

ASCENSOR CIELO Y TIERRA DE BABEL

FERNANDO BALLESTEROS Y
BARTOLO LUQUE

A finales de este mes se celebra en Washington, D. C. (EE.UU.) una conferencia internacional que en su anterior edición pasó totalmente desapercibida para los medios de comunicación. Extraño, teniendo en cuenta que su tema central giraba en torno a uno de los ingenios más imaginativos y estimulantes que ha aportado la ciencia ficción a la ingeniería. Se trata nada más y nada menos que de la III Conferencia Internacional Anual del Ascensor Espacial.

En la pasada conferencia se estudiaron los pros y los contras de construir una máquina capaz de elevar material desde la superficie del planeta hasta el espacio sin usar cohetes, y con la misma sencillez con la que se coge un ascensor en un edificio. Sin duda, la conclusión más fascinante de la conferencia fue que, con la tecnología actual, podría construirse semejante elevador espacial en un lapso de tan sólo unos veinte años y por un coste inferior a una estación espacial. De hecho, y como consecuencia de la conferencia, la NASA ya ha encargado a la empresa *HighLift Systems* la investigación necesaria para la puesta en práctica del proyecto, fundándose para ello una empresa filial: *LiftPort Inc.*, dedicada única y exclusivamente al proyecto del ascensor espacial.



Fernando Ballesteros
(Observatorio Astronómico
de la Universidad de
Valencia) y **Bartolo Luque**
(Escuela Técnica Superior
de Ingenieros Aeronáuticos
de la Universidad Politécnica
de Madrid),
son dos habituales colaboradores
de la revista.

¿Qué es exactamente el ascensor espacial?

En su concepción más básica, el ascensor espacial consiste en un satélite en órbita geostacionaria (que por tanto, para los observadores terrestres, está «quieto» en el cielo) a unos 36.000 km de altura, unido a tierra firme mediante un enorme cable anclado en

ES AL ARRRES

algún lugar del ecuador terrestre. Este tipo de ascensor espacial fue propuesto por primera vez en 1895 por el pionero de todo lo referente al espacio: el ruso Konstantin Tsiolkovski. En Occidente, sin embargo, la idea surgiría de forma independiente gracias a Arthur C. Clarke, sin duda uno de los más famosos autores de ciencia ficción. En su cuento corto (homónimo de la posterior novela) «Cánticos de la lejana Tierra» publicado a finales de los años 50, presentaba una grúa espacial capaz de elevar cargas desde la superficie del planeta hasta una nave en órbita mediante un cable levadizo. Refinaría la idea posteriormente en su novela «Fuentes del Paraíso» (1978). La trama de esta historia es precisamente la construcción de un ascensor espacial en su variante de torre orbital de la que hablaremos después.

Impresión artística de un ascensor espacial llegando a su destino con carga y tripulación a 36.000 km de altura sobre la Tierra. (Dibujo de Pat Rawlings para NASA)

Este tipo básico de ascensor basado en un cable unido a una plataforma geoestacionaria es precisamente el propuesto como realizable en el período de veinte años en el citado congreso. La carga subiría hasta la plataforma orbital mediante unos vagones robot que treparían pacientemente por el cable hasta su destino. El cable actuaría así como el equivalente espacial de los railes de nuestros trenes. El problema básico con que se enfrentaba el proyecto hasta ahora era encontrar un material capaz de soportar la enorme tensión que debía sufrir el cable de anclaje. Pero un nuevo material de carbono, el fullereno, parece ser la solución. El fullereno es una compleja molécula de carbono con una estructura que recuerda a un balón de fútbol. Las pruebas de laboratorio han mostrado que un cable formado por nanotubos de fullereno

El ascensor espacial consiste en un satélite a unos 36.000 km de altura, unido a tierra firme mediante un enorme cable anclado en algún lugar del ecuador terrestre.



Con la tecnología actual, podría construirse semejante elevador espacial en un lapso de tan sólo unos veinte años y por un coste inferior a una estación espacial.

trenzados tiene una resistencia a la tensión cientos de veces mayor que el acero, más que suficiente para el ascensor espacial. No obstante, actualmente existe todavía una seria dificultad: cómo construir con este material cables de varios kilómetros de longitud. En los laboratorios de Los Álamos, EE.UU., están actualmente intentando sintetizar nanotubos continuos de fureleno: la solución al problema.

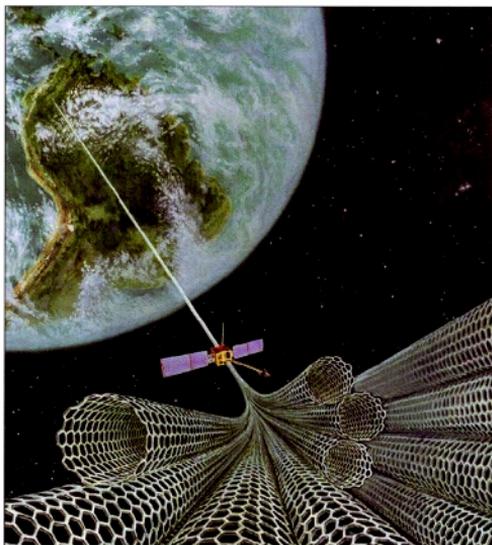
¿Qué ventajas reportaría un ascensor espacial? La más evidente es que ya no sería necesario usar los peligrosos cohetes para salir al espacio. Los astronautas no deberían soportar los rigores del despegue; tan sólo tendrían que subir a la cabina y pulsar un botón. Y, eso sí, llevarse algo de comer para el viaje, pues el módulo trepador podría tardar alrededor de un mes en llegar hasta la órbita geostacionaria. Con el ascensor espacial la construcción y puesta en órbita de satélites y naves sería muchísimo más sencilla: materiales, piezas y combustible subirían para ser ensamblados posteriormente en el espacio. Una nave construida de esta guisa, que fuera a viajar, por ejemplo, a la Luna, tendría que vencer un potencial gravitatorio sustancialmente menor que si partiera de la superficie del planeta. La construcción de una estación espacial en órbita geostacionaria sería sin duda una de las primeras tareas que se

abordarían de un modo mucho más económico a como se realiza hoy día. El ascensor espacial sería, a todos los efectos, el puerto de la Tierra hacia el espacio.

Los riesgos que debe afrontar un ascensor espacial son múltiples. Uno evidente es su susceptibilidad a actos de sabotaje, dado lo delicado de su estructura y lo importante que puede llegar a ser para la economía planetaria una vez esté en funcionamiento. Pero más allá de lo humano, están los riesgos técnicos. Varios de ellos tienen relación con el lugar de anclaje del cable. Esta ubicación (que ha de estar localizada en el ecuador) debe situarse en una zona de gran estabilidad sísmica: un terremoto sería especialmente fatal para una construcción como el ascensor. El otro gran peligro que habría que evitar y que condicionaría la elección del lugar de anclaje son los huracanes, que podrían provocar peligrosas oscilaciones en el cable. Teniendo en cuenta estos factores, uno de los sitios que se han sugerido para el amarre del cable es la isla de Sri Lanka (la antigua Ceilán). Pero dado que esta isla es el lugar elegido para la misma finalidad en la novela «Fuentes del Paraíso» de Arthur C. Clarke, y que es, de hecho, el lugar de residencia del famoso escritor desde hace varias décadas, uno no puede evitar preguntarse hasta qué punto esta elección no ha estado condicionada por su figura.

No obstante, incluso eligiendo un enclave con la estabilidad sísmica y atmosférica necesaria, se producirán vibraciones de todas formas y eso nos lleva a otro peligro que hay que tener en cuenta: las vibraciones de un cable de tal longitud sumergido en el campo magnético terrestre, produciría por inducción fortísimas corrientes eléctricas que podrían causar severos proble-

(Continúa en la página 28)



LA FÍSICA DEL ASCENSOR ESPACIAL

Entre todas las maneras estimadas para construir el ascensor espacial, la más factible parece ser la construcción de arriba abajo. Se comenzaría con el módulo principal en órbita geoestacionaria descolgando desde él, poco a poco, el cable hasta anclarlo en tierra. Sin embargo, haciendo sólo esto, el ascensor acabaría cayendo por su peso. Veámoslo:

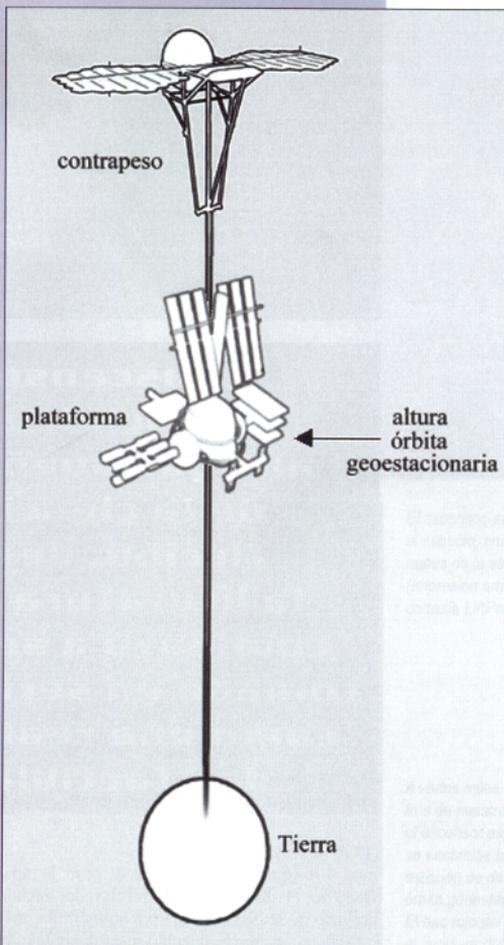
En cualquier órbita estable se compensan exactamente dos fuerzas: la atracción gravitatoria de la Tierra F_g y la fuerza centrífuga del cuerpo que gira alrededor de la Tierra F_{cf} . Es decir, la suma de ambas fuerzas es cero:

$$F_g + F_{cf} = \frac{GM}{T} + \left(\frac{2\Pi}{T}\right)^2 = 0$$

donde G es la constante de gravitación universal, M la masa de la Tierra, R es el radio de la órbita del módulo (medido desde el centro de la Tierra) y T el periodo de rotación de la órbita. En el caso de la órbita geoestacionaria, T es igual a 24 horas. Sustituyendo en la fórmula anterior los valores constantes G , M y T , obtenemos el radio que corresponde a una órbita geoestacionaria, que es $R = 42.257$ km desde el centro de la Tierra, o lo que es lo mismo, 35.891 km de altura desde la superficie del planeta.

Si todo el conjunto del ascensor espacial gira con el mismo periodo de un día (como así debe ser), la altura de la órbita geoestacionaria es el único lugar donde las dos fuerzas se anulan exactamente. En cualquier punto del ascensor situado por debajo de esta altura, la fuerza de gravedad «puede más» que la fuerza centrífuga y, cuando hacemos cálculos, la suma anterior no da cero sino una cantidad negativa, una fuerza neta «hacia abajo». De modo que todo el cable del ascensor espacial está continuamente tirando hacia abajo de la plataforma orbital. Por otro lado, en cualquier punto por encima de la altura geoestacionaria, la fuerza centrífuga es la que gana la partida y la ecuación anterior da un número positivo, con lo que la solución al problema es obvia: hay que alargar más el cable del ascensor y poner una gran masa (tal vez un pequeño asteroide) que haga de contrapeso y que, gracias a la fuerza centrífuga, tense el conjunto, para evitar que el ascensor espacial acabe cayendo.

Por ponerlo en números, un cable de dos metros de diámetro con una densidad de $1,65 \text{ gr/cm}^3$ (la densidad de la molécula del fullereno) tiraría de la plataforma geoestacionaria con una fuerza equivalente a 26 millones de toneladas (nótese que la misma masa de cable puesta sobre la superficie de la Tierra pesaría 186 millones de toneladas: ¡siete veces más!). Esta tensión producida por el peso del cable quedaría sobradamente compensada con un contrapeso de 500 millones de toneladas situado diez mil kilómetros más arriba.



Esquema básico de un ascensor espacial. (Cortesía LiftPort Inc.)

El módulo del ascensor comenzando su subida impulsado por un haz de láser. En este caso, parte de una estación flotante en el océano. (Impresión artística cortesía LiftPort Inc.)



El ascensor espacial, un antiguo sueño de la ciencia ficción, deja la literatura y comienza a ser tomado en serio como una realidad factible.

(Viene de la página 26)

mas. A los que debemos añadir, de paso, la radiación. Dado que el ritmo de ascenso del elevador inicialmente previsto no se caracterizará por su premura, los pasajeros humanos recibirían peligrosas dosis de radiación cuando pasaran por zonas donde las partículas de alta energía se hallan atrapadas en el campo magnético de

la Tierra. Por último, los propios satélites artificiales podrían ser un peligro para el ascensor. Se ha estimado que los mayores riesgos de colisión con un satélite se dan a los 912 km y 1.525 km de altura, debido a la abundancia de satélites en estas zonas.

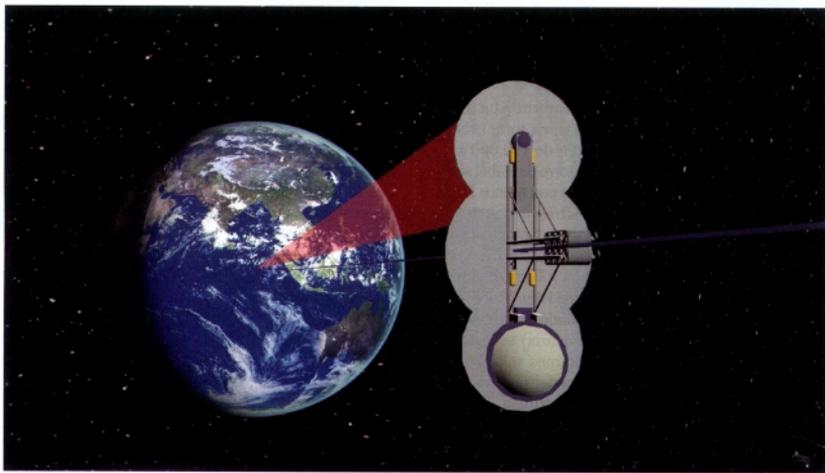
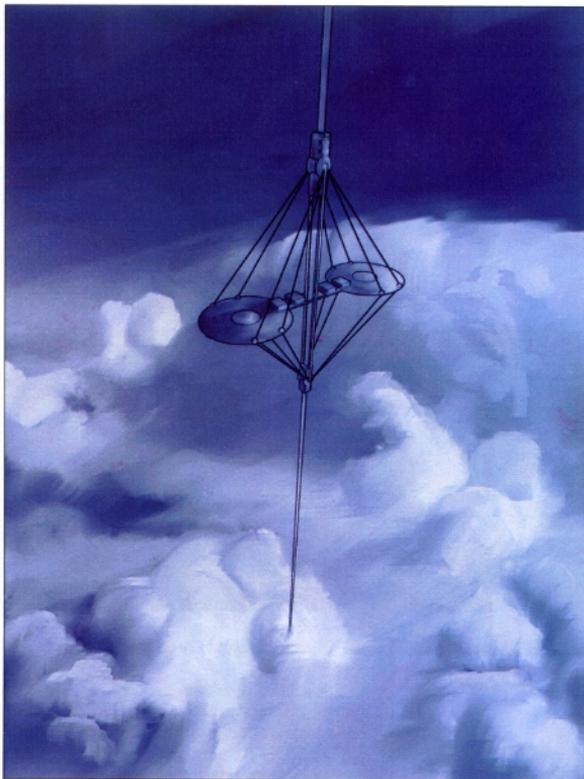
Además de estos problemas, hay otros que emanan directamente de la propia dinámica de un ascensor espacial. El principal es el efecto Coriolis. Cuando un cuerpo se halla en el ecuador sobre la superficie del planeta, su velocidad horizontal, debida al giro del planeta, es de unos 1.700 km/h. Una carga que suba por el ascensor desde la superficie del planeta tenderá a mantener por inercia esa velocidad horizontal. Pero la propia velocidad horizontal del ascensor va aumentando conforme subimos: a 5.000 km de altura, el ascensor se mueve horizontalmente a unos 3.000 km/h. La masa que sube tiene por tanto tendencia a «quedarse rezagada» respecto al cable del ascensor, produciendo como consecuencia una fuerza que tira de él «hacia atrás» (hacia el Oeste). Cuando una masa desciende por el ascensor se produce el efecto contrario: la masa, que proviene de la órbita geoestacionaria, una zona que se mueve horizontalmente a unos 11.000 km/h, desciende a zonas con una velocidad horizontal sustancialmente menor, y la inercia hace que tienda a adelantarse al cable del ascensor, tirando de él «hacia delante» (hacia el Este). Este efecto es más intenso cuanto mayor es la velocidad de ascenso/descenso y la masa que se transporta. Por otro lado, las cargas que suben pueden además afectar tam-

bién la estabilidad vertical del ascensor, ya que al subir tiran hacia abajo del conjunto con una fuerza igual a su peso (principio de acción y reacción). De igual modo, las cargas que bajan tendrán el efecto contrario.

Estos dos fenómenos se pueden fácilmente minimizar si se dispone de dos o más cables de transporte actuando a la vez. De tal forma que por unos cables suban unas cargas mientras que, al mismo tiempo, otras bajan por los otros. De esta forma, la tendencia de las cargas a tirar del ascensor en una dirección quedaría compensada por las otras cargas que viajan en sentido contrario y tirarían en la dirección opuesta. Esto es de hecho lo que se ha propuesto para el ascensor espacial; realizar primero un ascensor basado en un único cable, que estaría diseñado para una única tarea: la construcción del segundo y definitivo ascensor espacial, el cual ya contaría con cables distintos para subir y bajar, lugares de parada, módulos habitables presurizados, etc.

Torres orbitales

Existe otro tipo de ascensor espacial, irrealizable a medio plazo, pero mucho más sugestivo: la torre orbital. El concepto en que se basa es el mismo, pero en vez de un cable se trata en esta ocasión de un auténtico edificio, una torre que se eleva desde el suelo hasta el espacio, yendo más allá de la órbita geostacionaria. Este tipo de ascensor fue el centro del argumento de la novela de Arthur C. Clarke que comentábamos al principio: «Fuentes del Paraíso». También podemos encontrar la idea en la literatura de ciencia ficción española, concretamente en la excelente novela de Juan Miguel Aguilera y Javier Redal, «Mundos en el Abismo» (1988), donde estas torres reciben el nombre (por motivos obvios) de «babeles». En esta novela se lleva aún más lejos el concepto de torre orbital y se imagina una Tierra rodeada por varias torres orbitales



El ascensor, en su camino al espacio, cruzando las nubes de la atmósfera. (Impresión artística cortesía LiftPort Inc.)

A varios miles de kilómetros de nuestro planeta, el ascensor espacial se encamina hacia la estación de destino en la órbita geostacionaria. El haz rojo del láser es el impulsor del vehículo. (Impresión artística cortesía LiftPort Inc.)

LA FÍSICA DE LAS TORRES DE BABEL

Por los mismos motivos que hemos comentado para el ascensor espacial clásico, no conviene que una torre orbital comience a construirse desde el suelo porque su propio peso podría aplastarla (aunque los materiales del futuro tal vez puedan solventar esta dificultad obvia). Es conveniente construirla desde la órbita geostacionaria, haciéndola crecer desde allí al mismo tiempo hacia la Tierra y hacia el espacio.

De esta forma, la atracción hacia la Tierra que, como vimos, siente la parte de la torre que está más abajo de la órbita geostacionaria, se puede compensar con la fuerza centrífuga que siente la parte que está más arriba de esta órbita. Es decir, hay que construirla de forma que el centro de gravedad del sistema esté siempre en órbita geostacionaria.

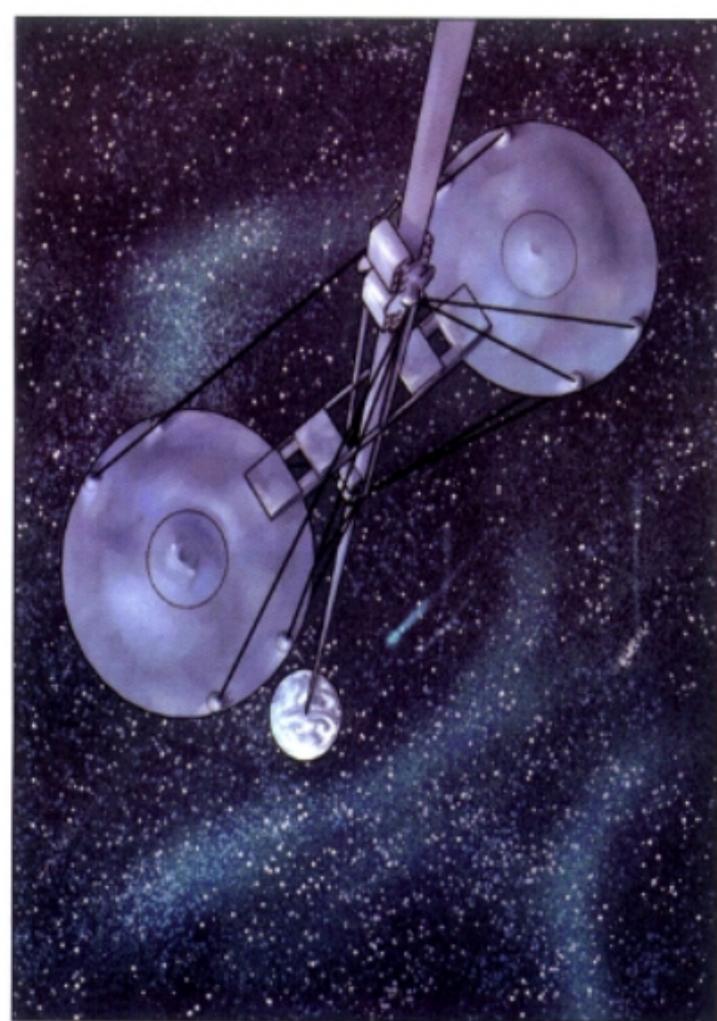
Inicialmente la torre crecería prácticamente al mismo ritmo hacia arriba y hacia abajo, pero dado que la fuerza gravitatoria aumenta conforme al cuadrado de la distancia, mientras que la fuerza centrífuga lo hace linealmente con la distancia, la atracción gravitatoria aumentará en intensidad más rápidamente, por lo que pronto habría que construir más torre hacia el espacio que hacia la Tierra para mantener equilibrado el sistema. Haciendo números, y suponiendo una torre de estructura más o menos uniforme, cuando se hubieran construido ya unos 20.000 km hacia abajo, habría que tener construidos unos 30.000 km hacia arriba para que actuara a modo de contrapeso y se mantuviera equilibrada en su órbita geostacionaria. Cuando la torre, tras construirse hacia abajo 36.000 km hasta tocar el suelo, quedara finalmente anclada al planeta, se habrían tenido que construir hacia arriba, por encima de la órbita geostacionaria, más de 100.000 km para mantener el equilibrio entre gravitación y fuerza centrífuga. En total el edificio exhibiría la brutal altura de unos 150.000 km, aproximadamente un tercio de la distancia a la Luna. Es decir, unos 50 millones de plantas (considerando unos tres metros por planta), a no ser que se usen grandes masas de contrapeso, como en el caso del ascensor de cable. El proyecto total se comería el equivalente a una gran montaña, unos diez mil millones de toneladas. Indudablemente, para construir una torre orbital sería necesario tener operativo al menos un ascensor espacial de cable.

La Torre de Babel pintada por Pieter Brueghel el Viejo en 1563. (Kunsthistorisches Museum, Viena)

ancladas a su ecuador e interconectadas por un anillo continuo en órbita geostacionaria que hace las veces de *megaestación* espacial.

Por imponderables físicos (ver recuadro «La física de las torres de Babel» más arriba), una torre orbital debería tener una altura de alrededor de 150.000 km. Una de las atracciones de semejante torre de Babel sería experimentar la gravedad de planetas con menos masa que la Tierra. En el piso un millón trescientos mil (a unos 4.000 km de altura) tendríamos la Suite Roja, en la cual la gravedad es idéntica a la de la superficie de Marte. Subiendo al piso 3 millones (9.100 km de altura) nos encontraríamos con el restaurante Blue Moon, con una gravedad igual a la lunar. Y cuando llegáramos al piso 12 millones (órbita geostacionaria) estaríamos en completa ingravidez. Si subiéramos más arriba, tendríamos que acostumbarnos a andar por el techo: a partir de ahí dominaría la fuerza centrífuga, que nos empuja «hacia fuera». Si estando allí nos asomáramos por una ventana a admirar el paisaje sobre nuestras cabezas (la Tierra, claro) y tuviéramos la mala suerte

de caer nos por la ventana, saldríamos despedidos hacia el espacio... Desgracia que nos muestra lo útil que sería una torre orbital como estación de lanzamiento de naves, que aprovecharían la energía rotacional de la Tierra para lanzarse al espacio. Con sólo soltar un satélite desde el piso 12 millones, automáticamente lo tendríamos situado en órbita geostacionaria circular, quedando fijo respecto a la rotación del planeta. Conforme subiéramos plantas, la energía rotacional daría más y más impulso y el satélite que soltáramos tendría una órbita cada vez más elíptica. Hasta que llegáramos a la planta 16 millones (47.000 km de altura). En esta planta, la velocidad de escape en ese punto coincide exactamente con la velocidad horizontal de la torre, con lo que cualquier cuerpo que se soltase desde allí escaparía de la gravedad terrestre, sin necesidad alguna de impulso adicional (no obstante no nos lo imaginemos como una centrifugadora loca; en este punto, la «gravedad» que induce la fuerza centrífuga es de tan sólo $0,4 \text{ m/s}^2$, veinticuatro veces menor que en la superficie de la Tierra). Esta planta sería el punto



de partida de las expediciones a la Luna y al Sistema Solar interior (Mercurio y Venus). Sin embargo, sin la ayuda de impulso adicional no podríamos usar la torre orbital para salir hasta Marte o más allá, ya que también debemos vencer la atracción gravitatoria del Sol. Si quisiéramos llegar hasta Marte sólo usando el empujón que da la Tierra, deberíamos hacerlo desde una altura de 330.000 km, pero, como hemos dicho, la altura total de la torre sería de unos 150.000 km, lo que daría tan sólo impulso para llegar hasta la mitad de camino a Marte.

El ascensor espacial, un antiguo sueño de la ciencia ficción, deja la literatura y comienza a ser tomado en serio como una realidad factible. Si llega a realizarse, tal vez durante nuestra vida, entraremos en una nueva era para la exploración espacial. Su construcción puede cambiar el futuro de la humanidad, puede elevarnos muy alto: ¿Y usted? ¿A qué piso sube? **A**

El ascensor espacial, a punto de finalizar su subida de 36.000 kilómetros. (Impresión artística cortesía LiftPort Inc.)

Para más información:

- Web del tercer congreso «The space elevator»: www.isr.us/SpaceElevatorConference
- La web de la compañía Liftport (The Space Elevator Company) encargada de la posible construcción de un ascensor espacial: www.liftport.com