

Jorge Roberto Sosa Pedroza y Fabiola Martínez Zúñiga



# Los satélites artificiales, solitarios viajeros

Poco sabemos de los satélites artificiales, aunque los usamos a diario. Por siglos se ha forjado la ciencia en que se basan: la mecánica del movimiento planetario, el electromagnetismo, la teoría de la relatividad, la ingeniería electrónica o la mecánica de materiales, todas apoyadas en 4 000 años de matemáticas. Después de una breve historia de la mecánica orbital, describimos los sistemas de un satélite artificial y lo hecho por México en la materia.

## Breve historia

Un satélite es un objeto natural o artificial que gira alrededor de un cuerpo principal. Aunque en la actualidad pensamos de inmediato en los satélites artificiales, el concepto es más general: la Luna es un satélite de la Tierra, así como la Tierra y los demás planetas del Sistema Solar son satélites del Sol, y también el Sol es un satélite del centro de nuestra galaxia, que a su vez se mueve en el universo.

Se requirieron siglos para entender los principios que explican cómo se mantienen los planetas girando alrededor del Sol, pero su definición precisa se debe sobre todo a tres personajes: Tycho Brahe, Johannes Kepler e Isaac Newton. El astrónomo danés Tycho Brahe dedicó 25 años a registrar, noche tras noche, el movimiento de los planetas que hasta entonces se conocían; en 1599 se asoció con el matemático alemán Johannes Kepler y, antes de morir en 1601, le cedió los resultados de sus observaciones (Gribin, 2002).

A partir de esas mediciones, en tan sólo dos años Kepler descubrió el movimiento de los planetas, lo cual iba en contra de los dogmas religiosos de la época, incluso cuando él y Brahe eran firmes creyentes de la iglesia luterana y católica, respectivamente. Kepler hizo público su descubrimiento y definió las tres leyes que llevan su nombre. Como Marte fue el planeta más observado por Brahe, Kepler





tuvo así la clave para describir su trayectoria elíptica y, por lo tanto, concluir que los tiempos de movimiento sobre ella no eran constantes. Reportó sus resultados en 1609 en *Astronomia Nova*; a partir de ellos calculó el tiempo en que cada planeta completa una órbita, lo que publicó en 1618 en *Harmonice Mundi* (Battaner, 2018). El trabajo de Kepler se resume en tres postulados:

- 1.<sup>a</sup> ley de Kepler: “Los planetas se mueven sobre un plano y describen órbitas elípticas, en las que el Sol se localiza en uno de los focos de la elipse”.
- 2.<sup>a</sup> ley de Kepler: “El vector que define la posición de cualquier planeta respecto del Sol barre áreas iguales en tiempos iguales sobre la elipse” ( $A_1 = A_2$ , véase la Figura 1).
- 3.<sup>a</sup> ley de Kepler: “El cuadrado del periodo de revolución es proporcional al cubo del semi-eje mayor de la elipse” ( $P^2 = kr^3$ , donde  $k$  es una constante).

Las leyes de Kepler terminaron con el mito de la Tierra como centro del universo (Maral, 2008) y, a su vez, estremecieron al mundo científico de la época. Más adelante, la demostración matemática de dichas leyes correspondió a un taciturno, aislado y malhumorado joven inglés: Isaac Newton.

*Newton, las leyes de Kepler y el equilibrio de fuerzas*

A Newton se le atribuye la frase: “Podemos ver más lejos, porque estamos parados en los hombros de gigantes” (Hawking, 2002), pues un nuevo descubri-

miento siempre parte de conocimientos previos. Al analizar las leyes de Kepler, Newton intuyó que la fuerza que provoca la caída de los objetos hacia la Tierra (ley de gravitación universal) también produce el movimiento de los planetas alrededor del Sol; para él, ambas fuerzas están en equilibrio. La ley de gravitación universal establece que la fuerza de atracción entre dos cuerpos es proporcional al producto de sus masas dividido por el cuadrado de la distancia  $r$  entre sus centros. Por su parte, la segunda ley de Newton indica que la fuerza del movimiento de un cuerpo es proporcional a su masa y al cambio de su velocidad con el tiempo. Con estas ideas, Newton comprobó las leyes de Kepler, por lo que se convirtió en el físico más importante de su época.

Los satélites artificiales

Los satélites cumplen con las leyes de Kepler. Después de confirmarlo, Newton imaginó la posibilidad de lanzar un objeto al espacio que se convirtiera en un satélite artificial, pero se ha de haber desilusionado porque la velocidad necesaria para escapar de la gravedad es de 42 000 km/h. Tuvieron que pasar 300 años para hacer realidad esta idea: el 7 de octubre de 1957 Rusia puso en órbita el *Sputnik 1*, que circunvoló la Tierra a una altura de 300 km emitiendo un “bip-bip” en 31.5 MHz, con lo que probó su presencia. Este acontecimiento dio inicio a la exploración del espacio.

Actualmente, gran parte de nuestra vida cotidiana la debemos a los satélites artificiales: recibimos señales de televisión y radio, así como imágenes en tiempo real de fenómenos naturales sobre un territorio; utilizamos sistemas de posicionamiento global (GPS) y podemos estudiar los tipos de cosechas, o bien la fauna marina y terrestre; contamos con comunicaciones que nos unen con todo el mundo e incluso con los astronautas que están flotando en la Estación Espacial Internacional o alrededor de ella.

Para poner en órbita un satélite se requiere llegar a la velocidad necesaria para contrarrestar la atracción de la Tierra. En la Tabla 1 se muestran algunas de esas velocidades, en función del tiempo de giro

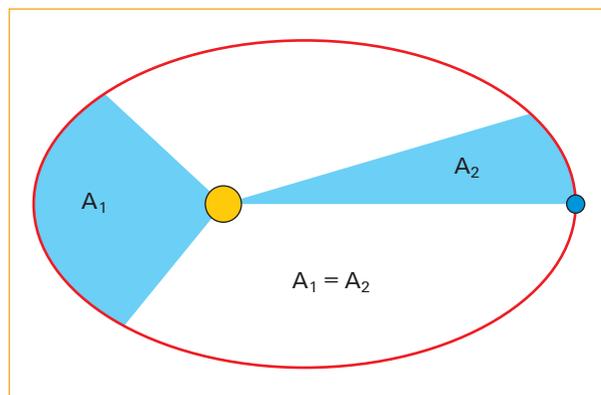


Figura 1. Leyes de Kepler (1.<sup>a</sup> y 2.<sup>a</sup>).

**Tiempo de giro**  
Tiempo en que un satélite completa una órbita.

**Tabla 1.** Relación de velocidad vs. altura.

Altura (km)	Velocidad (km/s)	Periodo	
		Horas	Minutos
6,878	7.613	1	35
7,178	7.452	1	41
7,778	7.159	1	54
11,378	5.919	3	21
16,778	4.874	6	00
21,378	4.318	8	38
42,164	3.075	23	56

y la altura ( $a$ ) en kilómetros desde el centro de la Tierra (considerando que el radio de nuestro planeta es de 6 378 km). De 1957 a la fecha se han lanzado alrededor de 9 000 satélites, en diferentes órbitas y de todos los tipos y tamaños. La Tabla 2 muestra una clasificación en función de sus dimensiones y peso; la Tabla 3, respecto de las órbitas.

Los satélites grandes tienen una **órbita geoestacionaria**, por lo que aparentemente están fijos en el

**Tabla 2.** Clasificación de satélites según su tamaño y su peso.

Tipo	Tamaño (m <sup>3</sup> )	Peso (kg)
Satélite grande	7	> 1,000
Satélite mediano	5	100-1,000
Satélite pequeño	2	50-100
Microsatélite	0.5	10-50
Nanosatélite	0.3	1-10
Picosatélite (CubeSat)	0.1	< 1

**Tabla 3.** Clasificación de satélites según su órbita.

Tipos de órbita	Altura sobre el nivel del mar (km)	Velocidad del satélite (km/h)	Función del satélite
Baja	250-1,500	25,000-28,000	Comunicaciones, observación de la Tierra, investigación científica.
Media	1,500-8,000	25,000-15,000	Telefonía, GPS.
Eje polar	500-800	26,600-27,300	Clima, navegación.
Geosíncrona	35,786 (en el Ecuador)	11,000	Comunicaciones, militares.
Elíptica	Perigeo ~ 500 Apogeo ~ 39,000	~ 34,200 ~ 5,400	Comunicaciones.

espacio. Esta órbita es la más utilizada y la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) la controla para que se use adecuadamente. Asimismo, los picosatélites o CubeSat tienen un gran auge, ya que son muy pequeños, pesan poco y se ponen fácilmente en una órbita baja; éstos se lanzan desde la Estación Espacial Internacional (350 km de altura), a donde son llevados por cualquier nave de suministros. La Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio de Estados Unidos de América (NASA, 2020) plantea usarlos para misiones de telecomunicaciones, prospección terrestre y exploración de la Luna y de Marte.

### ■ Estructura de un satélite artificial

■ Un satélite se divide en dos partes principales: carga útil y plataforma (véase la Figura 2). De acuerdo con su misión, se define la carga útil (comunicaciones, meteorología, investigación) y se incluyen los subsistemas necesarios: antenas, sistema de comunicaciones, transmisores, receptores, procesadores de señal, computadoras o telescopios, como el *Hubble*. Pero además, el satélite en sí mismo necesita sistemas de “supervivencia”: la plataforma incluye todos los sistemas que soportan el satélite, los cuales describimos a continuación.

Además, en tierra existe un centro de control que hace que la carga útil y la plataforma funcionen de acuerdo con las necesidades de operación. Asimismo, la carga útil usa estaciones terrenas independientes. Algunos subsistemas son indispensables, aunque su peso y tamaño dificultan su inclusión; en

### ◀ Órbita geoestacionaria

Los satélites que completan su órbita en sincronía con la rotación de la Tierra.

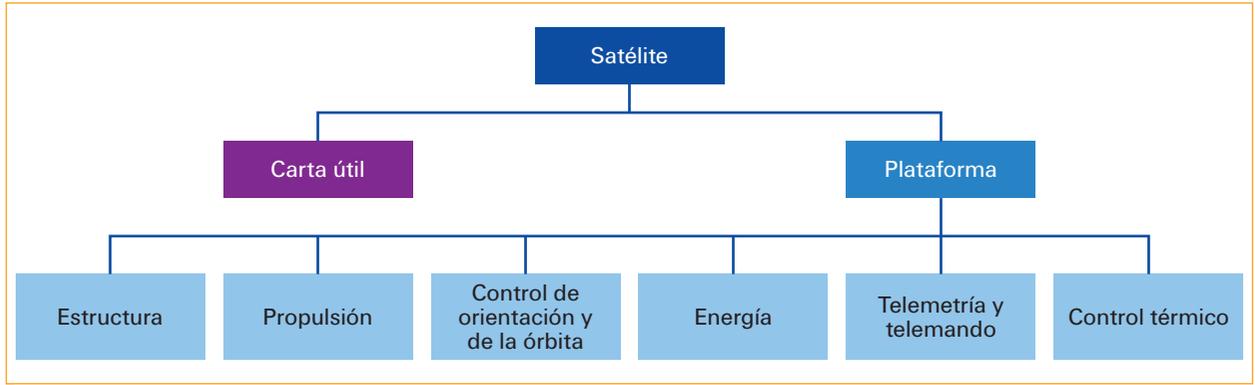


Figura 2. Estructura general de un satélite.

los satélites grandes se usan todos ellos, pero en los pequeños se prescinde de algunos y se limitan otros.

**Apogeo** ▶ *Estructura*

Distancia mayor entre el satélite y el foco en la órbita elíptica.

Esta parte de la plataforma es el soporte de todos los equipos. Tiene poco peso y suficiente resistencia para aguantar las fuerzas y vibraciones del lanzamiento; también es resistente al deterioro y no se ve afectada por las diferencias térmicas en el espacio. La construcción de la estructura ha llevado al desarrollo de materiales como el Kevlar, una poliamida usada en tierra para otras aplicaciones, así como el “panal de abeja” de aluminio ahuecado, muy ligero y resistente, el cual se usa para los satélites pequeños.

*Propulsión*

Aunque se están investigando alternativas, los satélites usan combustible líquido. Como la gravedad es cero en el espacio, el combustible debe ser impulsado por helio dentro de la cámara de combustión del motor que lleva al satélite a su posición final. Con el combustible también se alimentan pequeños cohetes de posicionamiento distribuidos en las caras de la estructura. Por otra parte, los satélites pequeños de órbita baja se mueven inercialmente y no requieren combustible.

La vida útil de un satélite grande se define por su uso de combustible, algo que los ingenieros del Centro de Control Satelital en México hacen con eficiencia. Un ejemplo es el satélite *Morelos II*, que tuvo una vida útil de 22 años,

aunque el pronóstico antes de su lanzamiento era de nueve. El éxito de este satélite se debió al ahorro de combustible, pues se prolongó la traslación de la órbita baja a la de **apogeo**, que se usó después durante la operación.

*Control de orientación y de órbita*

Para hacer que el satélite “vea” hacia la Tierra o a la dirección deseada de acuerdo con la misión (aunque la referencia siempre será la Tierra), la orientación se consigue con diferentes métodos, según las características del satélite. Por ejemplo, un satélite grande tiene sensores que “ven” el perfil de la Tierra o la posición del Sol, y con ello es posible locali-



zarlo y reorientarlo desde el centro de control terrestre en caso de haber desviaciones. La desviación en un satélite geoestacionario no debe superar  $0.1^\circ$ : un movimiento de 70 km en cualquier dirección a 36 000 km de altura.

No obstante, considerando que el Sol y la Tierra no tienen un movimiento regular, se usa otra referencia: una estrella en la constelación de Aries que por su lejanía puede considerarse “fija”. De esta manera se define uno de los ejes coordenados de la posición de la Tierra y el satélite en el espacio; las otras coordenadas son la línea norte-sur y el eje en el plano ecuatorial a  $90^\circ$  del de Aries.

El sistema de posicionamiento y orientación usa ruedas inerciales, las cuales se basan en el principio de las bicicletas; cuando giran, generan una fuerza perpendicular a la dirección de giro, por lo que la mantienen vertical. El satélite es como un cubo con una rueda inercial en cada eje, todas movidas eléctricamente; en un inicio eran de cuerpo cilíndrico (como en los satélites *Morelos I y II*), y giraban sobre su eje para estabilizarse.

### *Sistema de energía*

La fuente disponible para todos los satélites es el Sol, cuya energía se convierte en electricidad mediante celdas solares. En la Tierra cada vez se vuelve más común el uso de la energía solar gracias al desarrollo espacial, pero la diferencia es que en órbita las celdas deben protegerse de las partículas de alta energía del Sol, por lo que están recubiertas de diamante industrial, cuya dureza evita que se dañen. Debido a que el método es caro, solamente se usan en satélites grandes, cuya esperanza de vida es de al menos 15 años. Los satélites pequeños usan celdas “pelonas” porque su tiempo de vida es de un año, por la declinación de la órbita que los lleva a quemarse en la atmósfera.

El sistema de energía cuenta con baterías para almacenarla, y así sólo se usa cuando el satélite no es iluminado por el Sol. También se emplean convertidores de la corriente directa (de las celdas) en corriente alterna, necesaria para alimentar los diferentes niveles de voltaje del satélite, que van desde algunos volts hasta los 24 000 V de los amplificado-

**Recuadro 1.**  
**Sincronización del tiempo**

**E**l tiempo también se controla gracias a sistemas de alta precisión, como el GPS de órbita media con velocidad de 20 000 km/h, que usa un reloj atómico para sincronizar el satélite con el equipo terrestre.



res de potencia. También gracias a la investigación espacial, contamos con avances como las baterías satelitales de litio, que hoy se usan en los teléfonos celulares.

### *Telemetría y telecomando*

Es importante estar midiendo la “salud” del satélite e informar al centro de control terrestre; pero ello es tan complicado según lo permita el costo, peso y energía. Cada subsistema usa diferentes tipos de sensores que envían los datos a la Tierra para su análisis. Un satélite grande tiene más de 500 puntos de telemetría: temperatura, energía eléctrica, orientación, comunicaciones, etcétera. La telemetría permite hacer modificaciones desde Tierra mediante el telecomando; por ejemplo, si una batería o un tanque de helio fallan, se cambian por respaldos, o bien si un amplificador reduce su ganancia, ésta puede aumentarse desde la Tierra.

Asimismo, la telemetría sirve para analizar la orientación del satélite, que –como mencionamos–



Cartel del proyecto del sistema de satélites *Morelos*.

se controla con las ruedas inerciales, pero también para llevar al satélite a su posición final. Según el caso, un satélite pequeño usa menos puntos de telemetría y el control es limitado, al igual que su telemando.

#### Control térmico

Este elemento del satélite permite mantener la temperatura dentro de límites aceptables. Como en el espacio no hay atmósfera, la cara del satélite que ve hacia el Sol está a una temperatura de 150 °C, mientras que la cara opuesta está a -50 °C, pero dentro del satélite la temperatura se mantiene a 5 °C mediante el uso de mantas reflectoras que lo cubren. Además, la temperatura se controla con calentadores y refrigerantes, similares a los usados domésticamente. Por su tamaño, los satélites pequeños no tienen este subsistema, y también porque su velocidad es tan alta que los tiempos en una u otra condición son cortos.

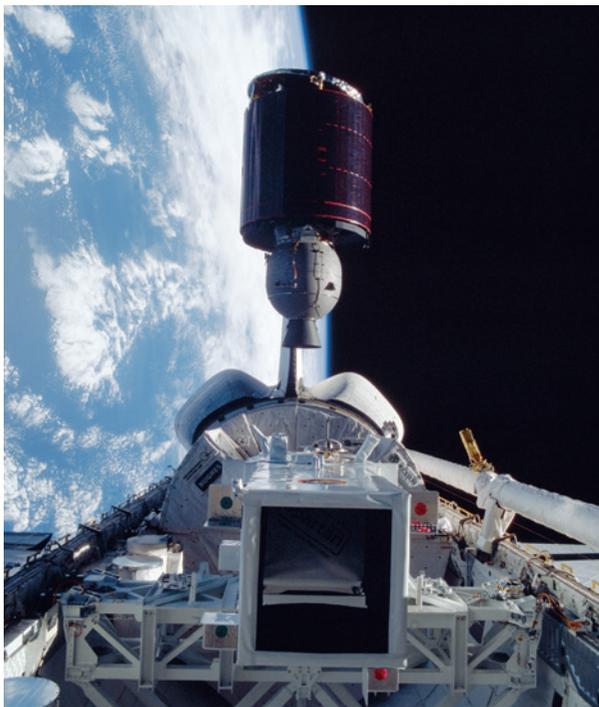
#### Computadora de vuelo

Esta parte tiene un lugar especial en la estructura satelital. Al igual que los aviones, los satélites no son simplemente cosas que vuelan; todos los subsistemas con que cuentan están controlados por la computadora de vuelo, que ordena la información de cada punto de telemetría, ordena cada paso de relocalización en el espacio tras recibir las instrucciones de la estación terrena y controla la cantidad de energía que debe alimentar a las baterías para no sobrecargarlas o descargarlas demasiado, y así prolongar su vida útil.

Por ejemplo, el satélite *Morelos III* tiene una **huella de cobertura** formada por más de 40 áreas circulares para cubrir el territorio nacional, lo que hace más eficientes las comunicaciones; si se desea enlazar a Tijuana con Mérida, la computadora “lee” los datos enviados desde la Tierra y selecciona el área de cobertura que incluye la ciudad yucateca. Así, las dimensiones eléctricas de la computadora dependen de la cantidad de datos que debe manejar; si la información no es demasiada, se puede controlar tanto la carga útil como la plataforma, pero en el caso contrario se usa una computadora para cada parte.

#### Huella de cobertura

Área de radiación electromagnética que un satélite cubre sobre la Tierra.



Despliegue del *Morelos I*, misión 51G. Foto: Nasa.

Como el “cerebro” del satélite, la computadora requiere de cuidados y tiene siempre un respaldo; si ésta falla, se sustituye por otra. En 1999 la computadora de vuelo del satélite *Solidaridad I* presentó una falla de un pequeño dispositivo de 2 mm de longitud que enlazaba dos elementos. El daño se debió a la presión cero del espacio. Aunque el Centro de Control Satelital cambió la computadora por el respaldo, la segunda sufrió el mismo desperfecto y el satélite sin cerebro se perdió. En cambio, la computadora del *Solidaridad II* operó adecuadamente durante 18 años. Por su parte, el *Morelos II* volvió a operar hasta 2012, para sustituir al *Solidaridad I*.

### Electrónica

Todo de lo que actualmente gozamos en la Tierra gracias a los satélites se debe también a la investigación en torno a los dispositivos electrónicos. La computadora de vuelo de un satélite pequeño llega a ocupar un área de 2 cm<sup>2</sup> y tiene un espesor aproximado de 1 cm, por lo que se ha avanzado en la miniaturización de los procesadores y amplificadores. Otro ejemplo son las antenas; la Figura 3 es un dibujo del *Morelos III* con el impresionante reflector parabólico de 24 m<sup>2</sup>. Por otra parte, la Figura 4 muestra una antena inventada por los autores de este artículo para un CubeSat de tres secciones; en la foto también se ve la cámara fotográfica para prospección terrestre como carga útil.

### México en el desarrollo espacial

Como en todas las ramas de la ciencia y la tecnología, los entusiastas mexicanos siempre están presentes. En la década de 1960 –sólo tres años después del *Sputnik*– un grupo de investigadores potosinos construyó cohetes exitosos con combustible sólido, pero no fue posible mantener los gastos. En esa época se creó la Comisión Nacional del Espacio Exterior (CNEE) para apoyar a investigadores como ellos. El esfuerzo tuvo éxito y se formaron equipos que diseñaron y supervisaron la construcción de los satélites *Morelos* a finales de los años 70; de ese proyecto nació la idea de tener un astronauta mexicano, honor que correspondió a Rodolfo

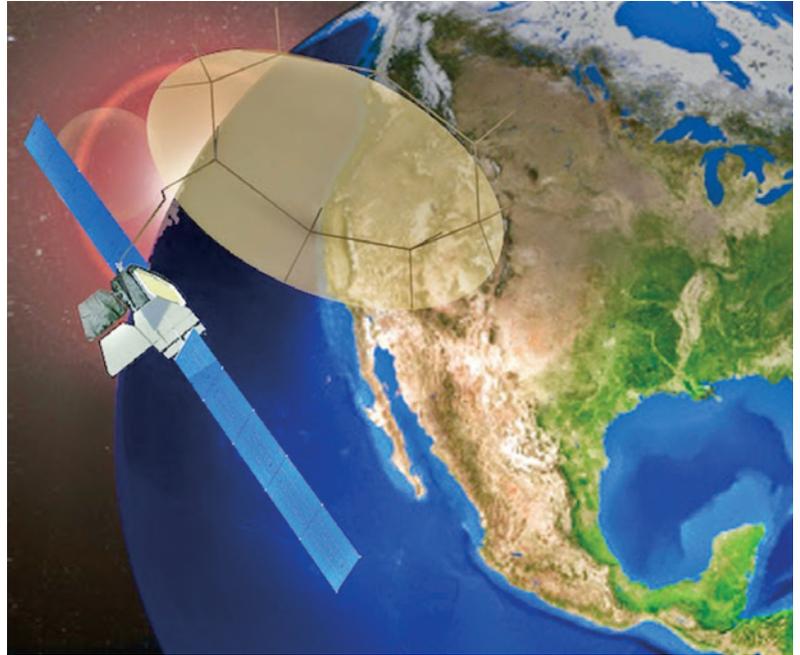
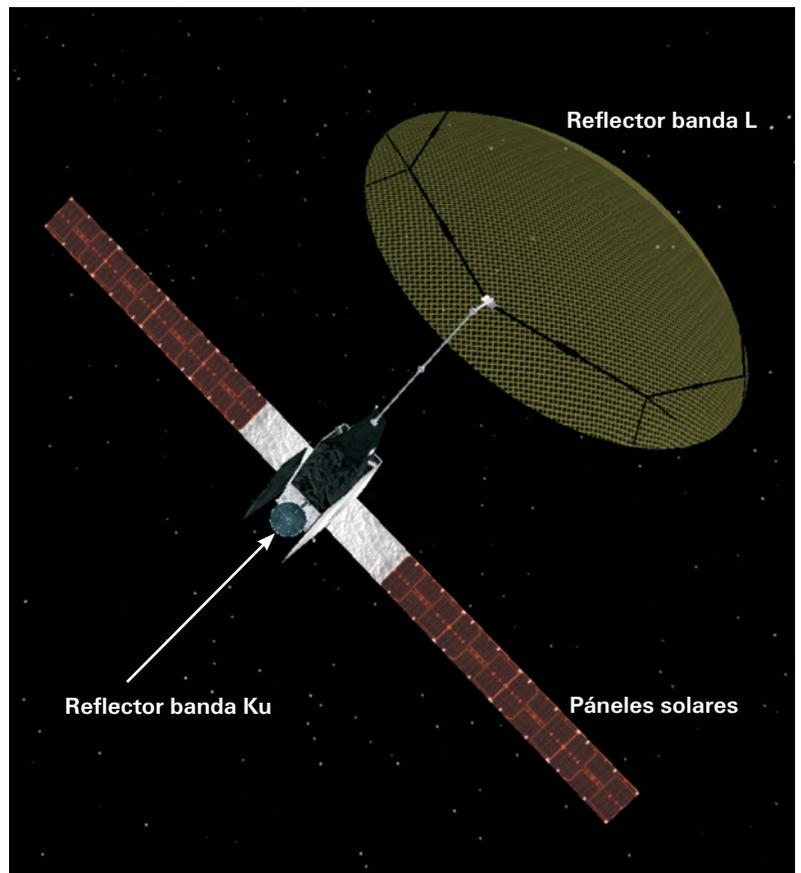


Figura 3. Dibujo del *Morelos III*.



*Morelos III*. Tomado de: <http://haciaespacio.aem.gob.mx/revistadigital/MorelosIII/#>



Figura 4. Antena de un CubeSat.

Neri. Se creó entonces una masa crítica de investigadores de la ciencia espacial, que se incrementó con nuevos ingenieros y científicos formados por los anteriores.

Después de los *Morelos I y II*, en 1990 el Instituto Mexicano de Comunicaciones (IMC) convocó a 250 ingenieros para diseñar los *Solidaridad*, coordinados por el director Eugenio Méndez Docurro, con el apoyo de Enrique Melrose y Sergio Viñals, entre otros. Agrupar a tantos ingenieros de todo el país fue un éxito, tanto por la caracterización de los satélites como porque ellos han mantenido y ampliado la investigación en el tema a pesar de la falta de apoyo de las autoridades mexicanas, quienes cerraron la CNEE en los años 70 y el IMC en la década de los 90. Pero la semilla se sembró, y la investigación actual se desarrolla en las universidades por aquéllos y los actuales investigadores. Incluso, se creó la Red de Ciencia y Tecnología Espacial, apoyada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, aunque se le retiró el apoyo en 2020.

A pesar de las limitaciones y, sobre todo, falta de recursos, se sigue avanzando en las diferentes áreas, como el diseño de estructuras, la electrónica, los sistemas de estabilización, el cómputo, las celdas solares, las antenas, etcétera (véase la Figura 4). Es importante señalar que a partir de 2009 los autores fuimos convocados al proyecto para la creación de la Agencia Espacial Mexicana (AEM), que finalmente se consolidó y en la cual participamos en mayor o menor grado.

Después del grupo de San Luis Potosí, se deben destacar algunos esfuerzos individuales, como el de Ramiro Iglesias, quien estando en la NASA en 1968 fue el primer médico que analizó un electrocardiograma de un astronauta que circunvolaba la Luna. Más adelante, en 1996, el IMC y la NASA acordaron que México participara en los proyectos del satélite ACTS. La Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) comenzó a trabajar en telemedicina, mientras que el Instituto Politécnico Nacional (IPN), junto con nueve universidades de Canadá y Estados Unidos de América, instaló una estación terrena en Villahermosa para analizar los efectos de atenuación por lluvia en banda Ka, que ahora se usa regularmente en los satélites de comunicaciones.

En 1994 el grupo que participó en el diseño de los satélites *Solidaridad* comenzó a diseñar y construir un microsátélite de 50 cm por lado (*SATEX*), con carga útil de un transceptor en banda Ka y una cámara de prospección terrena. El satélite resumía los conocimientos de 50 ingenieros: en antenas, celdas solares, estructura, electrónica, cómputo, estabilidad, control de temperatura, entre otras. El *SATEX* estuvo listo para las pruebas de vibración y resistencia mecánica previas al lanzamiento, pero la devaluación de 1996 cortó de tajo el proyecto y el satélite se quedó en tierra. Tras este ejemplo, las universidades crearon centros de investigación, lo cual dio frutos como el *UNAMSAT 1*, puesto en órbita y operado con éxito durante seis meses.

De entonces a la fecha los esfuerzos se han centrado en los nanosatélites, pero lo mejor es que en dichos proyectos es común la participación interinstitucional. Con el apoyo de la AEM y la Secretaría de

la Defensa Nacional se construyeron dos nanosatélites en los que participaron investigadores del IPN, la UNAM y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Uno de estos satélites se puso en órbita en 2018 y se espera que en breve se haga lo mismo con el segundo. Asimismo, el esfuerzo más reciente es AZTEKSAT de la Universidad de Puebla, que es parte de una constelación de un consorcio internacional.

Además de los esfuerzos para la construcción de satélites –que se mantiene como meta–, el IPN ha apoyado al gobierno en proyectos asociados, como la defensa del *Morelos III* ante un consorcio inglés que pidió a la UIT que el satélite no operara, pues argumentaban problemas de interferencia, lo cual fue desmentido por medio de experimentos de laboratorio e *in situ* que la empresa inglesa no pudo rebatir. Asimismo, actualmente se cuenta con apoyo para el proyecto de *Internet para Todos* mediante el uso del *Morelos III*, con el objetivo de conectar a las zonas aisladas con las urbes nacionales e internacionales.

## Conclusión

La industria de los satélites compite en el mundo mediante el desarrollo de tecnología, pero México compra esa tecnología en lugar de crearla, aun cuando tiene el potencial humano para competir, con el apoyo de la industria y el gobierno. Por ejemplo, de continuar la CNEE o el IMC para el apoyo de la cien-

cia y la ingeniería, podríamos construir al menos partes de satélites, en lugar de inhibir la creatividad mexicana mediante el pago de proyectos “llave en mano”, que a la larga son mucho más caros.

### Jorge Roberto Sosa Pedroza

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional.

jsosa@ipn.mx

### Fabiola Martínez Zúñiga

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional.

fmartinezzu@ipn.mx

### Referencias específicas

Battaner López, E. (2018), *Kepler*, México, RBA Editores.

Gribin, J. (2002), *Historia de la ciencia (1543-2001)*, España, Crítica.

Hawking, S. (2002), *On the Shoulders of Giants*, Inglaterra, Running Press.

Maral, J. (2008), *Satellite Communications*, Estados Unidos de América, Prentice Hall.

NASA en Español (2020), “Reportajes especiales”, *NASA en Español*. Disponible en: <[www.lanasa/noticias/reportajes-especiales](http://www.lanasa/noticias/reportajes-especiales)>, consultado el 29 de abril de 2020.

Sosa Pedroza, J. (2020), *Satélites [apuntes de clase]*, México, IPN.

