1945) en los Estados Unidos, y Hermann Oberth (1894-1989) y Wernher Von Braun (1912-1977) en Alemania. Estos personajes, que son los pioneros de los vuelos espaciales, recibieron la influencia positiva de las obras de ciencia ficción de Julio Verne y de H. G. Wells, las cuales estimularon en ellos el interés por la ciencia y los viajes al espacio. Todos se impusieron el reto de convertir la ficción en realidad.

El científico ruso K. E. Tsiolkovsky formuló los fundamentos matemáticos de la astronáutica y es por ello el padre de la cosmonáutica teórica. Los primeros pensamientos sobre la dinámica de los cohetes los consignó en su diario en los primeros meses de 1883, y en los años subsiguientes escribió historias de ciencia ficción [14]: *En la Luna*, publicada en 1893; *Sueños de la Tierra*

y *el cielo y efectos de la atracción universal*, publicada en 1895; *Fuera de la Tierra*, de 1918, obras en las que utilizó por primera vez el concepto de *satélite artificial de la Tierra* con una velocidad orbital estimada en 8 km/s, y describió dispositivos técnicos usados en vehículos espaciales, los sentimientos de los primeros conquistadores del espacio y las condiciones para la existencia en un medio ambiente de microgravedad. En 1903, publicó la primera parte de un estudio que había comenzado en 1898 y que dio lugar al artículo *Estudio del espacio global por dispositivos de propulsión a chorro*, pero la trágica muerte del editor implicó la terminación de la revista y la no publicación de la segunda parte del artículo. La versión completa del artículo sólo se publicó en 1926. Su trabajo dió origen a la ecuación del cohete o fórmula de Tsiolkovsky, que aún hoy en día es la base de la dinámica de los cohetes: establece relaciones precisas entre la masa del cohete y su propulsor, la velocidad del gas a la salida y la velocidad del cohete.

Robert Hutchings Goddard es el pionero americano de los viajes espaciales e inventor del primer cohete de combustible líquido. Cuenta la historia que, además de la influencia de las obras de ciencia ficción de Verne y Wells, su vocación surgió cuando el 19 de octubre de 1899 subió a un árbol de cerezo, se dejó llevar por la imaginación y creó en su mente una nave espacial que pudiera viajar a Marte [15]; tiempo después, mencionó que cuando bajó del árbol él era un “chico diferente”. La vida de Goddard sufrió la influencia de las dos guerras mundiales: ya en 1918 había

inventado un cohete que se podía disparar desde una trinchera y poner una carga “útil” a unos 1100 metros de distancia. En 1919, publicó la monografía *Un método para alcanzar altitudes extremas* [16], documento clásico de la literatura del siglo XX sobre cohetes. En la búsqueda de métodos para enviar aparatos de grabación a grandes alturas (superiores a unos 30 kilómetros), formula el problema de determinar la masa inicial mínima de un cohete ideal que es necesaria para poner una masa final de una libra en la altura deseada, teniendo en cuenta la pérdida continua de masa del cohete.

El estudiante de secundaria Hermann Oberth [17], a la edad de 12 años, después de leer de manera cuidadosa la obra, concluyó que el viaje a la Luna como lo describía Verne no era posible. Investigó durante quince años, buscando encontrar un método viable para viajar a la Luna y consignó sus resultados en 1923 en el trabajo [18] *Die Rakete zu den Planetenräumen* (Cohetes al espacio interplanetario), contribución sobre el diseño de cohetes que la Universidad de Heidelberg no había aceptado un año antes como trabajo de doctorado. En 1929, se publica una versión ampliada, bajo el título *Wege zur Raumschiffahrt* (Caminos a los viajes espaciales), en el cual consignó diversas ideas que fueron la base del programa de misiles de Alemania en la Segunda Guerra Mundial y de los programas espaciales americano y soviético, no tripulados y tripulados. Estas ideas incluyen la teoría de que un cohete de combustible líquido puede impulsar un objeto a través del espacio vacío, carente de aire, y que el vehículo puede desa-

rrollar velocidad y fuerza centrífuga suficientemente grandes para contrarrestar la gravedad de la Tierra y permanecer en órbita alrededor del planeta. También teorizó que el vehículo puede moverse lo suficientemente rápido para vencer la gravedad de la Tierra y moverse en el espacio interplanetario.

Wernher von Braun (1912-1977) recibió el estímulo de las obras de ciencia ficción de Julio Verne y H. H. Wells, y de los trabajos científicos de Hermann Oberth. En especial, el estudio clásico de 1923 [19, 20] *Die Rakete zu den Planetenräumen* (Cohetes al espacio interplanetario) lo convenció de dedicar su vida a la ciencia y tecnología de los vuelos espaciales. En 1930, durante sus estudios en la Universidad Técnica de Berlín, organizó con sus amigos el club denominado *Verein für Raumschiffahrt* (Sociedad para los vuelos espaciales). Se doctoró en física en 1934 y desde 1936 recibió el apoyo de Adolf Hitler para desarrollar el programa de cohetería, que avanzó hasta producir cohetes militares balísticos de largo alcance. En 1945, se rinde a los americanos y él y 118 ingenieros firman un contrato con el ejército de los Estados Unidos para mejorar los cohetes V2. En 1955, se convierte en ciudadano americano y en la década de 1960 el cohete Saturno V se emplea para llevar la nave espacial Apolo a la Luna.

El breve resumen sobre los pioneros de la cohetería muestra lo siguiente:

1. Una marcada influencia de las obras de ciencia ficción para despertar en ellos la curiosidad y el interés por la ciencia.
2. La voluntad de hacer contribuciones al conocimiento para superar la ciencia ficción y transformarla en realidad.

Referencias

- [1] Ho Peng Yoke. *Science in China*, pages 1944–1950. Springer, 2008. https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-1-4020-4425-0_9111.
- [2] Ho Peng Yoke. *Gunpowder*, pages 1039–1041. Springer, 2008. https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-1-4020-4425-0_9774.
- [3] Joxing Pan. On the origin of rockets. *T'oung Pao*, 73(1/3): 2–15, 1987. <http://www.jstor.org/stable/4528370>.
- [4] Winter F. H., Neufeld M. J., and Dougherty K. Was the rocket invented or accidentally discovered? Some new observations on its origins. *Acta Astronautica*, pages 131 – 137, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.03.014>.
- [5] Darling D. *The Complete Book of Spaceflight: From Apollo 1 to Zero Gravity*. John Wiley & Sons, 2003.

- [6] Wujin Zongyao (Collection of the Most Important Military Techniques), 2014. <http://goo.gl/UvN220>.
- [7] Ulrich Bretscher. Black powder, 2014. <http://woodsruntersdiary.blogspot.com/2017/11/ulrich-bretschers-black-powder-page.html>.
- [8] Pérez-Gómez A. The Myth of Daedalus. *Architectural Association School of Architecture*, (10):49–52, 1985. <http://www.jstor.org/stable/29543473>.
- [9] Thompson M. Daedalus, 2014. <http://www.pantheon.org/articles/d/daedalus.html>.
- [10] Shuttleworth M. Heron's inventions. <https://explorable.com/heron-inventions>.
- [11] Verne J. *From the Earth to the Moon; and, Round the Moon*. Project Gutenberg, 1865. <http://gutenberg.org/ebooks/83>.
- [12] National Space Science, Data Center. <http://www.lpi.usra.edu/lunar/missions/luna/>.
- [13] Smithsonian National Air and Space Museum. The Apollo Program. <http://goo.gl/8aqXuk>.
- [14] Maksimov A. I. Founder of cosmonautics. *Thermophysics and Aeromechanics*, 14(3):317–328, 2007. <http://dx.doi.org/10.1134/S0869864307030018>.
- [15] Clary D. A. *Rocket Man: Robbert H. Goddard and the Birth of the Space Age*. Hachette Books, 2003.
- [16] Goddard R. H. A method for reaching extreme altitudes. In *Smithsonian Miscellaneous Collections*, volume 71, pa-

- ges 1–69,. Smithsonian Institution, 1919. <http://goo.gl/yQvrFy>.
- [17] Christensen E. Hermann Oberth. *Salem Press Biographical Encyclopedia*, 2013. article 8880174220130101.
- [18] Oberth H. Die rakete zu den planetenräumen (cohetes al espacio interplanetario). <http://goo.gl/0M6FjV>.
- [19] Reynolds C. G. Wernher von Braun. *Salem Press Biographical Encyclopedia*, 2013. article 8912993020130101.
- [20] Bellis M. The V2 Rockets of Wernher von Braun. ThoughtCo, 2020. <https://www.thoughtco.com/wernher-von-braun-v-2-rocket-4070822>.

El cohete modelo y la ecuación de Tsiolkovsky

Se describen los principios físicos que gobiernan la dinámica de los cohetes, aspectos referentes a los combustibles, el efecto que tiene en la dinámica del cohete el cambio gravitacional con la altitud y conceptos básicos para entender su funcionamiento. En razón a su importancia histórica se finaliza el capítulo con el ejemplo del cohete Saturno V que permitió en 1969 llevar la astronave Apolo XI a la Luna.

2.1. Principio del movimiento de un cohete

La ley física que explica el movimiento de un cohete es el principio de conservación del momento lineal, $\mathbf{p}(t) = m\mathbf{v}(t)$, donde m es la masa de la partícula que se mueve con velocidad $\mathbf{v}(t)$. El principio establece:

- a) Si no existen fuerzas internas, el momento lineal en el instante de tiempo t_0 es igual al momento en cualquier otro instante de tiempo t , es decir $\mathbf{p}(t_0) = \mathbf{p}(t)$.

- b) Si existen fuerzas externas $\mathbf{F}(t)$ aplicadas sobre la partícula, entonces el momento lineal inicial más el impulso de la fuerza $\mathbf{F}(t)$ es igual al momento lineal final,

$$p(t_0) + \underbrace{\int_{t_0}^t \mathbf{F}(t') dt'}_{\text{impulso de la fuerza } \mathbf{F}(t)} = p(t) \quad (2.1)$$

Ejemplo

Un vehículo de masa M se desplaza sobre una vía rectilínea, sin rozamiento, con velocidad \mathbf{V} . Un ocupante arroja un bulto de masa m , con velocidad \mathbf{u} relativa al vehículo. ¿Cuál es la velocidad final del vehículo?

Como se ilustra en la figura 2.1, el momento inicial es $p(t_0) = MV$. La velocidad del bulto con respecto a la Tierra (asumiendo que esta última es un sistema de referencia inercial) es $V + u$. Entonces si V' es la velocidad final del vehículo, se cumple

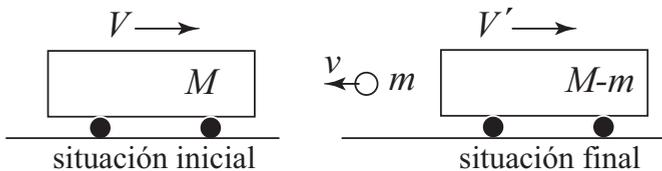


Figura 2.1: Diagrama para ilustrar la conservación del momento lineal.

$$MV = (M - m)V' + m(V + u). \quad (2.2)$$

Se deduce que el vehículo en la situación final se mueve con velocidad

$$V' = \frac{MV - m(V + u)}{M - m} = V - \frac{m}{M - m}u \quad (2.3)$$

Los siguientes casos resultan de esta expresión:

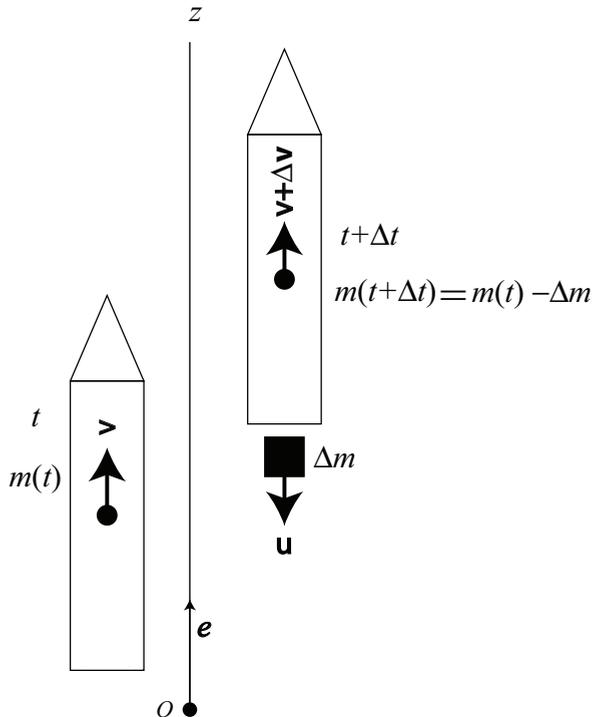


Figura 2.2. El movimiento de un cohete se explica por la conservación del momento lineal.

- i) Si la masa m se lanza en dirección contraria a $V > 0$, entonces $u < 0$ y, por lo tanto, $V' > V$. El vehículo recibe un impulso e incrementa su velocidad.
- ii) Si la masa m se lanza en la misma dirección de $V > 0$, entonces $u > 0$ y, por lo tanto, $V' < V$. El vehículo recibe un empujón en dirección contraria a su movimiento, disminuyendo su velocidad en consecuencia.

En el caso del cohete los gases se expulsan con velocidad u , cantidad que apunta en dirección contraria a la dirección en que avanza el cohete (figura 2.2).

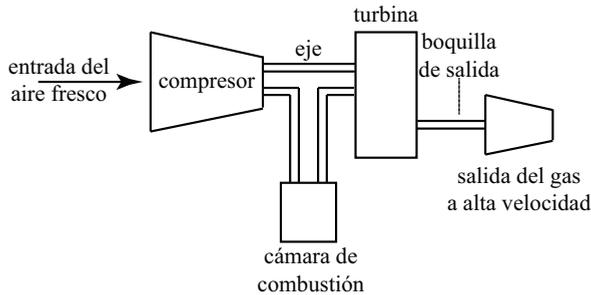


Figura 2.3: Esquema que ilustra el funcionamiento de una turbina de avión. Fuente complementaria: <https://caymansseo.com/turbina-de-avion-funcionamiento-tipos-y-partes>.

2.2. Principio de la turbina de un avión a reacción

Los motores a reacción y los cohetes funcionan con el mismo principio. Producen empuje a través de una diferencia de presión interna y expulsan los gases de escape en una dirección igual y opuesta, lo que se explica por la ley de acción-reacción de Newton. Mientras que los motores a reacción tienen una abertura de admisión y una tobera de escape, los cohetes solo tienen la tobera de escape, en ambos casos situada en la parte posterior por donde se expulsa el chorro de los gases de combustión que proporciona el empuje. La principal diferencia entre estos dos dispositivos consiste en que el motor de un avión (figura 2.3) utiliza el oxígeno del aire para mantener los motores funcionando, mientras que los cohetes deben llevar el combustible y una fuente de oxígeno para que los motores funcionen.

Denótese por \dot{m} la derivada de la masa $m(t)$ con respecto al tiempo t , es decir, $\dot{m} = dm(t)/dt$. Al requerir un elevado valor de $\dot{m}v$ pero ser baja la densidad del aire, el efecto de la compresión es el de aumentar significativamente la densidad y las boquillas hacen crecer la velocidad de salida. Cuando el avión inicia el carreteo, el papel del compresor además de enviar aire a alta presión a la turbina, es el de absorber aire atmosférico. Cuando el avión alcanza una velocidad apropiada, el aire entra al sistema de compresión y una porción pasa directamente a la boquilla de salida, lo cual aumenta la masa expulsada y crea un mayor empuje.

En un cohete la masa expulsada es solamente el combustible. Su operación se realiza en el espacio desprovisto de atmósfera y no hay posibilidad de emplear los gases atmosféricos para aumentar la masa expulsada. Esto explica por qué la gran parte de la masa del cohete está compuesta por el combustible.

2.3. El cohete modelo

La figura 2.4 describe en forma esquemática las partes de un cohete, que por lo general se agrupan en cuatro sistemas principales:

- El sistema de fuselaje o cuerpo del cohete, hecho de materiales muy resistentes, pero livianos.
- El sistema de carga útil, que depende de la misión del cohete.
- El sistema de guía, el cual incluye sensores sofisticados, computadores, equipo de comunicación, entre otros dispositivos.
- El sistema de propulsión, que por lo general consta de motores para combustible líquido o motores para combustible sólido.

Tal como se representa en la figura 2.5, típicamente un cohete está sujeto a cuatro fuerzas:

- La fuerza de empuje F_{em} es una fuerza artificial que depende del diseño de los motores del cohete, tipo de combustible usado,

flujo de combustible a través del motor, velocidad de expulsión de los gases y presión a la salida de la tobera.

- El peso tiene su origen en la fuerza gravitacional de la Tierra (o el planeta en consideración), depende de la masa del cohete, actúa sobre el centro de gravedad del mismo y se dirige hacia el centro de la Tierra.



Figura 2.4: Diagrama esquemático de un cohete. El símbolo $v(t)$ designa la velocidad del cohete.

- La fuerza de resistencia aerodinámica es la resistencia que experimenta el vehículo debido a la fricción con la atmósfera. Esta fuerza, que recibe también el nombre de *fuerza de arrastre*, actúa en dirección contraria al vector velocidad del cohete. Por ejemplo, los aviones para frenar abren los alerones para incrementar la fuerza de arrastre que se opone al movimiento.
- La fuerza de sustentación es una fuerza artificial que depende del diseño aerodinámico del vehículo; de la forma, el tamaño y

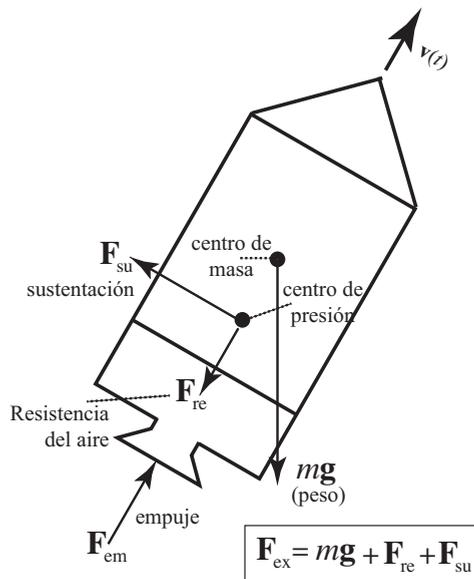


Figura 2.5. Las fuerzas típicas que actúan sobre un cohete son la fuerza de empuje \mathbf{F}_{em} y la fuerza neta externa \mathbf{F}_{ex} que resulta de sumar vectorialmente el peso y las fuerzas aerodinámicas existentes: resistencia del aire y fuerza de sustentación.

la velocidad del cohete; de las propiedades de la atmósfera, y de las diferencias de presión alrededor de la superficie del cohete.

Avión. En el caso de los aviones, debe entenderse que los motores y las alas cumplen propósitos diferentes (figura 2.6). Los motores están diseñados para mover el avión hacia adelante a alta velocidad. Las alas, con perfiles aerodinámicos curvos, hacen que cuando el avión está en vuelo el aire fluya por dos rutas diferentes: dos moléculas de aire que están inicialmente en la parte delantera se separan: la que pasa por arriba del ala llega al extremo de la cola del ala mucho más rápido que la que pasa por debajo. El aire fluye sobre la superficie superior curvada del ala con una tendencia natural de moverse en línea recta, pero la curva del ala lo tira alrededor y hacia abajo. Por encima del ala la presión disminuye, mientras que por debajo del ala la presión aumenta. Esta diferencia

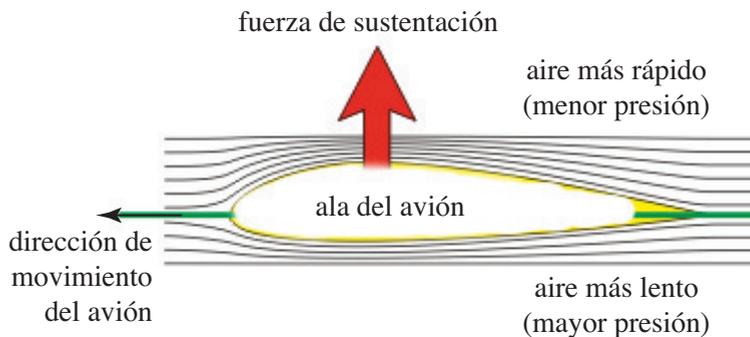


Figura 2.6: Esquema para ilustrar el origen de la fuerza de sustentación sobre el ala de un avión. Fuente: por ejemplo <https://www.explainthatstuff.com/howplaneswork.html>.

en la presión del aire entre la superficie superior e inferior del ala causa una gran diferencia en la velocidad del aire, lo que genera la fuerza de elevación —que es ascendente— y que, al superar el peso del avión, lo sostiene en el aire. Brevemente, los motores inducen el movimiento del avión hacia adelante, mientras que las alas regulan el movimiento en la dirección vertical.

2.4. Ecuación del cohete

Considere un sistema físico cerrado y suponga que toda la masa está concentrada en el centro de masa del sistema. Al ser un sistema cerrado, la masa M puede redistribuirse internamente en el transcurso del tiempo t , pero no se permite un intercambio de masa del sistema con el exterior.

Una vez seleccionado un sistema de referencia inercial, con origen O , la segunda ley de Newton establece que la derivada respecto al tiempo t de la cantidad de movimiento $\mathbf{p}(t)$ es igual a la suma de todas las fuerzas externas \mathbf{F}_{ex} que actúan sobre el sistema,

$$\mathbf{F}_{\text{ex}} = \frac{d\mathbf{p}(t)}{dt} = M \frac{d\mathbf{v}(t)}{dt}. \quad (2.4)$$

donde $\mathbf{p}(t) = M\mathbf{v}(t)$ es el momento lineal, que se define como el producto de la masa M por la velocidad $\mathbf{v}(t)$ del centro de masa del sistema.

El estudio de la dinámica de un sistema abierto (sistema de masa variable $m(t)$), como es el caso de un cohete (ver figura 2.7), requiere la generalización de la ecuación (2.4), ya que es incorrecto igualar \mathbf{F}_{ex} con $d[m(t)\mathbf{p}(t)]/dt$ pues se violaría la transformación de Galileo para las velocidades [4].

Vamos a considerar dos instantes de tiempo muy próximos entre sí: t y $t' = t + \Delta t > t$. En el instante de tiempo t , el cohete tiene una masa total $m(t)$ (incluyendo la masa del combustible, carga útil, pasajeros, etc.) y se mueve con velocidad $\mathbf{v}(t)$. Durante un pequeño intervalo de tiempo Δt se consume una cantidad de combustible Δm , que el motor transforma y expulsa por la parte posterior del vehículo con una velocidad de escape \mathbf{u} respecto al cohete o, lo que es equivalente, con velocidad

$$\mathbf{u}_O = \mathbf{v}(t') + \mathbf{u} \quad (2.5)$$

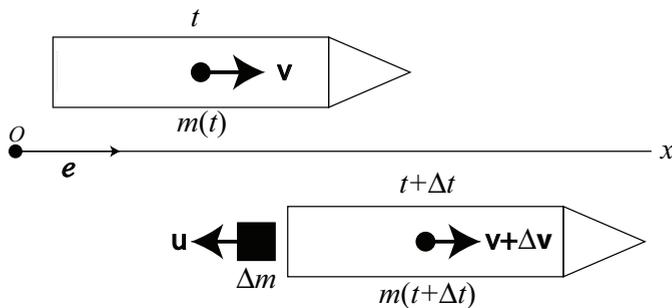


Figura 2.7. Esquema para representar el movimiento de un cohete con respecto a un sistema de referencia inercial de origen O y vector unitario \mathbf{e}_1 que señala hacia la derecha.

respecto al sistema de referencia de origen O , relación que es consecuencia de la transformación de Galileo para las velocidades. En el instante de tiempo $t' = t + \Delta t$ el sistema consta de dos partes: el cohete propiamente dicho, que tiene ahora una masa $m(t') = m(t) - \Delta m$ y se mueve con velocidad $\mathbf{v}(t') = \mathbf{v}(t) + \Delta \mathbf{v}$, y una “partícula efectiva” de masa Δm que se mueve con velocidad $\mathbf{u}_O = \mathbf{v}(t') + \mathbf{u} = \mathbf{v}(t) + \Delta \mathbf{v} + \mathbf{u}$.

Los momentos lineales en los instantes t' y t están dados por

$$\begin{aligned} \mathbf{p}(t') &= m(t') [\mathbf{v}(t) + \Delta \mathbf{v}] + \Delta m [\mathbf{v}(t) + \Delta \mathbf{v} + \mathbf{u}] \\ &= m(t)\mathbf{v}(t) + m(t)\Delta \mathbf{v} + \Delta m \mathbf{u}, \\ \mathbf{p}(t) &= m(t)\mathbf{v}(t), \end{aligned} \quad (2.6)$$

lo que implica

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathbf{p}(t + \Delta t) - \mathbf{p}(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{m(t)\Delta \mathbf{v} + \Delta m \mathbf{u}}{\Delta t}.$$

Por lo tanto, el cambio en la cantidad de movimiento es dada por

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = m(t) \frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} - \frac{dm(t)}{dt} \mathbf{u}. \quad (2.7)$$

Para llegar a esta expresión, hemos tenido en cuenta que Δm y Δt son cantidades positivas y, por lo tanto,

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta t} = \left| \frac{dm}{dt} \right| = -\frac{dm}{dt}; \quad (2.8)$$

es decir, la disminución de masa del cohete implica que $dm/dt < 0$.

Compárense ahora las ecuaciones (2.4) y (2.7), las cuales describen un sistema de masa constante M y un sistema de masa variable, respectivamente, expuestos a una fuerza externa $d\mathbf{p}/dt = \mathbf{F}_{\text{ex}}$. En la ecuación (2.7), la masa $m(t)$ desempeña el papel de la masa M y en cada instante de tiempo t se comporta como si fuese una constante, pero interviene ahora un nuevo término $\mathbf{F}_{\text{em}} = (dm/dt)\mathbf{u}$, que se conoce con el nombre de *fuerza de empuje*. En consecuencia, la ecuación (2.7) puede expresarse en la forma de la segunda ley de Newton, como sigue:

$$m(t) \frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} = \mathbf{F}_{\text{ex}} + \mathbf{F}_{\text{em}}. \quad (2.9)$$

Esta ecuación describe un sistema de masa variable, en el que:

- $\mathbf{v}(t)$ es la velocidad del centro de masa del cohete;
- \mathbf{F}_{ex} es la fuerza externa que actúa sobre el centro de masa del cohete, como es el caso de la fuerza gravitacional que ejerce la Tierra sobre el vehículo espacial;
- Los motores del cohete consumen combustible a una tasa

$$q(t) = \left| \frac{dm}{dt} \right| > 0, \quad \frac{dm}{dt} = -q(t), \quad (2.10)$$

lo que implica que el vehículo disminuye progresivamente su masa, hasta consumir completamente el combustible.

- Dada la quema del combustible y expulsión de los productos resultantes, el efecto de la disminución de la masa del cohete es equivalente a tener una fuerza adicional $\mathbf{F}_{\text{em}} = -q(t)\mathbf{u}$, que se conoce con el nombre de *fuerza de empuje*.
- \mathbf{u} es la *velocidad de escape efectiva* de los gases expulsados por el cohete, medida con respecto al centro de masa del cohete. Como la masa del cohete disminuye, $dm/dt < 0$, la velocidad de escape \mathbf{u} apunta en dirección contraria a la del vector velocidad, lo que implica que el empuje es positivo.

La ecuación (2.9) se conoce como ecuación del cohete o segunda ley de Newton para el cohete, fórmula que es invariante bajo transformaciones de Galileo.

En una situación hipotética en la que el cohete no exhala los productos de la combustión se tendría $\mathbf{u} = 0$ y la ecuación (2.9) se reduce a la ecuación (2.4), la cual describe la dinámica de un sistema cerrado de masa constante $M = m(t_0)$. En una segunda situación hipotética en la que el dispositivo pierde masa en forma isotrópica (con respecto al sistema de referencia ubicado en el centro de masa del vehículo), entonces la contribución total neta del término $[dm(t)/dt]\mathbf{u}$ sería cero y (2.9) se reduciría a

$$m(t)\frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} = \mathbf{F}_{\text{ex}}. \quad (2.11)$$







Este libro se terminó de editar
en la Editorial UTADAO
en el mes de abril de 2021

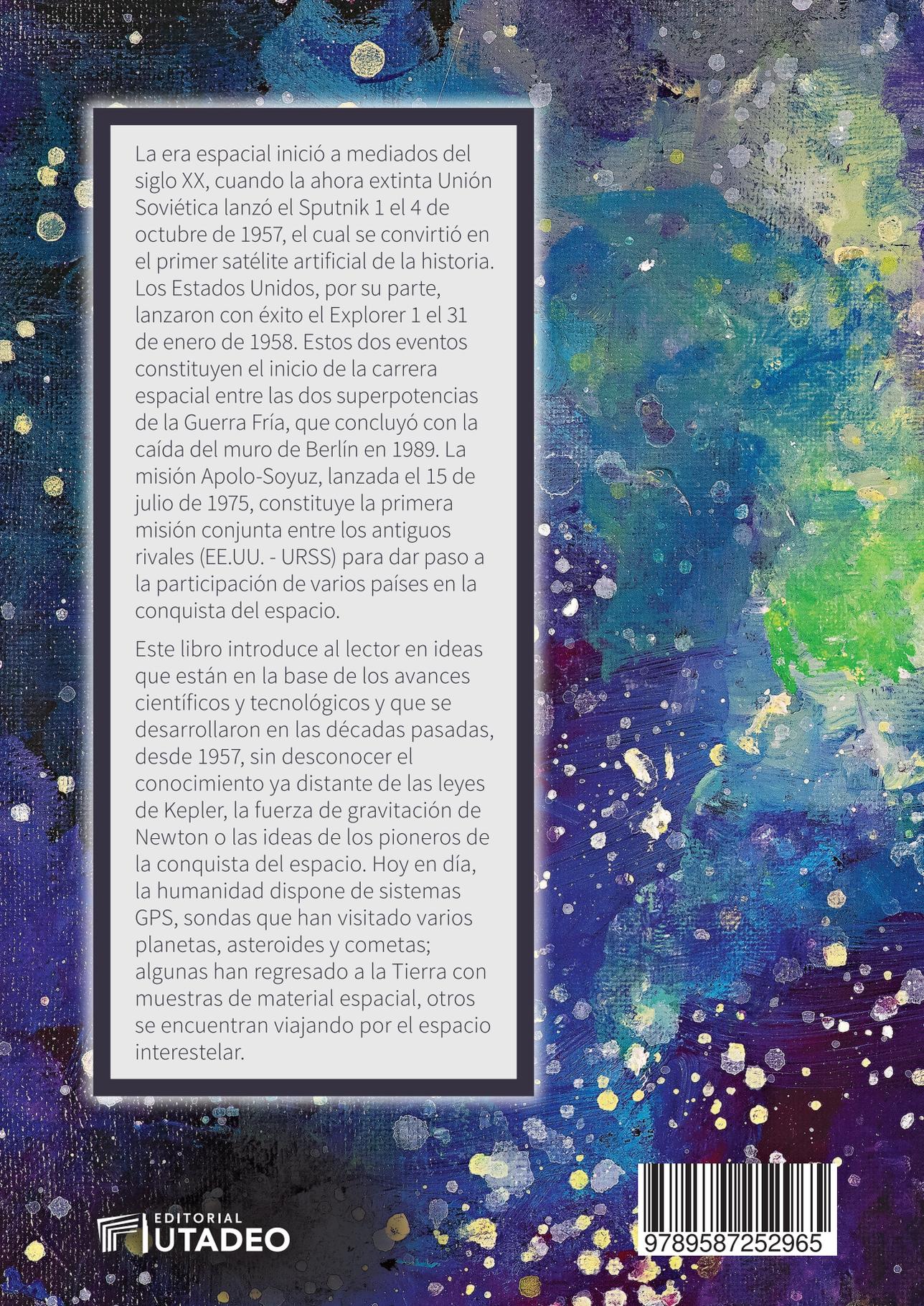
Diógenes Campos Romero

Físico y magíster de la Universidad Nacional de Colombia, y doctor en Ciencias Naturales (Dr. rer.nat.) de la Universidad de Kaiserslautern, Alemania.

En la Universidad Nacional de Colombia alcanzó la categoría de profesor titular y maestro universitario, y recibió la distinción de Docencia Excepcional y la medalla al mérito universitario en investigación. Ha sido decano y vicerrector académico de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano y vicerrector académico de la Universidad La Gran Colombia.

Formó parte del consejo del Programa Nacional de Ciencias Básicas de Colciencias (2006-2011) y ha ejercido como par académico (1997-2020) designado por el Consejo Nacional de Acreditación en unas dieciocho oportunidades. Es profesor emérito de la Universidad Nacional de Colombia y miembro de número de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Es autor y coautor de libros y artículos científicos en las áreas de física teórica, sistemas cuánticos, mecánica estadística, mecánica analítica, sistemas dinámicos, biodiversidad, ecología y cambio climático.



La era espacial inició a mediados del siglo XX, cuando la ahora extinta Unión Soviética lanzó el Sputnik 1 el 4 de octubre de 1957, el cual se convirtió en el primer satélite artificial de la historia. Los Estados Unidos, por su parte, lanzaron con éxito el Explorer 1 el 31 de enero de 1958. Estos dos eventos constituyen el inicio de la carrera espacial entre las dos superpotencias de la Guerra Fría, que concluyó con la caída del muro de Berlín en 1989. La misión Apolo-Soyuz, lanzada el 15 de julio de 1975, constituye la primera misión conjunta entre los antiguos rivales (EE.UU. - URSS) para dar paso a la participación de varios países en la conquista del espacio.

Este libro introduce al lector en ideas que están en la base de los avances científicos y tecnológicos y que se desarrollaron en las décadas pasadas, desde 1957, sin desconocer el conocimiento ya distante de las leyes de Kepler, la fuerza de gravitación de Newton o las ideas de los pioneros de la conquista del espacio. Hoy en día, la humanidad dispone de sistemas GPS, sondas que han visitado varios planetas, asteroides y cometas; algunas han regresado a la Tierra con muestras de material espacial, otros se encuentran viajando por el espacio interestelar.