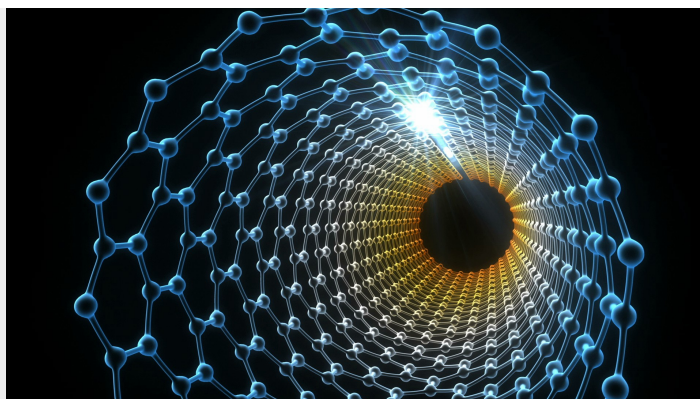


# ELEVADOR A LA LUNA

*Posted on 17 noviembre, 2016 by Francisco Alfredo García Pastor*



El concepto del elevador espacial ha atraído a múltiples escritores, visionarios y científicos que se han entusiasmado con la idea de poder dejar la atmósfera terrestre por un medio alternativo a los actuales. Uno de sus principales atractivos es la posibilidad de ascender a velocidades mucho menores a la velocidad de escape de la gravedad terrestre.

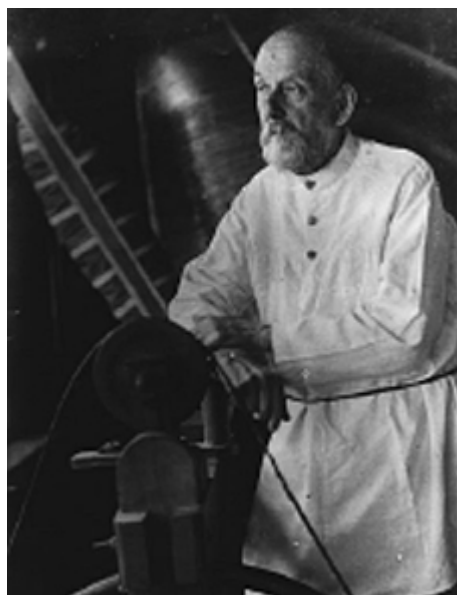
**Category:** [Ciencia](#)

**Tag:** [Ciencias Exactas](#)



**El concepto del elevador espacial ha atraído a múltiples escritores, visionarios y científicos que se han entusiasmado con la idea de poder dejar la atmósfera terrestre por un medio alternativo a los actuales.**

Uno de sus principales atractivos es la posibilidad de ascender a velocidades mucho menores a la velocidad de escape de la gravedad terrestre, permitiendo así que personas sin la condición física de un astronauta tengan la opción de sobrepasar la estratósfera. Esto abriría los viajes espaciales al gran público, en principio reduciendo los costos de los mismos.



Konstantin Tsiolkovski

Se atribuye al pionero de la aeronáutica rusa, Konstantin Tsiolkovski, la primera propuesta del elevador. Su idea recuerda a la mítica Torre de Babel, ya que consideraba que podía construirse una estructura con suficiente altura para poder alcanzar la estratosfera. Dentro de dicha estructura, se encontraría el mecanismo del elevador.

Correspondió al famoso escritor de ciencia ficción Arthur C. Clarke sentar las bases para el concepto actual del elevador. En su novela "Las Fuentes del Paraíso" (ganadora del premio Hugo en 1979), la trama se centra alrededor de la construcción de un elevador y los problemas políticos y religiosos relacionados con mover un antiguo monasterio situado en la ubicación ideal para la base. En el estilo de Clarke, en un futuro el elevador forma parte de una megaestructura análoga a una rueda, con la tierra en el eje, estaciones espaciales manteniendo órbitas geosíncronas ecuatoriales en los extremos y los cables de los elevadores espaciales conectando todo como brazos o rayos.



Fuentes del paraíso de Arthur C. Clarke

Y es precisamente en los cables y sus detalles donde se muestra el genio de Arthur C. Clarke. Prácticamente invisibles, los cables son nombrados como hiperfilamentos y son el resultado de 200 años de trabajo en física del estado sólido. El hiperfilamento es descrito como: "de unos cuantos micrómetros de espesor un cristal de diamante pseudo-unidimensional - aunque no es precisamente carbono puro. Hay varios elementos traza, en cantidades controladas cuidadosamente. Sólo pueden ser producidos en las fábricas en órbita, donde la gravedad no interfiere con el proceso de crecimiento."

*Los hiperfilamentos son el resultado de 200 años de trabajo en física del estado sólido.*

Un hiperfilamento como el descrito podría tener la capacidad de soportar la carga útil que una cápsula especialmente diseñada llevaría a órbita terrestre. Para que el elevador funcionara, necesitaría de tres elementos propios de un elevador convencional: una fuente de energía, una polea y un contrapeso. Clarke propone usar las estaciones espaciales ya existentes en el universo de su novela como polea, cápsulas descendiendo por el otro extremo del cable como contrapeso y reactores de fusión (también abundantes en ese universo) como fuente de energía.

Dejando de lado la novela, los entusiastas de la construcción del elevador espacial proponen usar un asteroide capturado y puesto en órbita geosincrónica ecuatorial (efectivamente haciendo que dicho asteroide apareciera estático en el marco de referencia terrestre) como base para la polea. Otra opción es construir una estación espacial que siga el mismo tipo de órbita descrita. Las fuentes energéticas actuales pudieran ser suficientes para elevar la cápsula y a la carga útil. Por último, también se considera usar cápsulas descendientes como contrapeso.

*Una alternativa que se ha presentado es no colocar la base del elevador en la tierra.*

Otra alternativa que se ha presentado es no colocar la base del elevador en la tierra. Podría construirse una estación espacial a medio camino entre la tierra y la luna, con la base fija en nuestro satélite. Se accedería a la estación espacial mediante la tecnología actual basada en cohetes y esto abarataría en gran medida la posibilidad de visitar la luna.

Independientemente de lo difícil de capturar un asteroide o de construir una estación espacial que sirva como base para la polea, y de si el elevador llega a la luna o no, se tiene una gran limitante: El hiperfilamento es un concepto que no tiene equivalente en la vida real. ¿O sí?

## Un tirante muy especial

El hiperfilamento descrito por Clarke es tan delgado que es prácticamente invisible al ojo humano. Sin embargo, su resistencia es tan alta que debe manejarse con carretes especiales para evitar cortarse la piel. De hecho, la resistencia de este material hipotético es tal que en la novela es capaz de mantener la tensión necesaria mientras eleva las cargas útiles a la órbita terrestre.

*El hiperfilamento descrito por Clarke es tan delgado que es prácticamente invisible al ojo humano.*

Para determinar la resistencia del material, es posible realizar el siguiente ejercicio. Se comienza con la suposición de que sólo se sube y baja una cápsula a la vez. Si cada cápsula tiene una capacidad de 50 personas, más equipo, víveres, etc., con facilidad la carga útil estaría en el orden de 5 a 6

toneladas. La estructura capaz de llevar esta carga podría tener un peso de otras 3 a 4 toneladas, cercano al de un autobús actual. Con estas consideraciones, la carga que debe soportar el hiperfilamento puede ser aproximada a 20 toneladas. De acuerdo a Clarke, el filamento tiene sólo unos cuantos micrómetros de espesor. Dado que el límite de la resolución del ojo humano sin ayuda está cerca de 200 micrómetros, es posible suponer que el espesor sea de 100 micrómetros de diámetro. Aunque el peso sería máximo en la proximidad de la superficie terrestre y disminuiría al alejarse de ésta, por seguridad se toma el caso más extremo, 20 toneladas-fuerza aplicadas en un cable de 100 micrómetros. El esfuerzo que debe soportar el hiperfilamento de Clarke está en el orden de 25,000 gigapascales (GPa). Para referencia, las super-aleaciones base níquel tiene una resistencia de un poco más de 1 GPa

*En la vida real el cable no tiene que ser invisible.*

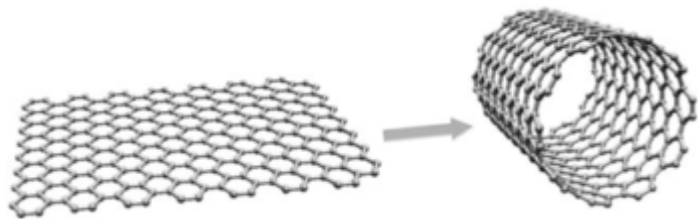
En la vida real el cable no tiene porqué ser invisible al ojo humano. Un cable tirante bien puede tener media o incluso una pulgada (25.4 mm) de diámetro, en términos prácticos el espesor de una varilla de construcción. Con este nuevo espesor y el peso calculado anteriormente, el cable debe tener una resistencia de 400 MPa, la cual es perfectamente alcanzable con el acero comercial de las varillas. Sin embargo, falta considerar el propio peso del cable. El acero tiene una densidad de  $7.85 \text{ g/cm}^3$ , con las dimensiones anteriormente consideradas, esto implicaría que cada 2 mm de cable de acero tendría un peso de 7.85 gramos. ¿Y a qué distancia estaría la estación espacial desde la superficie de la tierra? La órbita geosincrónica tiene una altitud de aproximadamente 40,000 km. El propio peso de un cable con esa longitud sería cercano a 157,000 toneladas. Y eso sólo considera un sentido del cable, faltaría considerar el extremo que regresa a la tierra. Esto incrementaría la resistencia requerida por el cable a unos 4 GPa, la cual no es alcanzable por los aceros comerciales actuales. Otros metales más ligeros y resistentes, como el titanio con una densidad de  $4.11 \text{ g/cm}^3$  y una resistencia de 1 GPa, sólo reducirían el peso del propio cable a 82,000 toneladas.

Tal vez sea necesario regresar a la historia original. Clarke dice que el material del hiperfilamento es "un cristal de diamante pseudo-unidimensional". ¿Existe algún material en la realidad basado en el carbono con estructura pseudo-unidimensional?

## **Nanotubos de carbono al rescate**

La descripción del hiperfilamento suena muy similar a la de los nanotubos de carbono. Desarrollados en la segunda mitad del siglo pasado, los nanotubos de carbono son una forma de agregación del carbono que tiene una estructura cilíndrica. En la pared del cilindro, los átomos de carbono se distribuyen de un modo idéntico a la del grafeno: En una capa monoatómica, cada

átomo está enlazado a 3 vecinos. De este modo, átomos y enlaces forman una red hexagonal.



Los nanotubos de carbono tienen propiedades impresionantes, las cuales los han llevado a ser aplicados en múltiples áreas que incluyen electrónica, óptica, nanotecnología y, por supuesto ciencia de materiales. Los nanotubos tienen diámetros de aproximadamente 1 nm, pero han sido crecidos a relaciones de longitud:diámetro de hasta 132,000,000:1. La resistencia de estos materiales en tensión está en el orden de 60 GPa. Y, como es de esperarse considerando el elemento del que están formados y la estructura que presentan, su densidad es de 1.4 g/cm<sup>3</sup>.

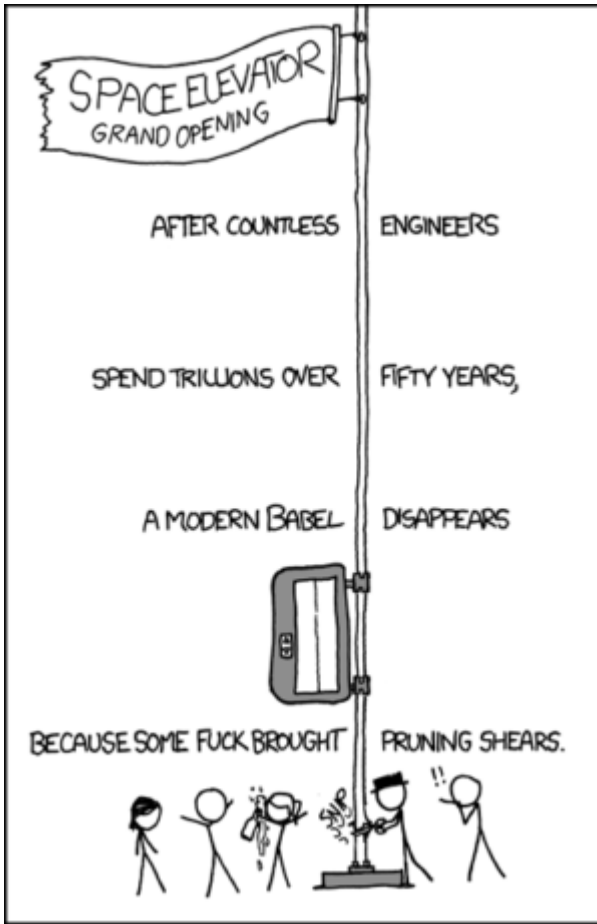
Gracias a esta increíble combinación de alta resistencia y baja densidad, los nanotubos son ahora considerados como la pieza que hacía falta para construir el elevador espacial. Los entusiastas del proyecto y las varias compañías que prometen la construcción del elevador consideran que construir o atrapar el contrapeso son tareas minúsculas al tener resuelto el material del cable. De hecho, varias compañías tanto estadounidenses como japonesas prometen tener el elevador espacial funcionando en unos 20 o 30 años. Y claro, han comenzado a solicitar apoyo financiero a gente que cree en el proyecto.



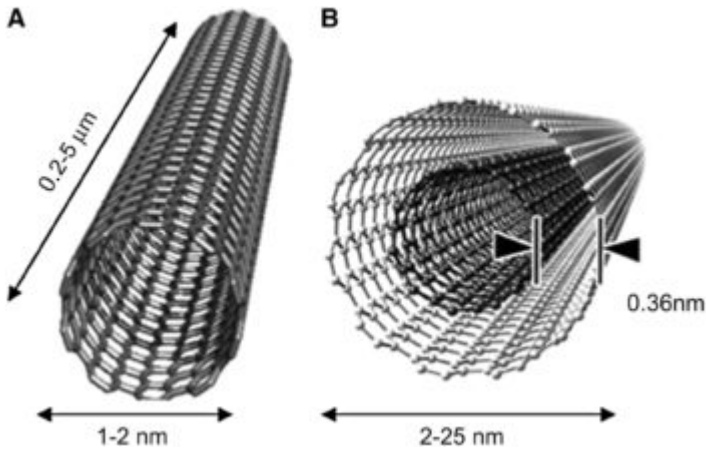
google x ascensor espacial 1

## El efecto de los defectos

Existen, sin embargo, varios problemas que abordar antes de poder soltar las campanas al vuelo. El primero de ellos tiene que ver con el hecho de que si bien los nanotubos de carbono tienen una resistencia adecuada en tensión, no son los materiales más resistentes ante esfuerzos de corte. Si se imagina una cuerda sujeta en ambos extremos, el esfuerzo en tensión es el que la cuerda recibe al ser estirada. Un esfuerzo de corte corresponde a tomar dos puntos cercanos de la cuerda y tirar de ellos en sentido contrario. ¿Por qué habría de tener esfuerzos de corte el cable del elevador? Al ir ascendiendo, la cápsula tendería a sufrir la aceleración de Coriolis, ya que la misma rotación de la tierra debe ser tomada en cuenta. El genial Randall Munroe, de la tira cómica XKCD, le dedicó un cartón a esta situación:



El otro problema es todavía más difícil de solucionar. Si bien la resistencia de los nanotubos de carbono está en el orden de 60 GPa, ésta es una resistencia teórica o bien medida en la nanoescala. Numerosos estudios han encontrado que su resistencia medida en la escala ingenieril se encuentra en el rango de 1 a 1.5 GPa. ¿Por qué esta gran diferencia?



Un estudio reciente publicado en ACS Nano por Zhu, Wang y Ding, investigadores Chinos, ([The Great Reduction of a Carbon Nanotube's Mechanical Performance by a Few Topological Defects](#)) ha tratado de esclarecer este problema. Estos investigadores describen que la aparición de un sólo defecto puntual en la estructura del nanotubo



reduce la resistencia a menos de 40 GPa. Los defectos pueden surgir al no formarse hexágonos sino heptágonos o pentágonos en la pared. Al combinarse múltiples defectos como éstos, es posible explicar la gran caída en la resistencia.

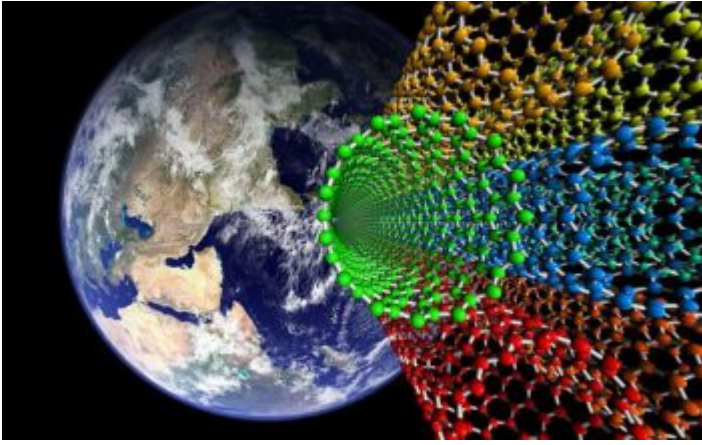
*Entonces, ¿se trata solamente de mejorar los procesos de fabricación actuales para eliminar este tipo de defectos y poder manufacturar el cable? En realidad, como suele suceder, no es tan simple.*

Para poder alcanzar una longitud de 40,000 km, un cable de nanotubos debe tener una relación de largo-ancho impresionante. Para dar un ejemplo, si tuviera una relación largo: ancho de mil millones (un gigananotubo, si se permite la expresión), un cable apenas alcanzaría un metro de longitud. Para tener la longitud requerida, la relación debe estar en el orden de un millón de millones (un terananotubo). De acuerdo a lo descrito líneas arriba, la relación necesaria es 6 órdenes de magnitud mayor a las conseguidas actualmente.

Incluso si se considera que los nanotubos fueran fabricados con altísimas especificaciones de calidad, por ejemplo: 1 defecto por cada metro, el cable en su longitud total para uso en el elevador espacial tendría un millón de defectos. De acuerdo al artículo de ACS Nano, un solo defecto disminuye drásticamente la resistencia del material.

*¿Cómo poder evitar la aparición de defectos en una estructura tan larga?*

¿Cómo poder evitar la aparición de defectos en una estructura tan larga? Aún si la función de probabilidad de que aparezca un defecto se mantiene constante a lo largo de toda la estructura, cada enlace es un nuevo evento donde puede ocurrir. Al tener una estructura tan grande, la aparición de un defecto se convierte prácticamente en una certeza. De hecho, el eliminar defectos se hace cada vez más difícil a medida que se reduce el número de los mismos. Un artículo reciente del Dr. Víctor Romero Rochín ([Entropía, irreversibilidad y la flecha del tiempo](#)) explica elegantemente el concepto de entropía. Aplicado en este caso, al reducirse el número de defectos, aumenta el número de enlaces en los que éstos pueden ocurrir. En el extremo, al tener un solo defecto, éste puede aparecer en cualquiera de los prácticamente innumerables enlaces de la estructura. Encontrarlo (y eliminarlo) es equivalente a encontrar la proverbial aguja en el pajar.



un botón. C<sup>2</sup>

Si bien los nanotubos de carbono presentan muchas propiedades impresionantes que les han permitido ser usados exitosamente en aplicaciones muy diversas, la construcción de un cable como el descrito por Clarke con ellos como base, se sigue viendo lejana. A pesar de ello, el trabajo con megaestructuras a partir de nanotubos de carbono sigue avanzando, a la par de los proyectos del elevador a la luna. Mientras tanto, vale la pena releer a Clarke e imaginar ascender a la órbita geosincrónica con sólo pulsar