

L'ASCENSOR ESPACIAL

Una alternativa als actuals coets espacials

Àrea de Ciències Experimentals – Física

CONTINGUT

1 INTRODUCCIÓ A L'ASCENSOR ESPACIAL	3
1.1 PERQUÈ ENS CAL UN ASCENSOR ESPACIAL?	5
2 L'ASCENSOR ESPACIAL	8
2.1 LES PARTS DE L'ASCENSOR	8
2.2 FONAMENTS FÍSICS	10
2.2.1 CENTRE DE MASSES	10
2.2.2 ÒRBITA GEOSTACIONÀRIA	10
2.2.3 EFECTE DE CORIOLIS	12
2.2.4 L'ATMOSFERA TERRESTRE	14
2.2.5 DIFERÈNCIA DE POTENCIAL ELÈCTRIC	16
2.3 EL CABLE	18
2.3.1 EL MATERIAL DEL CABLE: ELS NANOTUBS DE CARBONI	18
2.3.2 DEFECTES DELS NANOTUBS	22
2.3.3 EL CABLE A ESCALA MACROSCÒPICA	23
2.4 LA BASE	25
2.4.1 LA UBICACIÓ DE LA BASE	25
2.4.2 TIPUS DE BASES	26
2.5 L'ASCENSOR	29
2.5.1 LA PROPULSIÓ	30
2.5.2 EL TRANSPORT	36
2.6 EL CONTRAPÈS	37
2.6.1 UNA GRAN MASSA	37
2.6.1 UN GRAN CABLE	39
3 MUNTATGE I ECONOMIA	41
3.1 CONSTRUCCIÓ	41
3.1.1 EL MÈTODE TRADICIONAL	42
3.1.2 EL MÈTODE BRADLEY EDWARD	42
3.2 ECONOMIA	44
4 CONCLUSIONS	45
ANNEX 1: ESTIMACIÓ DE L'ENERGIA NECESSÀRIA PER L'ENVIAMENT D'UNA MASSA A L'ESPAI AMB L'ASCENSOR I AMB UN TRANSBORDADOR ESPACIAL	47
ANNEX 2: VARIACIÓ DEL PERÍODE DE ROTACIÓ DE LA TERRA	53
REFERÈNCIES I BIBLIOGRAFIA	56

1 INTRODUCCIÓ A L'ASCENSOR ESPACIAL

El 1895, el científic rus Konstantin Tsiolkovski va visitar París. Com no podia ser d'altra manera, en aquell viatge va veure una de les construccions més espectaculars que havia creat l'home, la Torre Eiffel.

Inaugurada 6 anys abans, en motiu de l'Exposició Universal celebrada a la capital francesa, representava la culminació de l'enginy humà en plena Revolució Industrial. La capacitat de l'home per modificar la natura havia arribat, en aquells anys de pas del segle XIX al XX, a un punt mai assolit en la Història. Els constants avenços de la ciència i el progrés de la tècnica conduïen a una victòria rere una altra en el camp de l'enginyeria, amb la construcció de grans ponts, edificis cada cop més alts, i també grans millores en la indústria metal·lúrgica.

Però allà on la majoria veia només la màxima expressió de la tecnologia humana sobre la Terra, Tsiolkovski hi va veure el primer pas de la tecnologia humana cap al cel.

La visita a París li va inspirar la idea de l'ascensor espacial, un mètode d'escurçar el camí cap a les estrelles i l'exploració espacial. I el sistema era aclaparadorament senzill, ja l'havien aplicat els constructors dels zigurats babilonis feia 4000 anys: si vols arribar al cel, construeix una escala que t'hi porti. I Tsiolkovski, que era astrònom, intentava com tots els seus companys arribar al cel per haver de deixar de mirar les estrelles des de la Terra i començar a poder fer-ho des de l'espai exterior, més enllà de l'atmosfera.

Des de la idea inicial de l'ascensor espacial que tingué Tsiolkovski fins al concepte actual han passat més de 100 anys, i ha sofert moltes modificacions. El científic rus va posar les bases, i la idea ha resultat ser més complexa del que ell imaginava, però no per això irrealitzable.

I què és un ascensor espacial? Ens referim a una cosa substancialment molt similar a un ascensor normal i corrent, ja que es basa en els mateixos principis. Simplificant la idea, es tracta d'un cable llarg, molt llarg, ancorat a la Terra i simultàniament a l'espai, en un contrapès. Al llarg d'aquest cable, que mesura 36 000 quilòmetres, hi circulen els ascensors que han de servir de contacte entre l'espai exterior i el planeta. La rotació de la Terra estabilitza el sistema, ja que les tensions del cable queden compensades.



El científic rus Konstantin Tsiolkovski, pare de l'ascensor espacial modern.

La longitud del cable no pot ser qualsevol, es tracta de la necessària per a que el cable tingui el seu centre de masses situat en el punt d'òrbita geostacionària, és a dir, l'estació terminal estigui sempre en el mateix punt sobre la Terra sense haver de fer correccions de l'òrbita. D'aquesta manera, es pot deixar anar la càrrega de l'ascensor just a l'alçada necessària per a que orbiti, en el cas d'un satèl·lit meteorològic o de telecomunicacions, o, per exemple.

L'ascensor aniria acoblat a aquest cable i seria capaç de pujar i baixar càrregues útils molt superiors a les actuals, que només són d'unes poques tones, i a un cost molt menor.

HISTÒRIA DE LA IDEA

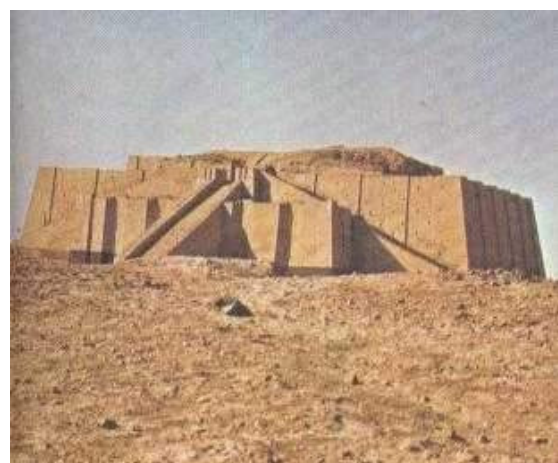
Com ja s'ha dit, els primers "precedents" de l'ascensor espacial van ser els zigurats babilonis, que van introduir la idea de la torre per arribar al cel. L'exemple més famós el trobem en l'antic bíblica mite judeocristià de la Torre de Babel, probablement una deformació literària de les piràmides autèntiques de Babilònia.

Després trobem la idea de Konstantin Tsiolkovski, el 1895. Tot i que el que ell pretenia era quelcom diferent a un ascensor: es tractava d'una mena de "castell celestial", unit a la terra per un cable i una torre similars a la seva font d'inspiració, la Torre Eiffel.

Els viatgers i la càrrega pujaven i baixaven per aquest cable fins al castell situat a l'espai exterior. Va ser el primer en proposar que el castell estigués en òrbita geostacionària.

El 1905 John McCarthy va estudiar seriosament la possibilitat de la construcció de l'ascensor vers els anys 50, proposant un cable cònic que disminuís d'amplada amb l'alçada. La idea es va desestimar perquè la tecnologia del moment no ho permetia: el material disponible, l'acer, era massa pesant. El següent intent seriós data dels anys 60, quan el rus Yuri Artsutanov va proposar per primer cop una forma del carboni, el grafit, com a material.

La popularització de la idea va venir més tard, quan als anys 70 l'escriptor Arthur C. Clarke va publicar el seu llibre *"Fountains of Paradise"*. Va proposar utilitzar fibres de carboni per a la construcció del cable, i també suggerí que el contrapès necessari fos un asteroide en òrbita geosíncrona. Des de llavors la idea ha estat àmpliament present en moltes novel·les de ciència ficció, i així seria encara ara sinó fos per la descoberta, el 1991, d'un nou material aparentment capaç de suportar les condicions extremes a que estaria sotmesa l'estructura: els nanotubs de carboni, 100 cops més resistent que l'acer i 6 vegades més lleugers.



El Zigurat d'Ur a l'actualitat. Antigament, per sobre dels pisos que encara queden se n'erigien d'altres, creant una mena de piràmide esglaonada.

A partir d'aquest moment, l'ascensor espacial passa a ser una idea plenament realitzable. Només fa falta la tecnologia per elaborar el cable prou llarg i la voluntat de les nacions: més aviat o més tard s'aconseguirà.

1.1 PERQUÈ ENS CAL UN ASCENSOR ESPACIAL?

NECESSITEM EXPLORAR L'ESPAI...

Hi ha gent que es pregunta perquè cal explorar l'espai, si resulta tant costós i aparentment no aporta cap benefici a la humanitat.

Arribarà un moment en que als humans la Terra se'ns quedarà petita. De la mateixa manera que als europeus se'ns va quedar petita Europa al segle XVI i vam iniciar l'exploració del món, i als polinesis les seves illes i van colonitzar el Pacífic, l'espècie humana necessita nous espais per habitar, on poder continuar el desenvolupament, viure i treballar.

Encara és molt aviat per parlar de colonització d'altres planetes, fins i tot pel que fa al nostre Sistema Solar o la Lluna mateixa. Però actualment ja necessitem l'espai exterior en la nostra vida quotidiana: moltes coses de les que fem diàriament depenen de que el controlem. És fàcil fer-ne una llista: la televisió, Internet, el telèfon... tots aquests són, sens dubte, invents que han canviat radicalment la nostra forma de vida, millorant-la i facilitant-nos-la. Però aquests serveis depenen de satèl·lits artificials al voltant de la Terra, i d'alguna manera els hem de posar en òrbita allí dalt.

Però no només és qüestió de satèl·lits. Actualment, a l'Estació Espacial Internacional s'estan duent a terme importants investigacions en medicina i biologia gràcies a l'ambient específic de

microgravetat (que evidentment només es dona a l'espai exterior), investigacions que clarament repercutiran en la qualitat de vida aquí baix, a la Terra.



La Estació Espacial Internacional (ISS), un projecte compartit per diferents agències aerospacials del món, consta de diferents mòduls amb laboratoris que s'aprofiten de les condicions especials que es donen a l'espai.

Així, si algú diu que l'exploració espacial és un esforç inútil que no aporta beneficis a la humanitat, s'enganya: no ho és. Hi tenim molt a guanyar, l'espai és la nostra nova frontera i s'ha de creuar tard o d'hora.



Aquest és el mòdul Columbus de la ISS, elaborat per l'Agència Espacial Europea (ESA). Allotjarà laboratoris de fisiologia, física de fluids i biologia.

...PERÒ EL SISTEMA ACTUAL NO FUNCIONA

L'enviament de satèl·lits, el proveïment de la Estació Espacial Internacional, les missions tripulades o no a altres llocs del Sistema Solar... requereixen viatges continus entre la superfície terrestre i l'espai exterior. Actualment, aquests viatges s'efectuen mitjançant els coets espacials, d'un sol ús, com els Ariane de l'Agència Espacial Europea o els Soyuz russos, o reutilitzables com les llançadores de la NASA.

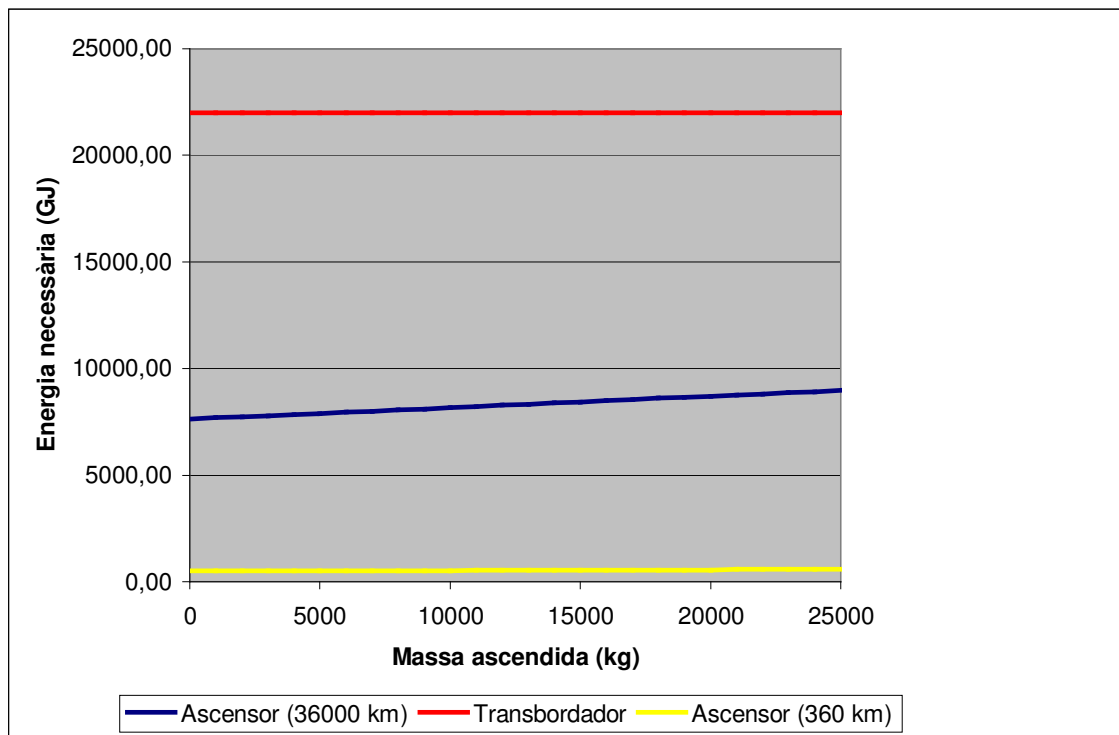
La idea és senzilla i coneguda per tots, es basa directament en el Tercer Principi de Newton (d'acció-reacció): carregar el coet d'una massa que anirà ejectant progressivament, per assolir amb la força de reacció la velocitat que li permeti abandonar la òrbita terrestre i sortir a l'espai exterior. Si es té en compte que la massa de reacció per a assolir aquesta velocitat consisteix en grans quantitats de material explosius i altament volàtil, sembla estrany que no s'hagin produït més accidents com els dels transbordadors nord-americans Challenger i Columbia.

No obstant la simplicitat dels principis que regeixen els transbordadors i els coets espacials, el seu elevat cost fa que, en molts casos, no resulti rendible. Així doncs, es fa necessari trobar un millor sistema per a enviar tots els objectes que calgui a l'espai exterior.

La nostra aposta per a substituir l'actual sistema de transport entre la **Terra** i l'**espai** és l'**ascensor espacial**. Ara bé, és realment aquest sistema més rendible (és a dir, amb menys consum energètic) que els transbordadors actuals?

Per tal de demostrar la poca rendibilitat de l'actual sistema respecte els ascensors, només cal comparar la quantitat d'energia necessària per posar una mateixa massa en òrbita amb un transbordador i l'ascensor.

El següent gràfic mostra, precisament, l'energia en GigaJoules emprada per a portar un transbordador a 360 km sobre la superfície (22.000 GJ) i la requerida per a pujar un ascensor fins a la mateixa altura i fins a una altura de 36.000 km, per a diferents càrregues.



Com es pot veure, per a la mateixa altura final l'energia necessària en el cas de l'ascensor és una fracció molt petita de l'emprada en pujar el transbordador (2-2,5%, en funció de la càrrega) i fins i tot pujar l'ascensor fins a 36.000 km requereix menys energia (35-40%) que el transbordador fins només 360 km. Les dades i càlculs emprats per a elaborar aquest gràfic poden trobar-se a l'annex 1.

2 L'ASCENSOR ESPACIAL

2.1 LES PARTS DE L'ASCENSOR

Tot i que pugui semblar impossible la construcció d'una estructura per a un ascensor de més de 36 000 km d'alçada, tot és qüestió de plantejar-ho correctament.

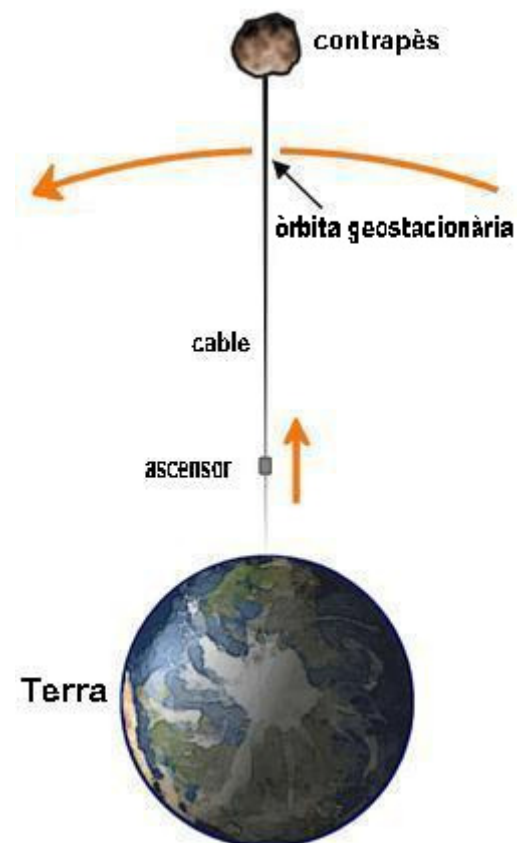
No es tracta d'una torre, ni tan sols d'un ascensor pròpiament dit amb el seu motor per a pujar i baixar càrrega, sinó que és única i exclusivament el cable. Els vehicles hauran de propulsar-se ells mateixos al llarg de la construcció, el complex no tindrà cap mètode propi. I, òbviament, aquesta immensa estructura necessita dos punts de suport: un a la Terra i l'altre a l'espai.

És a dir, podem dividir el projecte en diferents parts que estudiarem per separat:

- El **cable** encarregat d'unir la Terra i l'espai. La seva construcció i muntatge representen una de les parts més importants del projecte: cal una fibra contínua de més de 36 000 km, prou resistent per aguantar les colossals tensions a que estarà sotmesa i a la vegada prou lleugera per no generar pressions sobre la base que la pròpia estructura no pugui resistir.

La solució sembla que l'ofereixen, com es veurà, els nanotubs de carboni, una nova família de materials que ofereix moltes possibilitats.

- L'**ascensor** o *climber*, és a dir el vehicle que es propulsarà a si mateix amunt i avall del cable. Aquí entren diversos temes, com la seva càrrega, el mètode de propulsió... També ha de tenir una estació d'arribada, situada en el punt d'òrbita geosíncrona, que podria coincidir o no amb el contrapès.



Esquema de l'ascensor espacial. La distància de la superfície terrestre a l'òrbita geosíncrona és de 35 900 km. Fins al centre de masses terrestre, és de 42 000 km

- La **base** és el punt de suport on el cable queda lligat a la Terra. S'han de tenir en compte diversos factors per a la seva planificació, ja que la ubicació depèn de factors atmosfèrics, i ha de ser forçosament un indret sobre l'equador terrestre.
- El **contrapès** que, situat a l'extrem manté dret el cable. La naturalesa del contrapès és motiu de divergències: es pràcticament capturar un asteroide, o la Terra n'haurà de proveir el material? Aquest element estarà situat per sobre de l'òrbita geosíncrona, ja que l'objectiu és que el centre de masses del sistema cable - contrapès quedi en aquest punt.

HIPÒTESIS

D'aquests quatre aspectes n'hi ha 2 que són els més complicats i els que tractarem amb més profunditat: el cable i l'ascensor. Els altres dos, la base i el contrapès, tenen uns fonaments més senzills.

Degut a que hi ha diferents possibilitats per a desenvolupar cadascuna de les parts esmentades (diferents tipus de material per al cable, diferents tipus d'ascensor i maneres de moure'ls...), per als temes bàsics ens agafarem a 2 hipòtesis que desenvoluparem amb més profunditat. Les dues **hipòtesis** que desenvoluparem seran les següents:

- 1) Per al **cable**, assumirem com a material per a la seva construcció els **nanotubs de carboni**. Hi ha altres mitjans, com per exemple fibres derivades del plàstic com la Dyneema, que no seran analitzats en aquest treball.
- 2) Pel que fa l'**ascensor** la nostra hipòtesi es basarà en la utilització de la **levitació magnètica** com a forma de desplaçament, combinada amb la **propulsió làser**.

Per al contrapès i la base analitzarem les diferents idees que s'han proposat, ja que cadascuna ofereix unes oportunitats i opcions singulars però que no representen grans canvis en l'estructura del projecte.

2.2 FONAMENTS FÍSICS

En aquest apartat s'expliquen el conjunt de fenòmens i elements que cal conèixer prèviament per a una millor comprensió del concepte de l'ascensor espacial.

Aquests fonaments són explicats en general i més endavant seran detallats amb precisió i aplicats al cas concret de l'ascensor.

2.2.1 CENTRE DE MASSES

El **centre de masses** d'un sistema discret és el punt geomètric que dinàmicament es comporta com si estigués sotmès a la força resultant de totes les forces del sistema, és a dir, és el punt representatiu de tot el sistema. És a dir, es considera que en el centre de masses d'un cos determinat s'hi troba concentrada tota la massa del cos. S'utilitza en anàlisis físics en els que no cal tenir en compte la distribució de masses dels cossos, com la física de les òrbites, per exemple.

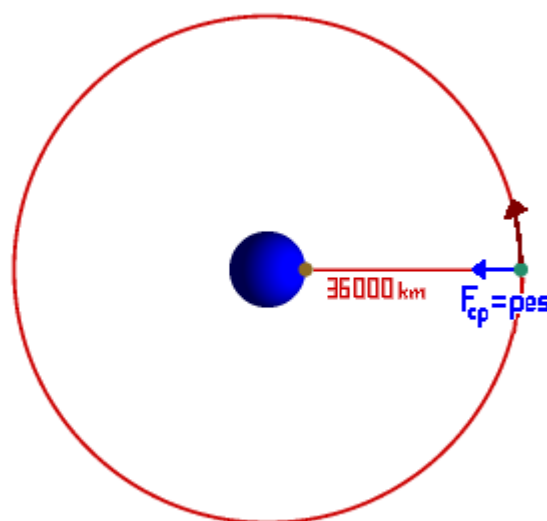
Cal procurar no confondre el **centre de masses** amb el **centroide** i amb el **centre de gravetat**. En física aquests 3 conceptes poden coincidir en un mateix punt, però designen idees diferents: el centroide és el centre purament geomètric d'un cos. Coincidiria amb el centre de masses si el cos tingués una densitat homogènia i propietats tals com la simetria. I el centre de masses i el centroide coincidirien amb el centre de gravetat si el cos en qüestió complís la primera condició i es trobés en un camp gravitatori.

2.2.2 ÒRBITA GEOSTACIONÀRIA

Una **òrbita geostacionària** és una forma d'**òrbita geosíncrona** situada directament a sobre de l'equador terrestre (a 0° de latitud).

Les òrbites **geosíncrones** són aquelles que tenen un període de rotació exactament igual al període de rotació del cos al voltant del qual orbiten (en aquest cas, 24 hores a la Terra). Així, completen una volta sencera en el mateix temps que el planeta.

Des de la superfície del planeta, una objecte en òrbita geostacionària apareix quiet, en un punt fix del cel (es



A l'alçada de 36 000 km, tota la força necessària per a que giri el satèl·lit al voltant de la Terra (força centrípeta, F_{cp} , l'aporta el propi pes del satèl·lit.

troba estacionari respecte del punt de la superfície). El satèl·lit segueix el moviment de rotació de la superfície, ja que la seva velocitat angular és la mateixa que la del planeta.

Qualsevol objecte que orbiti al voltant d'un altre cos amb la mateixa velocitat angular a la que aquest rota es trobaria en òrbita geostacionària, però es diu que l'alçada d'òrbita geostacionària és de **35.786 km**. Això és perquè, a una altra alçada, per orbitar amb la mateixa velocitat angular que la Terra, cal fer un aportament d'energia per aconseguir la força centrípeta (F_{cp}) necessària per a que giri correctament.

En el cas dels 35.786 km, tota la força centrípeta necessària per a girar l'aporta el pes del cos cap al planeta, de manera que és l'alçada òptima per a la situació de satèl·lits ja que no cal cap despesa per a mantenir-lo en òrbita. En el nostre cas, en lloc d'un satèl·lit hi posarem l'ascensor espacial, o més concretament el seu centre de masses.

Deducció de l'altitud de l'òrbita geostacionària

Hem definit l'altitud de l'òrbita geostacionària com aquella en que tota la força per a girar (F centrípeta) l'aporta el pes:

$$F_{centrípeta} = F_{pes}$$

O el que és el mateix:

$$m_{satèl·lit} \times a_{centrípeta} = m_{satèl·lit} \times a_{gravetat}$$

$$a_{centrípeta} = a_{gravetat}$$

Ara cal trobar els valors de l'acceleració centrípeta i la de la gravetat a aquesta alçada:

$$|a_{centrípeta}| = \omega^2 \times r \qquad |a_{gravitacional}| = \frac{G \times M_{Terra}}{r^2}$$

On els valors:

$$\omega = \text{velocitat angular de la Terra i del satèl·lit} = 7,29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

$$G = \text{constant de gravitació universal} = 6,6742 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / \text{kg} \cdot \text{s}^2$$

$$M_{Terra} = \text{massa de la Terra} = 5,9736 \times 10^{24}$$

Si igualem les dues equacions de les acceleracions podem obtenir el radi que ha de tenir el moviment orbital, i ens dona:

$$\omega^2 \times r = \frac{G \times M_{Terra}}{r^2}$$
$$r = \sqrt[3]{\frac{G \times M_{Terra}}{\omega^2}} = 42.164 km$$

Aquests **42.164 km** es converteixen en **35.786 km** si se li substraen els 6378 km de radi de la Terra. És a dir, l'ascensor es troba a 42.164 km del centre de masses del planeta i a 35.786 km de la seva superfície. Per defecte aquesta distància serà referida al treball com a 36.000 km per aproximar.

2.2.3 EFECTE DE CORIOLIS

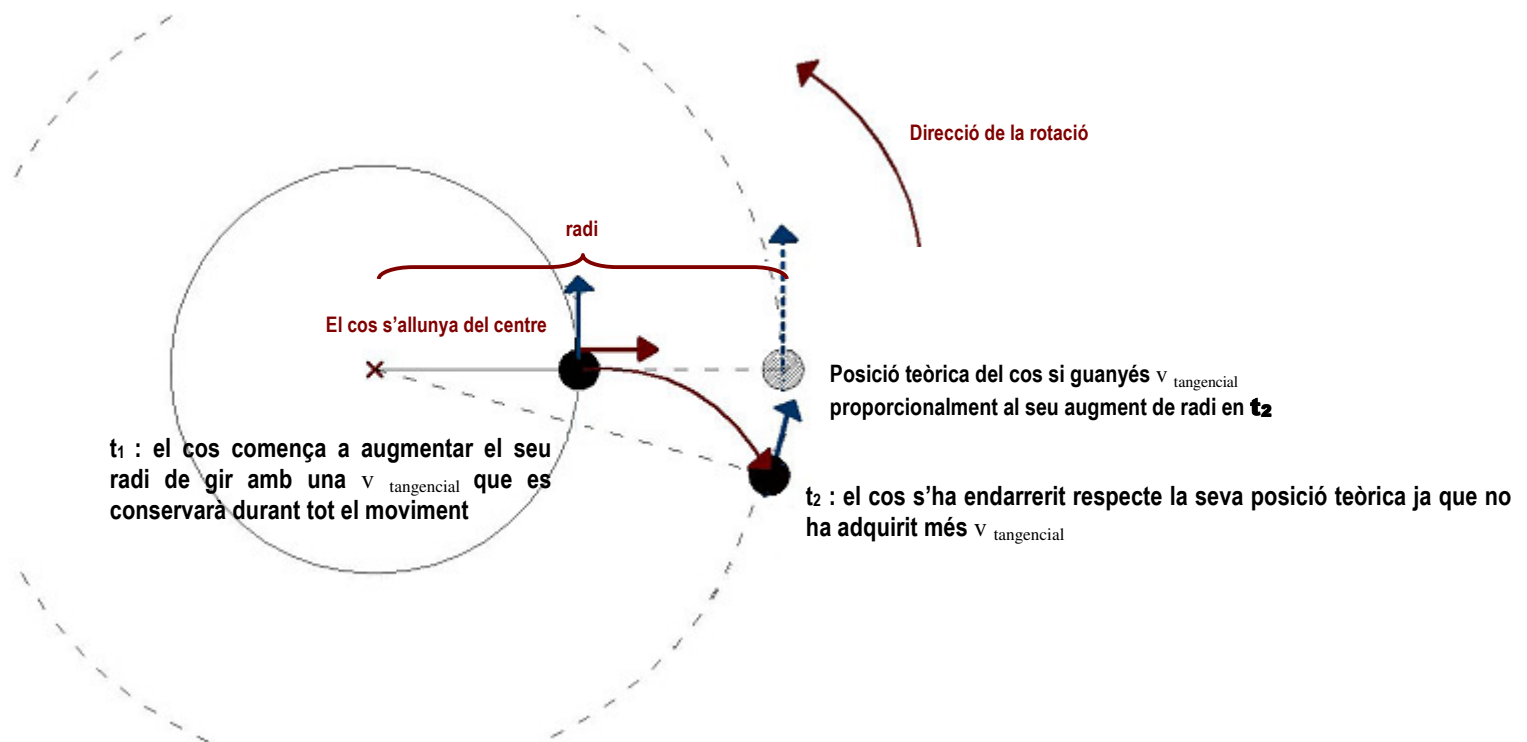
L'**efecte de Coriolis** és una força aparent d'inèrcia que sofreix un cos que s'està movent en un sistema de referència en rotació. Aquest efecte és atribuït a la fictícia força de Coriolis.

Els cossos que estan en moviment rotacional o circular uniforme tendeixen a conservar la velocitat tangencial que tenen inicialment i que està associada, amb el radi que tenen en aquell moment, a la velocitat angular a la que giren.

Però si es dona el cas en que el radi en que el cos gira varia (el cos s'allunya o s'apropa del centre de rotació), la velocitat tangencial del nou radi associada a la velocitat angular constant serà diferent a la que tenia al principi. Com el cos tendeix a mantenir la velocitat tangencial constant, notarà una força (fictícia) que el desplaça respecte la posició que hauria de tenir amb la nova velocitat (que no agafa).

Aquesta força falsa és la **força de Coriolis** i l'acceleració associada és l'**acceleració de Coriolis**.

En el cas de l'ascensor espacial, quan aquests ascendeix pel cable es considera que està augmentant el radi respecte el seu centre de rotació (el centre de la Terra), i quan està baixant redueix el radi. L'objectiu és **compensar l'efecte Coriolis** per a que l'ascensor ascendeixi i baixi recte.



Explicació de l'efecte Coriolis: $v_{\text{tangencial}}$ que portava el cos en el moment t_1 , es conserva, de manera que en el t_2 , en lloc d'augmentar (com li correspondria a causa de l'augment de radi i la conservació del moment angular) té la mateixa $v_{\text{tangencial}}$ i s'ha produït un endarreriment respecte la posició que hauria d'ocupar si el moment angular s'hagués mantingut constant. Per tant, el cos ha "notat" com una força l'empenya per a desviar-lo: aquesta força fictícia o d'inèrcia és la **força de Coriolis**.

En el cas que el cos efectués el moviment contrari (aproximació al centre disminuint el radi) l'efecte seria justament el contrari: el cos tindria un excés de $v_{\text{tangencial}}$ que no reduiria, de manera que s'avançaria massa.

La Terra gira en direcció est. L'ascensor a nivell terrestre, doncs, tendeix a conservar la petita velocitat tangencial que té associada a la superfície del planeta. Amb l'ascensió i l'augment del radi, aquesta velocitat tendria a conservar-se endarrerint l'ascensor i provocant-ne un desplaçament cap a l'oest. I quan baixa, tendeix a conservar l'elevada velocitat tangencial que té a dalt de tot, de manera que es desplaça cap a l'est.

Podem calcular la **força de Coriolis** que ha de vèncer un cos per a poder ascendir recte (que al cap i a la fi és el que volem que faci l'ascensor) si sabem a la velocitat a la que pujarà l'ascensor segons la següent fórmula:

$$F_{\text{Coriolis}} = -2m \times (\omega \times v)$$

On:

ω = velocitat angular del sistema (que es manté constant)

v = velocitat a la que l'ascensor ascendeix allunyant-se del centre de la Terra

Per tal de compensar l'efecte Coriolis i evitar el desplaçament a l'est/oest de l'ascensor, hi ha diversos mètodes. Un dels més estudiats i considerats factibles és la utilització de petits reactors que, situats al llarg del cable, compensin el desplaçament.

2.2.4 L'ATMOSFERA TERRESTRE

En aquest apartat no es descriu un fonament físic, però cal considerar que l'atmosfera és la zona per on passa l'ascensor possiblement més complexa i on es donen els fenòmens físics més interessants de tot el recorregut de l'ascensor.

L'**atmosfera** terrestre és la capa gasosa que envolta el nostre planeta. A nivell de la superfície la seva composició és d'un 78,1% de nitrogen, un 20,94% d'oxigen i el 0,96% restant d'altres gasos: diòxid de carboni, argó, vapor d'aigua, ozó, heli...

Les condicions físiques de temperatura, pressió, càrrega elèctrica, densitat... varien molt entre les diferents capes de l'atmosfera, de manera que els fenòmens que afecten l'ascensor en cada tram també són diferents. Per això procedirem a desglossar les diferents parts de l'atmosfera i les seves característiques, útils de conèixer abans d'entrar en detalls respecte l'ascensor espacial.

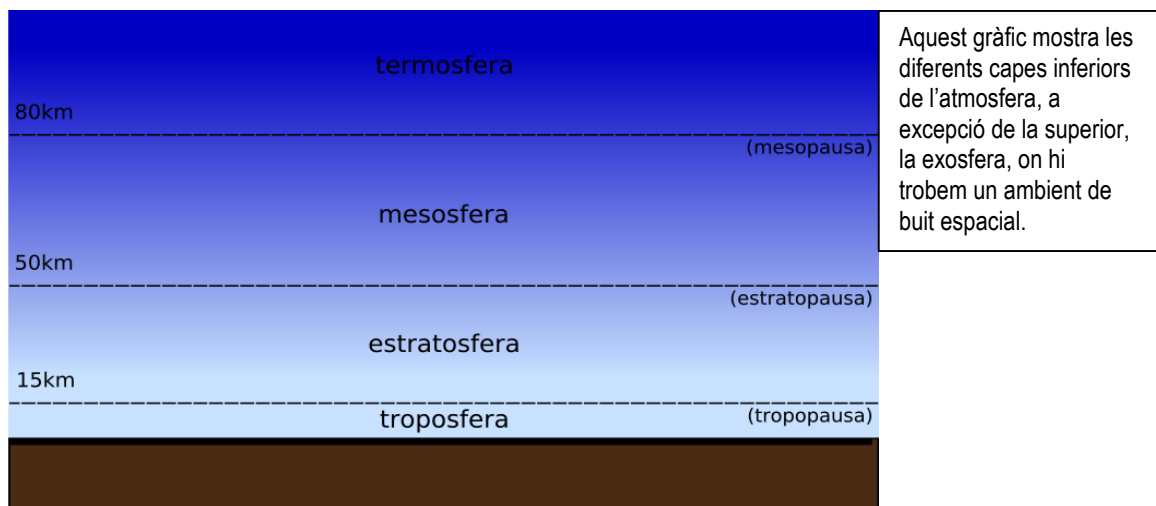
- 1) La **troposfera** és la capa inferior de l'atmosfera terrestre. Comprèn des de la superfície terrestre fins a 6-18 km d'alçada. És la zona més turbulenta de l'atmosfera i on tenen lloc els fenòmens meteorològics, per tant és en aquests primers quilòmetres on s'ha de tenir en compte l'efecte dels vents, tempestes elèctriques... És també la zona amb més pressió i densitat de l'aire, per la qual cosa és la zona amb més fregament.

La temperatura mitjana a la part inferior és de 14°C. Llavors descendeix progressivament amb l'altura fins arribar als 0°C al seu límit superior. En aquest punt trobem la **tropopausa** (zona intermèdia amb la capa superior).

- 2) La **estratosfera** és la segona capa de l'atmosfera. Comprèn entre 11-50 km d'altura. Just després de la tropopausa la temperatura es manté pràcticament constant i hi ha poca humitat. A partir dels primers quilòmetres la temperatura creix amb l'altura. Això es deu a que l'estratosfera allotja la capa d'ozó, que absorbeix fortes radiacions electromagnètiques de l'espectre ultraviolat. La densitat comença a baixar, de manera que a partir d'aquesta capa el fregament comença a ser menyspreable. L'**estratopausa** és la zona d'inflexió de la tendència de la temperatura, que començarà a disminuir a la següent capa.

- 3) La **mesosfera** és la tercera capa. S'estén dels 50 als 80 km. La tendència de la temperatura és inversa a la capa inferior: disminueix amb l'altura. Al punt màxim, cap als 80 km arriba a -90°C . A pesar del seu gruix conté tan sols el 0,1% de l'aire de l'atmosfera, de manera que la densitat de l'aire allí és molt menor. La **mesopausa** és la zona prèvia a la capa superior. És on s'assoleixen les temperatures més baixes de tota l'atmosfera (i per tant la zona on els problemes derivats de la congelació són més intensos) i on comença la ionització de l'aire.

- 4) La **termosfera** o **ionosfera** és la capa més calenta de l'atmosfera. Va des dels 80-90 km aproximadament (fi de la mesosfera) als 500-600 km, en funció de la zona. La temperatura hi ascendeix exponencialment amb l'altura. És en aquesta capa on la radiació d'ona curta del Sol és absorbida per l'atmosfera. Aquesta radiació altament energètica produeix la ionització dels gasos que componen l'aire, cosa que permet assolir temperatures de fins a 1.500°C si el Sol està actiu. Els gasos ionitzats es comporten a la vegada com gasos tènues i plasma. La densitat de l'atmosfera és, molt baixa i el fregament pràcticament inexistent.



- 5) La **exosfera** és la darrera capa. Els seus límits no estan gaire definits: des dels 500-700 km fins als 1 000 km o a vegades fins als 10 000 km d'alçada. A aquestes alçades s'hi troba pràcticament un ambient de buit, només conté unes petites traces d'hidrogen i heli abans del buit espacial complet, i també s'hi troba matèria en forma de plasma. El concepte tèrmic desapareix perquè ja no hi ha pràcticament agitació molecular.

2.2.5 DIFERÈNCIA DE POTENCIAL ELÈCTRIC

Un dels experiments que s'han dut a terme amb referents a l'ascensor espacial va consistir en el desplegament d'uns 19 quilòmetres de cable amb un coet. Aquest prototip va generar milers de volts de potencial elèctric i kilowatts de potència a l'extrem del cable que esclataren al voltant de l'aïllament del cable degut a la diferència de potencial amb la part inferior. L'arc d'electricitat produït entre la part superior i la inferior comportà una important descàrrega al cable.

Si tenim en compte que l'ascensor tindria una llargada de 36 000 km o de 100 000 (les dues hipòtesis possibles), la descàrrega que es podria produir seria, òbviament, molt més gran.

Aquest fenomen es deu a una sèrie d'aspectes:

- 1) Les **propietats elèctriques** de l'**atmosfera** terrestre. A l'atmosfera s'hi produeixen diferències de voltatge i càrrega acumulades en base a l'activitat de tempestes, la ionosfera, etc.

Les **tempestes** produeixen diferències de voltatge molt altes que acaben produint descàrregues elèctriques en forma de llampec, prou energètiques com per malmetre el cable. Així doncs, cal evitar en la mesura del possible aquestes descàrregues, com es veurà més endavant.

La **ionosfera** també produeix acumulacions de voltatge i possibles descàrregues ja que els gasos ionitzats esdevenen plasma i es poden acoblar al cable induint-hi, amb la seva càrrega, un corrent elèctric. Cal tenir en compte, però, que la densitat de plasma és baixa en aquestes alçades i que hi haurà poc acoblament entre el plasma i el cable.

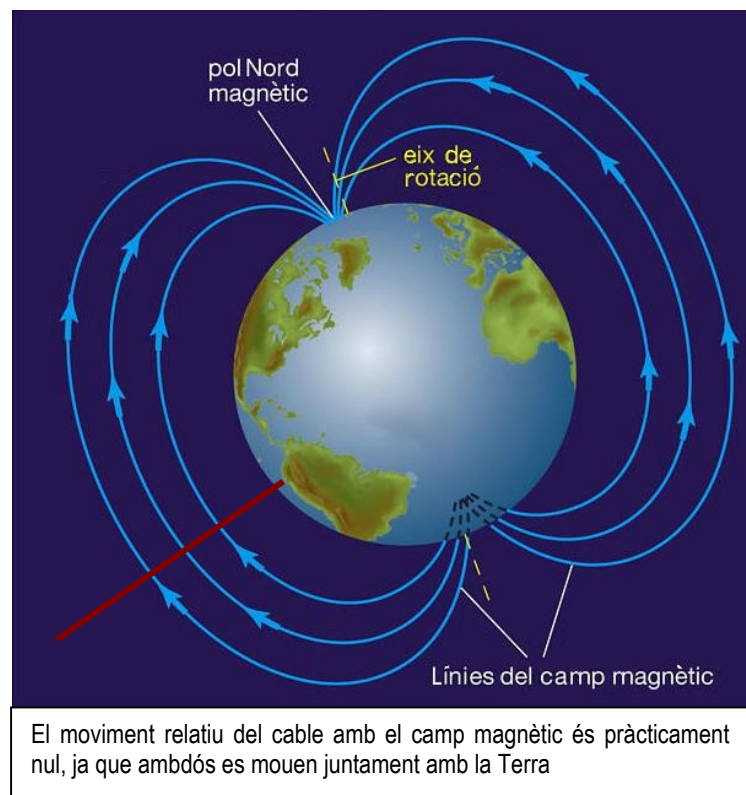
- 2) A fora de l'atmosfera també hi ha plasma, de manera que l'acumulació de **plasma espacial** pot induir càrrega elèctrica al cable a l'espai exterior. La densitat del plasma, però, també és molt baixa i suposa un volum de càrrega bastant petit. A més s'ha de tenir en compte que la càrrega col·lectada pel cable és tan d'ions positius com de negatius, de manera que el fenomen queda compensat per sí sol en gran mesura.

Si una càrrega s'acumula, això fa pujar el potencial del cable en un sentit o un altre (positiu o negatiu). Llavors la càrrega del mateix signe es desplaça i s'atrau la de signe oposat. Aquest efecte pot ser útil per a fer moure l'ascensor al llarg del cable, com es veurà més endavant.

- 3) L'altre factor que hi influeix decisivament és el **moviment del cable pel camp magnètic terrestre**. Quan un cable conductor es mou en un camp magnètic es produeix en aquest cable una corrent elèctrica, que és més gran com més fort sigui el camp magnètic i més alta sigui la velocitat. El cable de l'ascensor s'estarà movent, segons en quins trams, en dos camps magnètics diferents: el terrestre i l'interplanetari. A cap de les dues zones es pot dir que s'hi acumuli un gran potencial elèctric per diferents raons.

Als primers quilòmetres el cable es troba sotmès al **camp magnètic terrestre**, bastant potent. Però la velocitat del seu desplaçament relatiu amb aquest camp és molt petita, ja que només es tracta d'oscil·lacions.

Als quilòmetres superiors el cable està sotmès al **camp magnètic interplanetari** i sí que té un desplaçament relatiu a aquest camp força gran, però es tracta d'un camp magnètic molt més feble, de manera que produeix també poca càrrega elèctrica.



El fenomen de l'acumulació del potencial elèctric a un extrem del cable i les possibles descàrregues pot comportar aspectes negatius i positius. Per un cantó, un llamp que impactés contra el cable el podria destruir o malmetre greument, però per altra banda el camp magnètic i petites diferències de potencial elèctric poden produir un corrent beneficiós que podria ajudar a accelerar l'ascensor o fins i tot permetre produir electricitat per al consum.

2.3 EL CABLE

El cable de l'ascensor espacial requereix ser construït d'un material molt concret, degut a les característiques especials que ha de reunir: elevada resistència, gran lleugeresa i preferiblement que ocupin un volum petit.

És a dir, s'ha d'aconseguir trobar un material que tingui una bona **ratio resistència/densitat**: alta resistència i baixa densitat. L'ascensor serà factible si es pot aconseguir fabricar a preu raonable un material d'aquestes característiques: densitat similar a la del grafit i resistència de tensió de 65-120 GPa. Els nanotubs de carboni poden complir aquestes condicions.

A continuació tractarem aquest material com a proposta per a realitzar el cable, i els seus possibles inconvenients.

Finalment veurem com ha de ser aquest cable a escala macroscòpica i explicarem les característiques de la seva forma **cònica**.

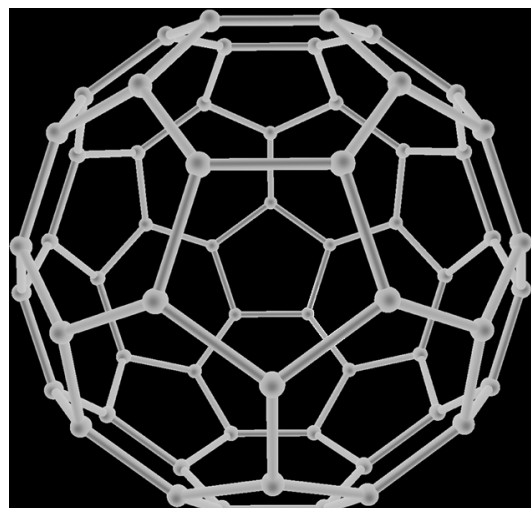
2.3.1 EL MATERIAL DEL CABLE: ELS NANOTUBS DE CARBONI

El **carboni** pot organitzar de diferents maneres els seus àtoms produint al·lòtrops* de propietats físiques diverses. Tradicionalment es coneixen el diamant i el grafit, però el que reuneix les característiques necessàries és l'estructura dels **fullerens**, concretament la dels **nanotubs de carboni**.

Els nanotubs de carboni són fullerens d'estructura cilíndrica. Una fibra contínua de nanotubs de carboni de la llargada suficient serviria com a cable.

ELS FULLERENS

Com s'ha dit, els fullerens són un al·lòtrop del carboni descobert recentment. El seu nom es deu a l'arquitecte, científic i divulgador americà Richard Buckminster Fuller, que va popularitzar les cúpules geodèsiques, que guarden gran semblança amb l'estructura dels fullerens.



La presència d'estructures de carboni on es combinen hexàgons i pentàgons permet la formació d'estructures no-planes molt diverses: esferes, el·lipsoïdes, cilindres... Aquesta és la molècula de Buckminsterfullerè C₆₀

***Al·lòtrop**: l'al·lotropia és la propietat que presenten certs productes químics per presentar diverses formes físiques en estat d'element. Un exemple n'és l'oxigen, presentat en forma d'oxigen atmosfèric (O₂) o ozó (O₃); o el grafit, el diamant, els fullerens... tots ells al·lòtrops del carboni,

Són molècules de dimensions considerables formades únicament per àtoms de carboni (desenes o centenars fins i tot) que s'organitzen de diferents maneres: esferes, cilindres, el·lipsoïdes o tubs. Són la tercera forma més estable coneguda d'organització del carboni. La seva estructura és molt similar a la del grafit, que està format per unitats o anells hexagonals de carboni. Els fullerenes a més inclouen unitats en forma de pentàgon que fan que l'estructura no sigui plana, sinó que adquireixi una corbatura.

Propietats dels fullerenes

- **Propietats químiques:** els fullerenes són estructures estables, però no totalment inerts. Tenen enllaços híbrids del tipus del grafit (sp^2), que fan que l'energia sigui mínima en una estructura planar, però que al corbar-se degut als anells hexagonals o a vegades heptagonals produeix tensió angular.

Les propietats químiques del cable són un aspecte important, per la qual cosa és interessant poder-les controlar: per tal de **modificar** les **propietats químiques** dels fullerenes es poden seguir dos processos: la modificació exohedral (canvi dels substituents dels carbonis dels anells per uns amb les propietats desitjades) i la endohedral ("capturar" dins de la macromolècula de carboni les substàncies químiques necessàries). Això és útil, per exemple, per reduir la reactivitat del cable amb l'oxigen de l'atmosfera. En general, la seva característica més important és la seva baixa reactivitat i alta estabilitat que els fa ideals per a construccions i estructures de grans dimensions.

- **Propietats físiques:** seran explicades amb detall a l'apartat següent, quan parlem dels nanotubs en concret.
- **Solubilitat:** una altra característica a favor de la utilització de certs fullerenes en la construcció d'obres d'enginyeria és la seva baixa solubilitat. De fet, només són solubles en uns pocs materials (el toluè, el disulfid de carboni o derivats del benzè), que evidentment no es troben en quantitat suficient a l'atmosfera per a afectar una construcció. En general són pràcticament insolubles en dissolvents comuns, com l'aigua.

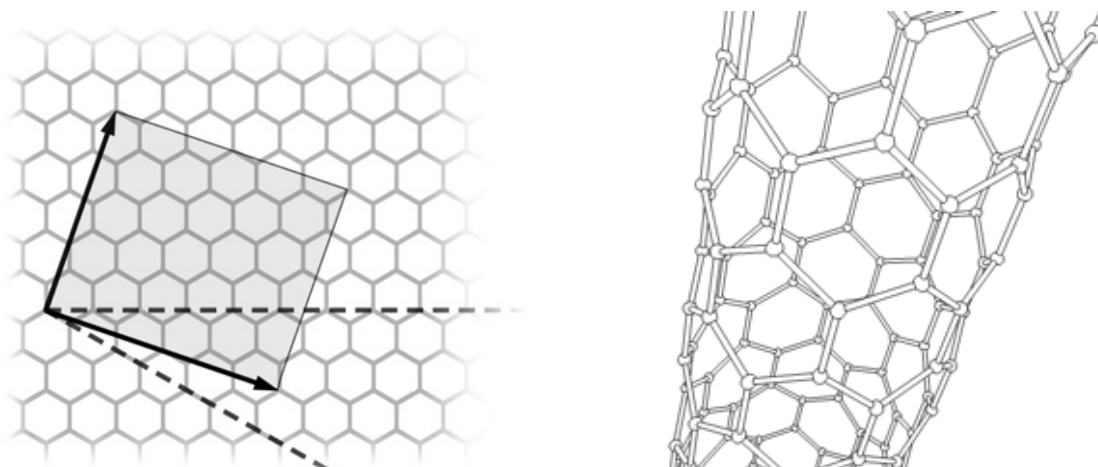
ELS NANOTUBS DE CARBONI

Els **nanotubs de carboni** són el tipus especial de fullerè que permetria, segons la nostra hipòtesi, construir el cable.

Aquest al·lòtrop del carboni pren forma de molècules de carboni en forma de cilindre, normalment acabat en una semiesfera similar a les dels fullerenes esfèrics com el Buckminsterfullerè. La seva descoberta portà a l'obertura d'un nou camp d'estudi en la ciència dels materials, ja que ofereixen noves propietats aplicables en molts àmbits: nanotecnologia, electrònica, òptica...

Estructura

L'estructura dels nanotubs és molt similar a la de la resta dels fullerenes: una xarxa o làmina d'àtoms de carboni d'estructura similar a la del grafit enrotllada en forma de cilindre. La làmina està formada per subestructures hexagonals.



La primera imatge mostra una làmina d'àtoms de carboni en estructura hexagonal en 2 dimensions. Quan enrotllem aquesta làmina en 3 dimensions, obtenim un nanotub com el de la segona imatge.

La síntesi dels nanotubs és un procés complex en que s'han de situar amb precisió els àtoms a la xarxa i tenir en compte la correcta hibridització dels enllaços.

Els àtoms de carboni s'uneixen per enllaços hibridats sp^2 , que els donen una resistència molt superior a la del diamant (que té enllaços sp^3). Per naturalesa, els nanotubs s'alineen en fibres més complexes gràcies a les forces de Van der Waals, formant una mena de cordes de fibres entrelaçades. Sota gran pressió es poden arribar a fusionar (convertint alguns enllaços sp^2 en sp^3), cosa que permet la construcció de fibres de llargada indefinida.

Propietats

- **Resistència:** els nanotubs de carboni són un dels materials més resistents que existeixen, i per tant els més adequats per a la titànica construcció de l'ascensor espacial. La seva resistència a la tensió és de 63-100 GPa (gigapascals, 10^9 Pa), mentre que la de l'acer és de 1,2 GPa. També tenen una capacitat elàstica considerable: 1 TPa (terapascal, 10^{12} Pa). La seva capacitat de deformació plàstica (a partir de la qual no torna a l'estat original) és del 5%. A partir d'aquesta força, la deformació és irreversible. La seva capacitat de compressió, no obstant, és menor: la seva estructura buida fa que tendeixi a vinclar-se fàcilment sota una força de compressió massa alta.
- Una característica fonamental per a la construcció de l'ascensor: els nanotubs són una de les poques úniques substàncies conegudes **capaç de sostenir indefinidament la seva pròpia pressió gravitatòria**. Això vol dir que són l'únic material amb que es pot construir una columna indefinidament alta i que aguanti el seu propi pes (a diferència d'una columna d'acer o una muntanya, per exemple).
- **Propietats elèctriques:** la simetria perfecta de les molècules i la seva disposició electrònica concreta els converteixen en conductors molt especials, que poden ser tan de naturalesa metàl·lica com semiconductors.
- **Propietats tèrmiques:** al llarg del recorregut del cable es produeixen moltes diferències de temperatura. La màxima temperatura que es calcula que pot resistir una estructura sense perdre estabilitat és de 2800°C en el buit i 750°C a l'aire. Aquestes temperatures extremes no s'assoleixen en cap punt de la llargada del cable en l'atmosfera.

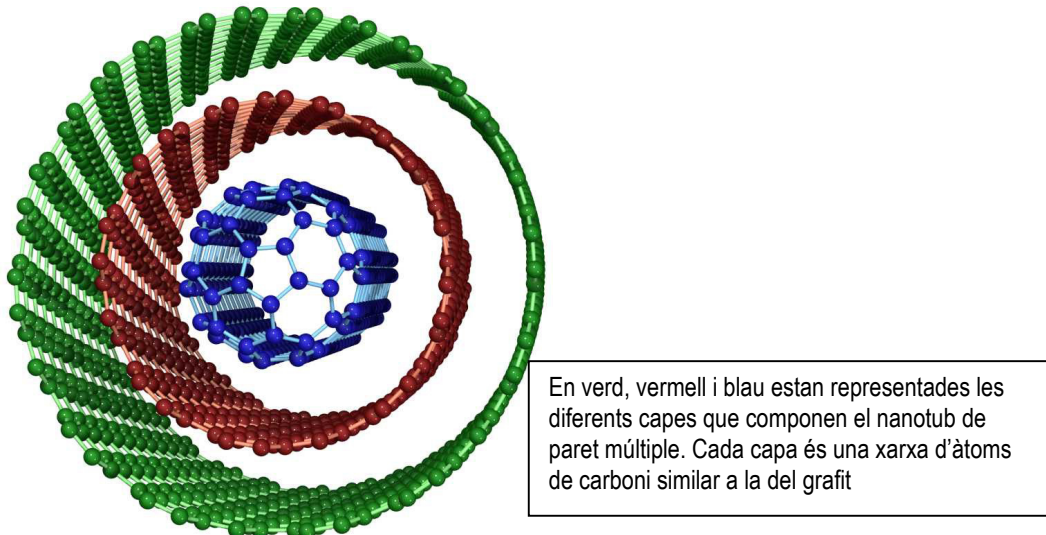
Tipus de nanotubs

Els nanotubs es divideixen en dos grups, segons la seva estructura. Trobem els de paret simple i els de paret múltiple, i ambdós podrien ser útils per a la construcció de l'ascensor. L'ideal seria obtenir un material amb una ratio resistència a la tensió/densitat elevada, és dir, amb molta resistència i densitat molt baixa. I cada tipus ho permet d'una manera diferent:

- **Paret simple:** tenen un diàmetre 1nm, i la llargada màxima que s'ha aconseguit fins ara és d'uns pocs centímetres. Se'ls considera, actualment, la millor opció: tenen un millor ratio de resistència a la tensió/densitat, ja que la seva massa és molt reduïda respecte altres materials i la seva resistència és considerable. Apart d'això, són molt bons conductors de l'electricitat,

cosa que podria ser beneficiosa (per al desplaçament per levitació electromagnètica, per exemple)

- **Paret múltiple:** presenten altres avantatges. Consisteixen diverses làmines de grafit elaborades en forma de cilindres concèntrics:



La seva estructura peculiar els confereix propietats molt interessants. El seu principal avantatge és la seva resistència molt més elevada que les altres formes simples: tenen més resistència mecànica i poden aguantar esforços de tensió més elevats. Tot i així, la seva massa és clarament superior a la de les altres formes, de manera que tenen una densitat considerablement més alta, i això fa baixar la ratio resistència a la tensió/densitat. Apart d'això no tenen les propietats conductores de l'electricitat dels simples.

2.3.2 DEFECTES DELS NANOTUBS COM A MATERIAL PER AL CABLE

Actualment s'estan duent a terme moltes investigacions sobre les seves propietats i la seva estructura. Moltes de les seves aplicacions encara són teòriques, ja que no s'ha assolit encara la tecnologia necessària per a construir certs nanotubs concrets.

Tot i els evidents avantatges que ofereixen els nanotubs de carboni respecte altres materials, recents estudis han mostrat que, actualment, podrien no ser capaços de sostenir una estructura com la planejada (*Nicola Pugno i Cristophe Olry, 2006*). La nanotecnologia, de fet, encara no ha aconseguit desenvolupar un cable de nanotubs de carboni com el que es necessitaria per a la construcció de l'ascensor, però es calcula que la tecnologia necessària podria estar disponible en poques dècades.

Això es deu al fet que la seva elaboració és un procés molt minuciós, en que els enginyers han de col·locar amb una precisió enorme (evidentment, inferior a un nanòmetre 10^{-9} m) els àtoms de carboni en la estructura adequada.

Possibles problemes:

- Si bé és cert que poden resistir fins a 100 GPa segons alguns càlculs, l'absència d'un sol àtom reduiria les seves prestacions un 30%.
- En els processos actuals, de mitjana (ja sigui per errors de síntesi o altres causes) falta un àtom de C cada 4 micròmetres (10^{-6} m).
- Poden ocórrer errors d'estructura, i formar-se un pentàgon i un heptàgon enlloc de la xarxa hexagonal. Algun segment defectuós afecta a tota la cadena.
- La tensió que pot suportar la unió de dos fibres de tubs independents és molt menor: es calcula que és només de 1GPa.

Això vol dir que la construcció de l'ascensor espacial no és possible? No. Senzillament que la nanotecnologia no ofereix, a dia d'avui, solucions per a una síntesi més acurada dels nanotubs, de manera que presenten aquestes imperfeccions que en debiliten l'estructura. L'objectiu és doble: aconseguir una síntesi en massa i a bon preu i minimitzar les impureses.

2.3.3 EL CABLE A ESCALA MACROSCÒPICA

Amb l'estudi dels nanotubs de carboni hem conclòs quin seria el millor material per a construir el cable. Ara bé, com s'han d'unir aquestes nanofibres?

No resulta pràctic fabricar petites fibres i anar-les unint per formar un cable de 36 000 km o més, ja que es perd molta resistència en els enllaços. El més recomanable actualment és elaborar fibres de nanotubs de gran llargada i unir-les per extrusió.

El disseny del cable ha de ser molt acurat per a que sigui capaç de suportar el seu propi pes, les tensions a que està sotmès i el pes de l'ascensor. La **resistència** que requereix el cable **varia** al llarg de la seva longitud.

Així, en certs punts ha de resistir el pes de la part de cable per sobre seu (i la pressió que provoca) i també la força centrípeta (tensió) que permet retenir el cable restant i el contrapès. Això implica que, a escala macroscòpica, el cable té un **disseny cònic** on l'àrea de la secció varia amb l'alçada.

La secció d'aquest **cable cònic** en funció de l'alçada pot ser calculada amb l'equació deduïda per Pearson (1975), suposant que l'esforç que suporta el cable és constant en tota la seva llargària:

$$A_{(r)} = A_0 \exp \left[\frac{p}{s} \times \left[\frac{1}{2} \times \omega^2 \times (r_0^2 - r^2) + g_0 \times r_0 \times \left(1 - \frac{r_0}{r} \right) \right] \right]$$

On:

A_r = l'àrea de la secció del cable en funció de l'alçada

A_0 = àrea a la superfície de la Terra

ρ = densitat dels nanotubs

s = resistència a la tensió del cable

ω = la velocitat angular de la Terra al seu eix

r_0 = distància entre el centre de la terra i la base del cable = 6378 km

g_0 = acceleració de la gravetat a la superfície.

Aquesta equació ens mostra que l'àrea de la secció del **cable cònic** ha de ser, al principi, petita, però que creix ràpidament en els primers quilòmetres (on el cable està més subjecte a la gravetat). Aquest creixement exponencial s'atura i l'àrea és més o menys constant al llarg dels quilòmetres superiors. El seu màxim gruix l'assoleix a l'òrbita geostacionària, i a partir d'aquí es reduirà.

D'aquesta equació en podem extreure les següents conclusions per poder fabricar un cable amb la mínima àrea de gruix en òrbita geostacionària:

- Com ja s'ha dit, usant un material de baixa densitat i amb una resistència elevada. Es calcula que és possible amb una densitat d'entre 1000-5000 kg/m³.
- **Augmentant l'alçada de partida de l'ascensor**, ja que el caràcter exponencial de l'augment de radi de la secció del cable fa que una petita disminució de l'alçada de partida (uns pocs quilòmetres) permeti una reducció substancial del radi.
- Fent el **cable tant prim com sigui possible a la base**, mantenint la capacitat de càrrega, ja que el gruix depèn també de la resistència.

2.4 LA BASE

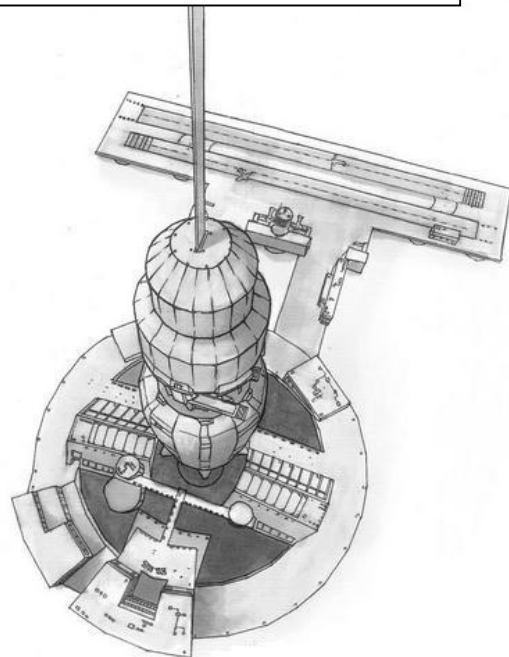
La base de l'ascensor espacial és l'estació terrestre, és a dir, el punt on els passatgers, la càrrega... han d'accedir a l'ascensor. Per tant, és a més el punt on el cable s'ajunta amb el planeta.

Aquest punt de l'estructura és molt important per les tensions que ha de suportar, com a base, però a més és la zona on més afecten les incidències meteorològiques, per exemple.

De totes maneres, és la part de l'ascensor més fàcil de planificar, ja que tota la tecnologia per al seu disseny ja està disponible i es coneixen en detall tots els factors que influïrien en la seva construcció, ja que al capdavant es troba a l'escorça terrestre i és la zona les característiques de la qual es coneixen millor.

Així, cal tenir en compte una sèrie de factors a l'hora de decidir la ubicació de la base (i consegüentment de l'ascensor), que explicarem a continuació.

Visió artística de com podria ser la base del complex de l'ascensor espacial



2.4.1 LA UBICACIÓ DE LA BASE

A l'hora de decidir on situar la base s'han de tenir en compte una sèrie de factors:

- Ha d'estar situada a l'**equador**, per la pròpia definició del concepte d'ascensor espacial. A qualsevol altre lloc de la superfície, el cable no ascendiria recte, sinó formant un angle amb el pla de l'eclíptica (pla de rotació de la Terra). Això vol dir que no es tractaria d'una òrbita geostacionària, sinó d'una òrbita geosíncrona (que vindria a ser el mateix però amb una certa inclinació). Això implicaria haver d'utilitzar energia per a mantenir l'ascensor tibet.
- La seva situació ha de ser en una zona del planeta **meteorològicament estable**. Cal evitar zones amb freqüència de tempestes i forts vents. Això és difícil degut a que es troba a l'equador i les tempestes tropicals, els huracans... són freqüents en moltes regions. Com veurem més endavant, hi ha dues maneres d'evitar aquests inconvenients: una base marítima desplaçable o una base a gran alçada.

Es calcula que el cable podria aguantar vents de 72 m/s, o huracans de categoria 5. Sempre que l'ascensor es mantingui entre l'equador i 2º sud o nord s'evitaran les principals zones d'inestabilitat.

- En qualsevol cas és obligat situar-lo en una **placa tectònicament estable**, ja que és extremadament sensible als terratrèmols i sota cap concepte s'ha de desenganxar el cable de la base.
- S'ha de tenir en compte també la proximitat a **fonts d'energia** barates i rendibles; no tindria sentit construir-lo per a estalviar energia respecte a les llançadores espacials i els coets però que després l'energia resultés ser molt més cara d'obtenir, i el més important, de transportar, fins a l'ascensor.

En el cas dels ascensors és molt avantatjós el fet que consumeixen energia elèctrica, de la que podem disposar en quantitat i és relativament senzilla de transportar, enlloc d'energia química com els actuals sistemes de sortida a l'espai.

2.4.2 TIPUS DE BASES

A l'hora de decidir la ubicació de la base, s'han de superar diversos factors adversos. S'ha especulat amb diverses possibilitats, cadascuna amb els seus avantatges i inconvenients respecte els problemes indicats anteriorment. Dependrà de les circumstàncies finals de la construcció que s'opti per un model o un altre, però en tot cas els fonaments seran els mateixos.

- **Base marítima:** és la plantejada per l'empresa LiftPort Group, actualment pionera en l'aplicació de les tecnologies necessàries per a la construcció de l'ascensor. Consisteix en una mena d'estació petrolífera desplaçable.

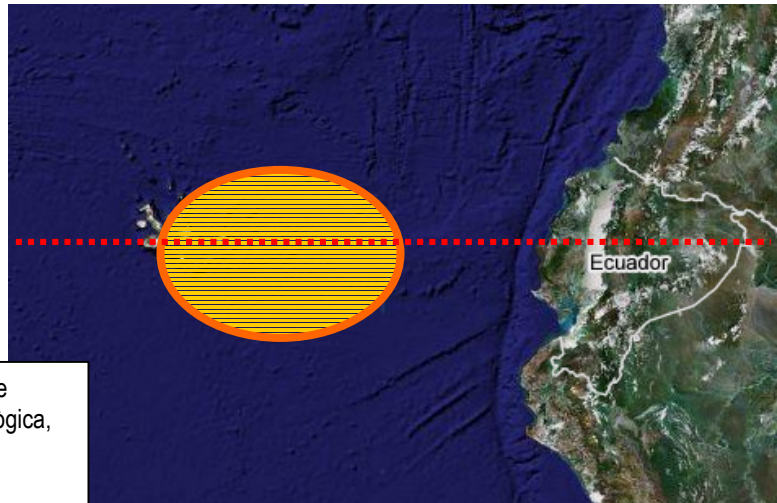
Els principals avantatges que aporta aquest model són la possibilitat d'evitar tempestes, huracans i altres inclemències meteorològiques, així com els diversos residus espacials en òrbita a la Terra i que podrien col·lisionar contra el cable.



Per contra, l'accés a energies de baix cost és més complicat, i el cable hauria de ser més llarg que no pas si es construís en terra ferma.

La localització més adequada per a una base d'aquestes característiques és la costa sud-americana de l'oceà Pacífic, a uns centenars de quilòmetres de la costa d'Ecuador.

Ressaltada la zona ideal per a la situació de l'ascensor, amb poca inestabilitat meteorològica, molt propera a l'equador terrestre i no excessivament lluny del continent



- **Base terrestre:** tradicionalment se l'ha considerat la opció més factible. Tot i que no permet la mobilitat per evitar tempestes i vents forts com la base marítima, té altres mecanismes i avantatges molt importants.

Per evitar les inclemències meteorològiques la millor opció és situar la base o plataforma a gran alçada, sobre una gran torre (com va especular el pioner Konstantin Tsiolkovski) o bé sobre una muntanya. Això evita vents forts i tempestes que afectarien al cable, i a més afegeix un avantatge crucial: requereix un cable més curt.

Tot i que la menor llargada del cable pot semblar un avantatge molt menor (amb prou feines uns quilòmetres respecte els més de 35 900 que s'especulen), situar-lo a gran alçada respecte el nivell del mar presenta clars avantatges:

- Es redueix significativament la zona del cable dins de l'atmosfera terrestre, especialment a la zona de més fregament amb l'aire. Com més alt sigui el punt de partida menys energia s'haurà de gastar en vèncer el fregament. El fregament és un fenomen exclusiu dels 100 primers quilòmetres del trajecte del cable, dins l'atmosfera, especialment dels 20 primers. I aquí, una diferència de 5 o 6 quilòmetres és molt significativa. Això es tradueix en un desplaçament més eficient.
- Permet una important reducció de l'amplada a la zona central del cable, abaratint-ne la construcció.

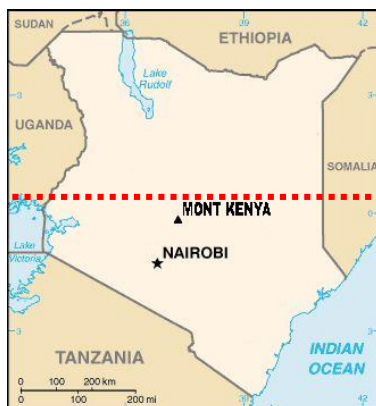
- Redueix significativament la llargada mínima que ha de tenir el més enllà de l'òrbita geostacionària (35 900 km respecte el nivell del mar).

La situació terrestre permet a més un accés més ràpid i de qualitat a fonts d'energia barates, a les matèries primeres i facilita l'accés de persones i mercaderies cap a la base per a ser llançades a l'espai.

El principal inconvenient és la impossibilitat d'esquivar els diferents residus espacials que poblen les òrbites inferiors del planeta: antics satèl·lits, fragments i ferralla en òrbita... Per evitar aquest problema s'haurà de compensar millorant l'estructura del cable per fer-lo més resistent i també netejant la zona.

Les possibles localitzacions en les que s'ha pensat per a situar l'ascensor són:

- El mont **Kenya**, a Kenya (Àfrica Oriental). Té una altitud de 5 199 m, i està situat gairebé sobre l'equador terrestre: 0°9' al sud.



Localització del Mont Kenya, a Kenya (Àfrica Oriental) en relació a l'equador i el cim d'aquesta muntanya, la més alta del continent africà (5 199 metres)

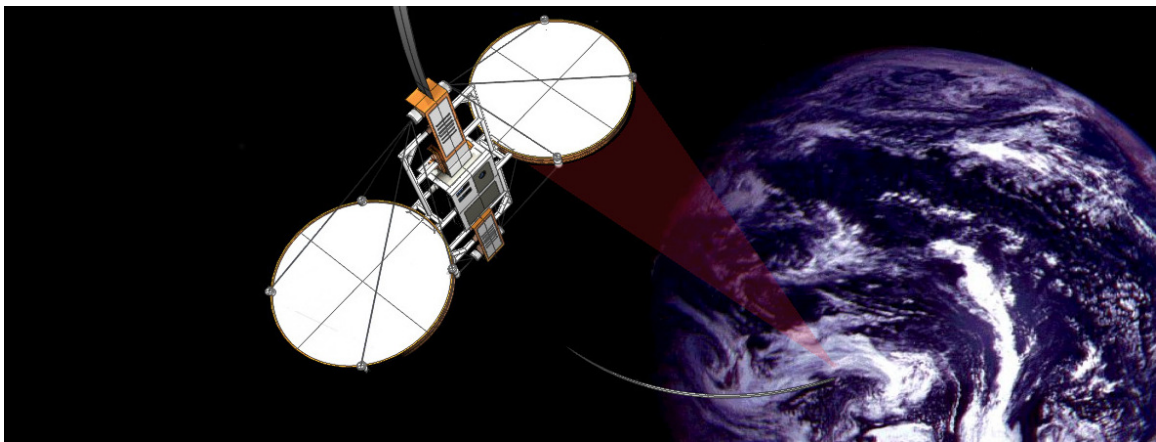
- Muntanyes dels **Andes**, a l'Equador (Amèrica del Sud) com els monts Cotopaxi (5 897 m, 0°4'S), Illinza (5 248 m, 0°39'34"S), el Altar (5 320 m, 1°40'S) i Corazón (4 790 m, 00°32'S) i el Chimborazo (6 267 m, 01°28'09"S) entre d'altres importants. Tots ells són volcans inactius, excepte el mont Cotopaxi que encara està en actiu.

La zona dels Andes és més inestable tectònicament, i això és un inconvenient important. Tot i així, molts dels volcans de la zona no són actius. També és una zona millor comunicada que Kenya. Kenya presenta com a avantatges la seva estabilitat tectònica.

2.5 L'ASCENSOR

L'**ascensor** o **climber** és la part més important de tot el projecte: sense ell la construcció no té sentit. Depèn molt de la velocitat, el fregament i la naturalesa de l'ascensor el temps amb que sigui capaç d'assolir la part superior. El que és pràcticament segur és que trigarà més a fer el viatge que no pas el sistema actual.

L'ascensor espacial no pot ser un ascensor en el sentit tradicional de la idea, amb cables que ascendeixin i descendeixin el *climber*, ja que la mida d'aquests cables s'hauria de modificar amb l'altura de la mateixa manera que succeeix amb el cable - base.



D'aquesta manera, s'ha arribat a la conclusió que el més pràctic és un model de *climber* capaç de moure's per sí mateix al llarg del cable, de manera que amb una font d'energia pròpia fos capaç d'escalar amunt i avall. És precisament per aquesta capacitat de **moure's autònomament** que s'anomenen *climbers* (escaladors), ja que són més aviat vehicles que no pas la cabina d'un ascensor convencional.

Així doncs, pel que fa al vehicle d'ascensió cal tenir en compte una sèrie d'aspectes:

- 1) El mètode de **propulsió** per a fer ascendir el *climber*.
- 2) La **capacitat de transport** de que serà capaç l'ascensor: càrrega màxima i viatges.

2.5.1 LA PROPULSIÓ

La **propulsió** de l'ascensor espacial és potser un dels temes més estudiats. Hi ha diferents mètodes per aconseguir que l'ascensor ascendeixi pel cable, de manera que l'ascensor ha de complir uns requisits determinats:

- No ha de ser massa pesant per al cable, que ha de ser capaç de sostenir-lo i aguantar la tensió extra que suposa l'acceleració de l'ascensor.
- Poder arribar a portar un màxim de càrrega el més alt possible. Fins a 15 tones de càrrega és una fita raonable per a poder enviar la majoria de satèl·lits a l'espai.
- Evidentment, ha d'acabar essent més rendible que els actuals coets o llançadores espacials.

Però abastir l'ascensor d'**energia** continua oferint molts problemes al disseny d'un *climber* pràctic que compleixi aquests requisits. Els principals problemes que ofereix són la impossibilitat, amb la tecnologia actual, de fabricar bateries prou petites i compactes per a formar part del vehicle i que siguin capaces d'emmagatzemar la suficient energia per fer pujar l'ascensor, ni nuclear ni química.

Un aspecte a tenir en compte és la **diversitat d'ambients** per on passa l'ascensor mentre és dins l'atmosfera. Als primers 20 quilòmetres de l'atmosfera el fregament és considerable ja que la densitat de l'aire és relativament gran. Però a mesura que es puja, com ja s'ha explicat prèviament, aquesta densitat cau en exponencialment, de manera que a partir dels 50 quilòmetres ja és negligible. I evidentment, a l'espai el fregament és nul.

És absurd pensar en un sol mètode de desplaçament tenint en compte els diferents medis en els que l'ascensor es mou, de manera que el més raonable és apostar per la combinació de dos o més sistemes de propulsió diferents en funció del tram de recorregut. En aquest cas, apostarem per la **levitació magnètica** i la **propulsió per làser**. Aquests dos mètodes ofereixen, a més l'avantatge de que no obliguen *a priori* a incorporar bateries al *climber*.

És possible que el millor no siguin tan sols dos mètodes, sinó fins i tot tres o quatre de diferents combinats i a vegades simultanis per tal d'aprofitar al màxim les propietats específiques de cada tram d'ascens.

LEVITACIÓ MAGNÈTICA

El sistema de **levitació magnètica** o *maglev* seria l'encarregat de fer ascendir l'ascensor en el primer tram. Aquest sistema s'aplica durant els primers 50-70 quilòmetres de l'atmosfera, és a dir, mentre l'ascensor es troba a la **troposfera** i l'**estratosfera**.

La força de fregament d'un cos desplaçant-se en un fluid (en aquest cas, l'aire) depèn de la velocitat del cos i també en gran mesura de la densitat d'aquest fluid. És en aquests primers quilòmetres del gran ascens del *climber* quan la densitat de l'aire és més gran (va des de 1,22 kg/m³ a la superfície a 0,0009 kg/m³ a 70 km d'alçada), de manera que la força que s'haurà de vèncer per avançar serà major. Per aquest motiu com més amunt es comenci a ascendir millor: una diferència de 6 quilòmetres entre el nivell del mar i una muntanya situada a l'equador és molt significativa.

La **levitació magnètica** és un mètode pel qual un objecte queda en suspensió per sobre d'un altre objecte sense cap altre suport que els camps magnètics degut a que els pols d'un mateix signe, positiu o negatiu, es repel·leixen a escala macroscòpica.



Com és ben conegut, dos pols amb el mateix signe es repel·leixen i dos pols amb diferent signe s'atrauen. Aquest fet és aprofitat per desplaçar dos cossos polaritzats l'un sobre l'altre en trens de levitació magnètica, i aviat, en l'ascensor espacial.

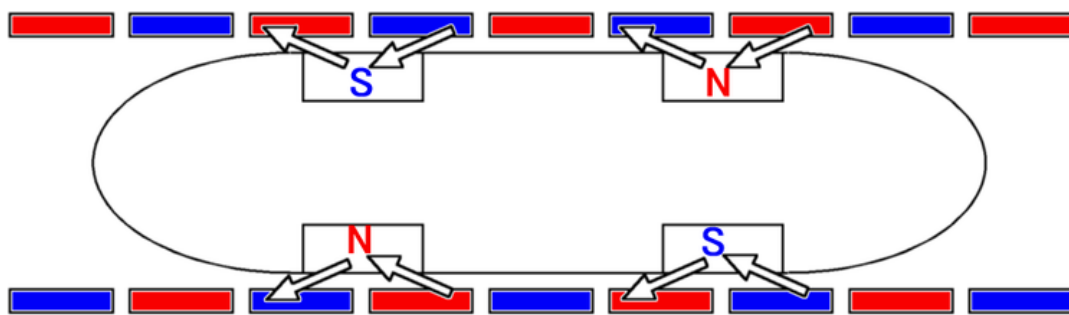
Aquest sistema ja ha estat usat en els **trens de levitació magnètica**. En aquest cas, la força electromagnètica compensa els efectes de la força gravitacional i permet al cos evitar la seva acceleració cap a la Terra, fent que leviti i el seu fregament sigui molt petit. Per a fer avançar el tren s'utilitza un sistema de canvi de polaritat de la via que permet al tren ser atret pels camps magnètics del davant i repel·lit pels de darrere seu.

Trens a Alemanya i Japó han arribat als 100 quilòmetres en horitzontal amb molt bons resultats. L'objectiu és aplicar aquesta tecnologia en el pla **vertical** per aconseguir fer ascendir l'ascensor.

La levitació magnètica pot utilitzar dues tecnologies diferents: la suspensió electrodinàmica (EDS) i la suspensió electromagnètica (EMS).

En el cas de l'ascensor el més recomanable és aplicar la **suspensió electrodinàmica**, que consisteix en aprofitar la força repulsiva entre dos camps magnètics, el del suport i el del vehicle, per a aconseguir un desplaçament relatiu de l'un sobre l'altre.

- El camp magnètic del **vehicle** o **climber** és permanent i constant. Aquest camp magnètic pot ser ofert per dos sistemes diferents, mitjançant superconductors que indueixin un camp magnètic a l'ascensor o mitjançant el sistema *Indutrack* d'imants fixos. És preferible el darrer mètode, ja que estalvia haver de proveir energia per crear el camp magnètic.
- El camp magnètic del **suport** o **cable** ha de canviar contínuament la seva polarització durant el pas del vehicle per produir l'efecte següent:



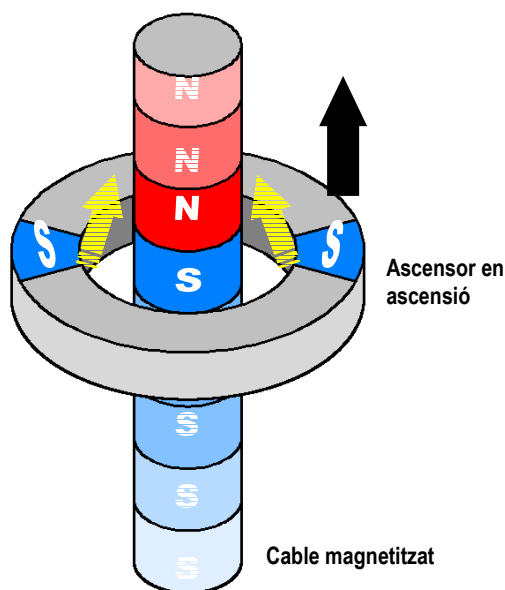
Aquest diagrama representa un tren, però l'efecte és el mateix. El camp magnètic constant del vehicle és atret o repel·lit pel del seu voltant. Continuament l'ascensor és atret pels camps magnètics de davant seu durant el seu ascens (que ofereixen el pol contrari), però quan hi arriba aquests camps han de canviar la seva polaritat (i tenir el mateix pol que el vehicle), ja que sinó s'acoblarien i deixaria d'avançar. Aquest canvi continu permet a l'ascensor "fugir" dels pols iguals de sota seu i "anar" cap als pols contraris de dalt seu durant la seva ascensió, i viceversa.

El més possible és que el camp magnètic del cable es creï mitjançant la **inducció electromagnètica**. El mètode més habitual en l'enginyeria ferroviària és l'ús de materials superconductors per a crear i modificar aquest camp. Tot i així caldria estudiar a fons les propietats conductores de l'electricitat dels nanotubs de carboni, ja que són el material bàsic del cable i una de les seves variants, els nanotubs de paret simple, semblen molt adequats com a conductors.

L'adaptació del sistema **maglev** dels trens a l'ascensor espacial requereix un disseny nou, evidentment vertical en lloc d'horitzontal. Tot i que hi ha diferents models, el més plausible aboga per un model similar a aquest:

Aquest és un esquema d'un model d'ascensor en que el cable de polarització variable està situat al centre, i l'ascensor és un anell que ascendeix/descendeix en funció del camp magnètic del cable.

Aquest model té l'inconvenient que l'"estranya" forma de l'ascensor dificultaria el transport de molta massa de càrrega. Per contra sembla un model prou bo per enviar persones a l'espai.



Un dels principals desavantatges de la levitació magnètica és la gran quantitat d'energia elèctrica que requereix per a funcionar, tot i que, com s'ha explicat, només és necessari en els 50 primers quilòmetres de l'atmosfera (i s'han construït trens de molt més recorregut). Tot i això, és evident que el cost energètic de desplaçar un cos en vertical és major que fer-ho en horitzontal.

Per altra banda utilitzar aquest sistema té clars avantatges:

- A la zona del recorregut amb més fregament amb l'aire minimitza el fregament amb el cable.
- Aquest sistema permet assolir grans velocitats en molt poc temps, com s'ha comprovat en les xarxes ferroviàries. Aquesta gran acceleració permetria que l'ascensor abandonés la zona de fregament atmosfèric amb una velocitat notable.
- De la mateixa manera que permet assolir una gran acceleració pujant, permet una gran frenada baixant, minimitzant el fregament i l'augment de temperatura quan el cos retorni en l'atmosfera terrestre.

Situar un sistema similar a l'extrem superior també serviria per frenar l'ascensor i aconseguir que la seva velocitat sigui constant durant l'arribada a la part superior.

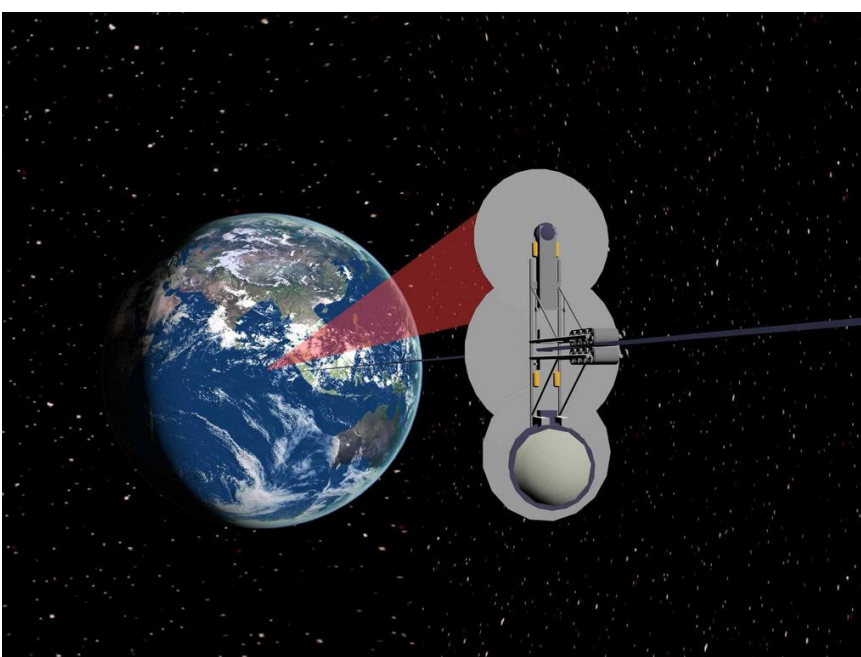
PROPULSIÓ LÀSER

El sistema de **propulsió làser** seria l'utilitzat per desplaçar l'ascensor durant el procés d'ascens en els quilòmetres superiors.

La seva explicació és molt més senzilla que el que podria semblar a primera vista. Un **làser** (acrònim de l'anglès *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, amplifació de llum per emissió estimulada de radiació) és una forma d'energia que aprofita un fenomen quàntic, l'emissió estimulada, per emetre un feix de llum (radiació electromagnètica, visible o no) molt coherent* i monocromàtica.

Aquest efecte, com tots els fenòmens electromagnètics, implica l'acció dels **fotons**, les partícules fonamentals de qualsevol interacció electromagnètica. Així doncs, després del *procés de creació del làser per emissió estimulada de radiació* obtenim un feix de fotons molt energètics, més que la llum normal, i que reben poques interferències. Aquest feix és el que s'anomena llum làser, i depenent de la longitud d'ona pot ser visible o no.

El que ens interessa és una altra característica dels fotons: la **dualitat ona-partícula**. Aquesta propietat, que de fet presenten totes les partícules subatòmiques, fa que els fotons del raig làser es comportin a la vegada com a partícules amb massa i com a ones de radiació, de manera que els **fotons poden actuar com si tinguessin massa**.



Què succeeix si un cos amb massa col·lideix contra un altre, per exemple l'ascensor? Doncs que l'accelera. Així doncs, l'objectiu és **utilitzar la massa dels fotons del làser per accelerar l'ascensor**.

L'emissió de fotons en forma de raig làser des de la Terra permet accelerar lleugerament l'ascensor

***Coherència**: en física, la coherència és la propietat que mesura la capacitat de les ones de produir interferències, canviant el seu moment ondulatori.

El làser seria emès des de la Terra contra l'ascensor. L'ascensor no hauria de portar cap dispositiu energètic, ja que tota l'energia seria aportada des del planeta.

S'ha de tenir en compte que la massa dels fotons és molt petita, de manera que la força que provocaran sobre l'ascensor serà també molt petita i l'acceleració també. Això, al contrari del que pot semblar, no és un desavantatge pels següents motius:

- Ens trobem a l'espai exterior i a les zones de l'atmosfera **sense fregament** o amb fregament pràcticament nul, de manera que cap força s'oposa a l'avanç de l'ascensor. La més mínima força que se li apliqui provoca una acceleració, petita però existent.
- Una petita acceleració és recomanable, ja que, en arribar a la part superior de l'ascensor, el *climber* ha d'estar a **velocitat constant**. Així, si l'acceleració que el puja és petita, la força necessària per a desaccelerar-lo també ho serà. Ja s'ha explicat abans que un fre magnètic seria un mètode pràctic per a frenar el *climber* a la part superior.
- La **velocitat** no és la característica estrella de l'ascensor espacial: l'objectiu no és enviar càrrega útil a l'espai ràpidament, sinó fer-ho de manera més econòmica. Així, l'acceleració no és crucial per al projecte.

Per a aprofitar al màxim les virtuts d'aquest sistema s'ha proposat el desplegament de **panells** de grans dimensions al *climber* que serien els encarregats de rebre el feix de llum.

El principal inconvenient d'aquest mètode és que el làser s'ha de mantenir perfectament ajustat al *climber* per a mantenir l'acceleració durant el trajecte. Al contrari del que intuïtivament es podria imaginar, les forces de Coriolis no intervenen negativament en aquest aspecte: si bé desvien el cable i l'ascensor (i es podria pensar que "els aparten" del feix làser), els fotons també són desviats.



Amb un mètode similar a aquest es podria accelerar l'ascensor. La imatge correspon a un dels làsers del projecte LIDAR d'estudi d'objectes ultratmosfèrics. Aquest serveix per a excitar els àtoms de sodi de l'atmosfera superior.

2.5.2 EL TRANSPORT

La capacitat de transport de l'ascensor depèn de dos factors:

- La **càrrega** màxima que pot transportar. Aquest és un punt conflictiu, ja que depèn de molts factors que encara no estan definits, com la resistència final dels nanotubs. S'especula que es podria arribar a unes tretze tones (13 000 kg). Aquesta capacitat és més que adequada per a satèl·lits, ja que la majoria d'aparells meteorològics, de telecomunicacions, d'estudi astronòmic... té una massa inferior a les 10 tones.
- La **freqüència** amb que l'ascensor transporta càrrega amunt i avall. Aquest paràmetre varia en funció de la massa ascendida: masses molt elevades no poden ser ascendides simultàniament, hi ha d'haver un temps d'espera prudencial.

S'ha de tenir en compte que, amb el model més senzill d'ascensor, no es poden realitzar viatges de pujada i de baixada simultàniament, sinó que primer s'ha d'ascendir tot i després baixar-ho tot. Models més complexos, com un ascensor de doble cable, permetrien solucionar aquest inconvenient i augmentar la freqüència dels viatges.

Per altra banda, els actuals transbordadors espacials tenen una càrrega útil màxima d'unes trenta tones. La majoria d'aquesta càrrega consisteix en l'equipament, estris de laboratori, tripulació, queviures per a la Estació Espacial...

Aquests transbordadors arriben a l'alçada d'òrbita geosíncrona poques hores després d'haver enlairat, però l'ascensor podria arribar a trigar d'un a dos dies a fer el mateix viatge, segons els càlculs més optimistes. Tot i així, la poca freqüència dels viatges amb transbordador fa que s'hagi de procurar encabir la major quantitat possible de material en el mínim espai. Els ascensors poden efectuar viatges més sovint, de manera que no cal portar tanta càrrega a cada viatge.

2.6 EL CONTRAPÈS

L'objectiu que cal complir a l'hora de decidir un contrapès és que el centre de masses del conjunt de l'ascensor espacial estigui situat als 36 000 km d'alçada de l'òrbita geostacionària. Sobretot a l'espai exterior, on no hi actua pràcticament gens la gravetat terrestre, és indiferent la distribució del volum del cos, ja que es comportarà com si fos només el punt on resideix el seu centre de masses.

Així doncs, per aconseguir que el centre de masses estigui en el punt desitjat en òrbita, es poden seguir dos procediments: una gran massa o un cable més llarg, cadascun amb els seus avantatges i inconvenients que s'hauran de considerar.

2.6.1 UNA GRAN MASSA

Una opció és fixar a l'extrem superior del cable una **gran massa** que, comparada amb la poca massa que tindria el cable de nanotubs de carboni, situaria el centre de masses del conjunt de l'ascensor espacial molt a prop del final del cable.

D'aquesta manera només cal allargar uns quants centenars de quilòmetres el cable més enllà de l'òrbita geostacionària.

Aquesta massa pot tenir diferents naturaleses:

- 1) Podria tractar-se d'un **asteroide** capturat a aquest efecte. Aquesta opció presenta avantatges i inconvenients. Per un cantó, molts dels asteroides estan fets de grans concentracions de carboni (els anomenats *condrites carbonàcies*), de manera que fàcilment se'n podria extreure la matèria primera necessària per a la construcció del cable (si es fes des de dalt).

No cal patir pel conseqüent afegiment de massa al sistema de rotació de la Terra (que teòricament produiria, pel principi de conservació del moment angular, un alentiment de la rotació): a un annex es troba el càlcul d'aquesta variació i és mínima.

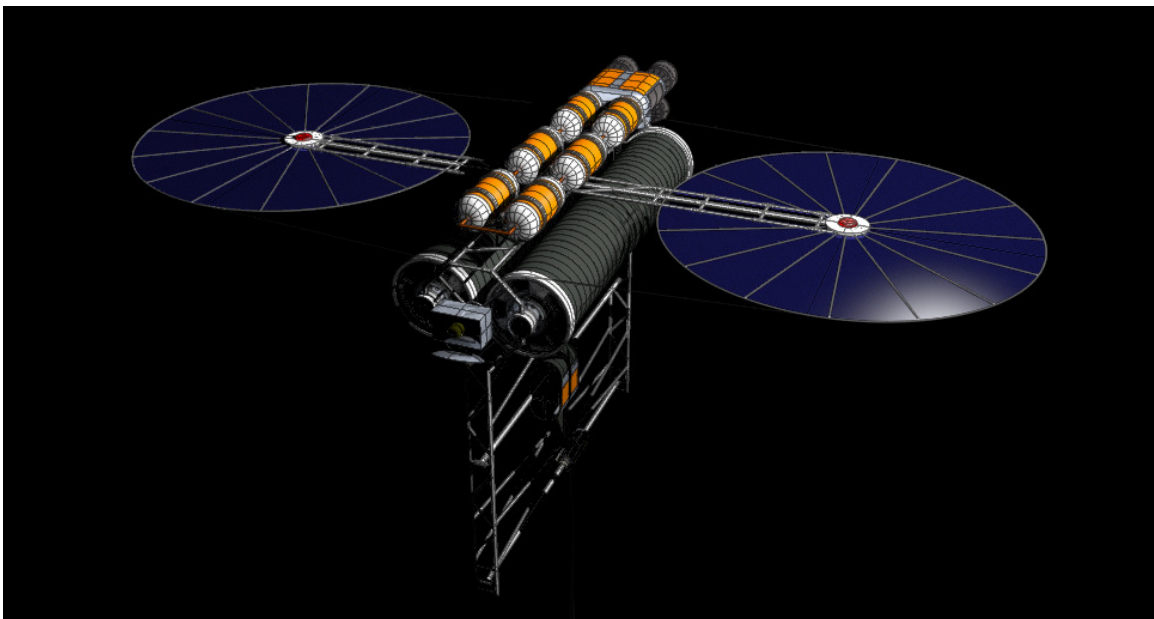


El principal inconvenient és, però, el més elemental: el transport de l'asteroide. Suposadament aquest seria recollit del cinturó d'asteroides, més enllà de l'òrbita de Mart. Això implica que el viatge seria molt llarg, i més si es té en compte que la millor manera de transportar un cos d'aquestes característiques a través de l'espai és efectuar una força petita però constant que l'acceleri lleugerament un cop s'hagi efectuat la força puntual necessària per a arrancar-lo del camp gravitatori del cinturó. La enorme despesa de temps, afegida a les importants dificultats logístiques de moure un asteroide semblen, de moment, descartar aquesta opció.

- 2) La segona opció consisteix en l'ús d'una **estació espacial** de grans dimensions com a contrapès. Descartada la opció de portar material des de l'espai exterior, el més indicat sembla haver-la de construir amb materials terrestres.

El seu interès més important és el de fer-la servir com a factoria per a l'elaboració del cable directament a dalt. L'ambient de gravetat mínima podria ser beneficiós a l'hora de sintetitzar nanotubs de major qualitat.

Un avantatge afegit és la possibilitat d'allotjar una terminal espacial per als ascensors, una mena de port de càrrega i descàrrega a l'espai exterior. A tan sols 36 000 km de la Terra i una massa que proporcionés la suficient gravetat permetria a més situar-hi instal·lacions, factories i laboratoris. Això per exemple és interessant a l'hora de construir naus espacials a l'espai exterior dissenyades per no haver d'entrar mai en el camp gravitatori, mitjançant els materials que arribessin amb l'ascensor.



El fet d'utilitzar un cos com a contrapès, sigui quina sigui la seva naturalesa, implica, en general, diversos avantatges. Per exemple, seria possible situar-hi panells solars per abastir d'energia al complex de l'ascensor (fins i tot en podrien transportar, a través del cable mateix, fins la Terra), ja que a aquesta altitud els raigs solars no estan atenuats per l'atmosfera.

Un contrapès ofereix un avantatge que, al nivell tecnològic a que ens trobem, és fonamental: la poca llargada relativa del cable. No cal oblidar que la manufactura dels nanotubs és un dels principals obstacles a salvar, així que, de moment, com més curt calgui fer-lo millor.

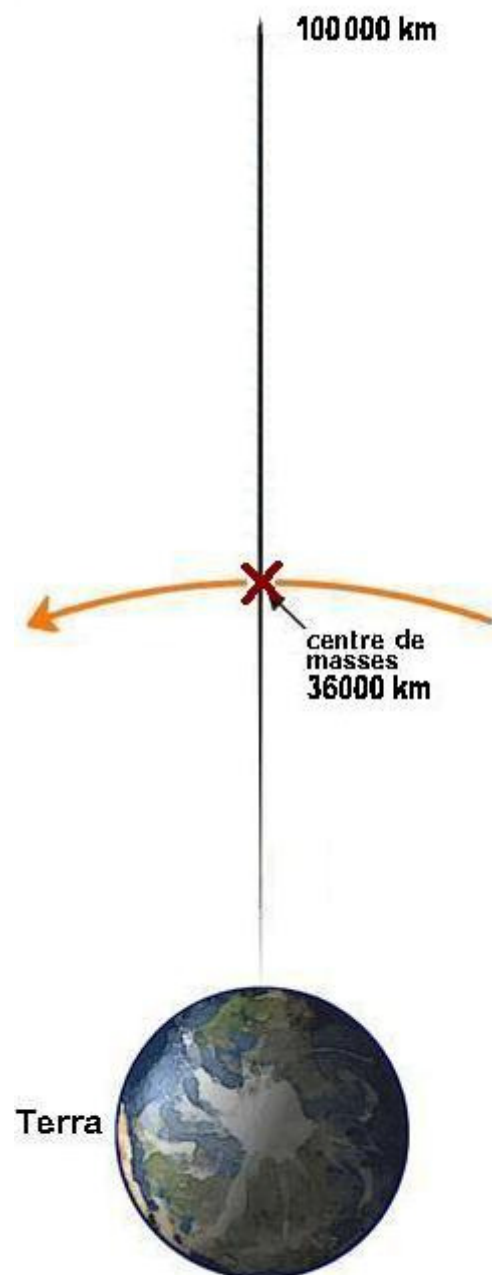
2.6.1 UN GRAN CABLE

Hi ha una altra manera d'aconseguir que el centre de masses del sistema estigui a 36 000 km d'altitud: fer un **cable més llarg**. Si el cable s'allarga substancialment més enllà de l'òrbita geostacionària, s'aconsegueix situar el centre en el punt convenient.

La llargada del cable en aquest cas, però, és molt superior al que intuïtivament es pot imaginar: 100 000 km, unes tres vegades més llarg.

Són 100 000 km (i no el doble, 72 000, com es podria pensar a primera vista) perquè, com més ens allunyem de la Terra, més feble és la interacció gravitatòria amb els cossos que hi orbiten, de manera que els quilòmetres inferiors del cable són atrets amb més força pel planeta que els quilòmetres superiors.

Aquest model seria l'ideal si es dominés a la perfecció la síntesi dels nanotubs, o si aquests es poguessin fabricar massivament en una altra factoria espacial (ja que en aquest cas no hi ha cap estació espacial o asteroide d'on es puguin extreure), de manera que és potser el model més indicat per a la construcció d'un segon ascensor, essent el primer dels 36 000 km suggerits en la primera opció i una estació terminal o un asteroide a l'extrem.



No obstant això, aquest model presenta un avantatge molt important: la possibilitat de ser usat com a llançadora espacial.

Es basa en uns principis físics molt senzills. Degut a l'enorme radi que tindria el sistema Terra-ascensor, la velocitat angular del sistema tindria associada una velocitat lineal extremadament alta a 100 000 km d'alçada, de manera que un cos ascendit fins allí i que es desprengués del cable sortiria disparat cap a l'espai exterior amb una gran velocitat:

$$v_{lineal} = r \times \omega$$

Tenint en compte que:

$$r = \text{radi del sistema Terra-ascensor} = 100\,000 \text{ km} = 1,0 \times 10^8 \text{ m}$$

$$\omega = \text{velocitat angular del sistema} = 7,29227 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

cable sortiria disparat cap a l'espai exterior amb una gran velocitat:

$$v_{lineal} = r \times \omega = 1,0 \times 10^8 \times 7,29227 \times 10^{-5} = 72922,77 \text{ m/s}$$

Amb la conservació de la velocitat angular, un cos a l'alçada de 100.000 km gira a **72.922,77 m/s** (o el que és el mateix, 20.256,32 km/h). Un cos gira a la superfície terrestre a 465,101 m/s (129,192 km/h).

El canvi és enorme: aquesta mena de fona gegantina permetria llançar cossos a l'espai amb velocitat suficient com per arribar a les proximitats de Mart en 12,34 dies (suposant que els dos cossos es troben a la distància mitjana entre ells i que la velocitat es manté constant).

Aquesta energia per aconseguir augmentar tant la seva velocitat s'aconsegueix compensant les forces de Coriolis que tendeixen a que conservi la velocitat lineal terrestre. Així el seu principal avantatge està íntimament relacionat amb el principal problema que presenta aquesta opció: la diferència de velocitats lineals entre la part inferior i la superior del cable faria que es requerís més energia per a compensar les forces de Coriolis.

3 MUNTATGE I ECONOMIA

En aquest apartat analitzarem les diferents maneres que hi ha de construir l'ascensor, i també els diferents problemes de seguretat que pot plantejar l'ascensor espacial.

Finalment parlarem de l'economia del projecte. Ja s'ha vist que la seva utilització és molt més rendible que el llançament de coets, ara cal veure si el seu finançament de la seva construcció val la pena o si pertany al camp de la ciència ficció.

3.1 CONSTRUCCIÓ

La construcció d'un ascensor espacial seria un projecte d'un abast mundial, que un Estat sol no podria dur a terme. Es requeriria la col·laboració de tots els països, i a més caldria encara una evolució important en diversos camps de la ciència dels materials, física i tecnologia.

S'han proposat diverses maneres de construir l'ascensor, que solen contemplar possibilitats que la tècnica i els coneixement actual no ofereixen, però que estan previstos teòricament per un futur no gaire llunyà. La NASA ha elaborat una llista dels 5 punts bàsics a desenvolupar per a la construcció de l'ascensor:

- 1) El **material** pel cable (desenvolupar millors nanotubs)
- 2) El **desplegament** i control del **cable**
- 3) La construcció de la **torre** per a la construcció del cable al capdamunt.
- 4) La **propulsió** de l'ascensor al llarg del cable (per exemple, la propulsió per làser o la propulsió per levitació electromagnètica)
- 5) El **desenvolupament** de la infraestructura espacial necessària: contrapès i indústria espacial.

A partir d'aquests punts, s'han desenvolupat diversos projectes que permetrien construir l'ascensor. N'analitzarem dos en concret: el **mètode tradicional** i el mètode **Bradley Edward**

3.1.1 EL MÈTODE TRADICIONAL

El primer pla de construcció de l'ascensor era extremadament senzill, incloïa tan sols principis físics simples. Era l'anomenada **construcció des de baix**.

Aquestes primeres idees consistien en ascendir la part superior del cable de l'ascensor fins a l'òrbita geostacionària, i anar-la deixant caure simultàniament. A la vegada, s'hauria de desplegar el fragment inferior del cable des de la superfície de la Terra cap amunt.

Les forces de marea (la **gravetat** i la **inèrcia** que notaria un cos que intenta fugir de la Terra) assegurarien que els dos extrems del cable es toquen, una estirant l'extrem ascendent cap avall i l'altra ajudant a ascendir l'extrem ancorat a la superfície.

Durant el desplegament del cable, les **Forces de Coriolis** causarien un desplaçament cap a l'est del cable que està ascendent i un desplaçament cap a l'oest del que està baixant. Aquest efecte es podria anul·lar controlant la velocitat a la que el cable és desplegat.

El principal inconvenient del mètode tradicional és que implica haver d'enviar tones i tones de material (el cable de nanotubs de carboni) a l'espai exterior fent servir els mitjans actuals: coets espacials o llançadores convencionals. Això representa una despesa d'energia extremadament gran i resulta molt car.

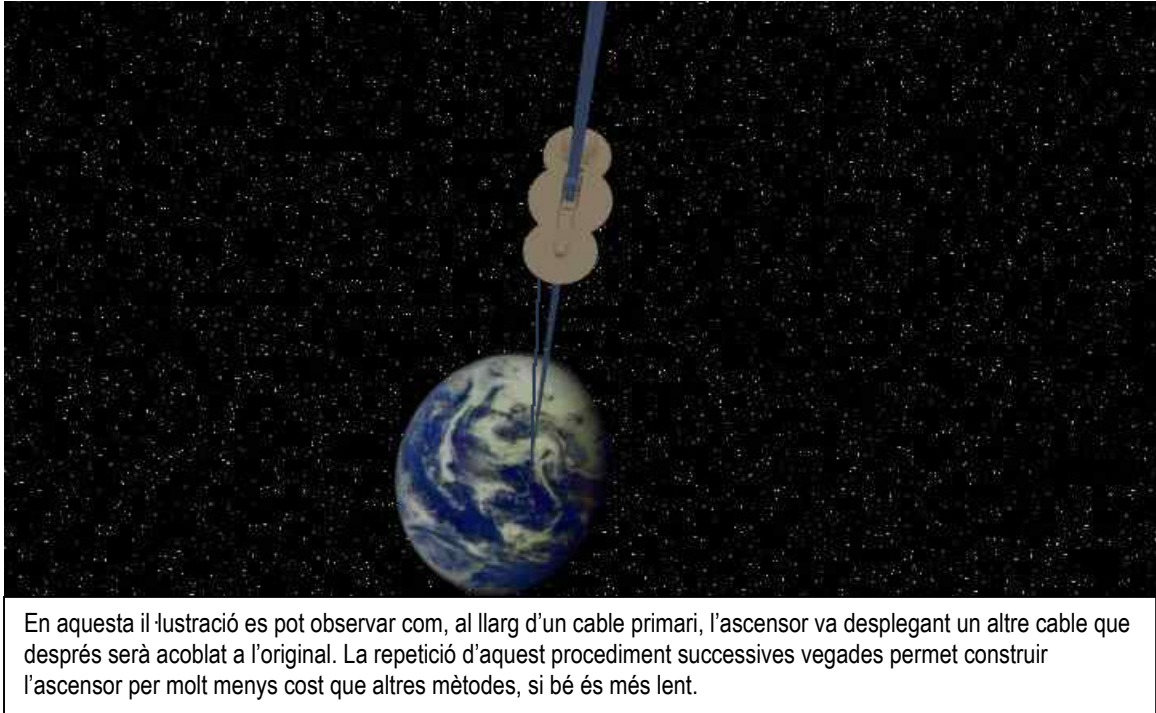
3.1.2 EL MÈTODE BRADLEY EDWARD

El científic **Bradley C. Edward**, del departament de recerca de l'Institut per a la Recerca Científica de Virgínia, als EUA, ha proposat un sistema alternatiu basat en el sistema tradicional. És el sistema de **cable primari** o **cable llavor**.

Aquest mètode està basat en el que s'usa actualment per a la construcció de ponts penjants. El procés de construcció és molt més llarg, però redueix considerablement els costos astronòmics del mètode tradicional. En una dècada es calcula que estaria a punt.

La idea consisteix en elevar amb el mètode anterior un cable molt lleuger i de prestacions inferiors a les requerides per a que l'ascensor sigui viable com a mètode de sortida a l'espai. Tan sols pesaria unes 18 tones i tindria un gruix de pocs mil·límetres. La capacitat d'elevar masses d'aquest cable seria molt reduïda i no es podria començar a utilitzar a l'acte, però seria molt més barat d'enviar a l'espai. Aquestes 18 tones serien molt més barates d'enviar a l'espai amb mètodes tradicionals que no pas tot l'ascensor sencer.

Després, progressivament, fibres més gruixudes i resistents del cable serien ascendides per aquest “cable primari” i acoblades immediatament, de manera que les prestacions del cable s’anessin incrementant, fins que l’ascensor assolís els nivells de resistència, esforç de tensió i massa ideals per a la seva utilització plena.



Com es pot comprovar, aquest mètode s'aprofita del fet que ja s'ha esmentat al principi del treball i que serveix d'hipòtesi de tota la idea: és molt més econòmic enviar una mateixa massa a l'espai amb un ascensor que amb un coet.

3.2 ECONOMIA

Parlant de l'economia de l'ascensor espacial cal deixar clara una cosa: no se sap (i de moment no es pot saber) quan podria costar la seva construcció. Però tractar aquest aspecte és obligatori si es vol que algú s'interessi en el projecte. És evident que cal una inversió important per aconseguir que l'ascensor esdevingui una realitat: per un cantó les investigacions prèvies que encara queden, i després la construcció són etapes que requereixen fons abundants.

A aquest efecte, cal aconseguir la implicació de diverses **Agències Espacials**, com la ESA, la NASA, Rússia, Xina, el Japó... que treballin conjuntament en el projecte. Però també és important atreure la **inversió privada** per a finançar el projecte, i per això és bàsic deixar clar que **l'ascensor donarà beneficis**:

- El principal procediment per a amortitzar la inversió és utilitzar l'ascensor per a **transportar** càrrega de la Terra a l'espai exterior, ja siguin béns o persones. Hi ha multitud de destins possibles: la òrbita geostacionària o qualsevol altra, la Terra, Mart, Venus, el cinturó d'asteroides, els Punts de Lagrange*... Si s'optimitza al màxim el sistema es podrien aconseguir uns preus suficientment baixos per a que qualsevol empresa o Universitat tingués el seu propi programa espacial, permetent d'estendre i democratitzar la recerca aeroespacial.
- És possible generar **energia per al consum** gràcies a l'ascensor. Es podrien arribar a utilitzar estacions amb panells d'**energia solar** en òrbita, que captessin millor la radiació solar que les terrestres, i que després l'enviessin al planeta.
- El fàcil accés a l'espai exterior pot determinar que sigui viable per a certes indústries, com per exemple la farmacèutica, l'electrònica..., construir **estacions industrials** en òrbita per aprofitar les condicions físiques especials de l'espai, com la microgravetat.

S'ha demostrat que el seu ús regular és més viable que les llançadores, però, ¿quan s'amortitzarà la seva construcció? Depèn de quants dels punts anteriors es puguin aplicar per aconseguir beneficis, però n'hi ha molts més: si hi ha algú disposat a pagar, qualsevol cosa que es vulgui fer a l'espai serà molt més senzilla de realitzar amb l'ascensor.

***Punts de Lagrange:** En física i astronomia els punts de Lagrange són les ubicacions en l'espai on el camp gravitatori entre dos objectes M i m s'anul·la, de manera que un tercer objecte de massa inferior pot quedar-s'hi estacionari de manera indefinida. Cada sistema M - m en té 5

4 CONCLUSIONS

La revolució tecnològica dels transbordadors i coets espacials que va fer l'espai accessible als humans per primer cop ja ha arribat als seus límits i, com ja s'ha dit, és l'hora de buscar nous sistemes per fer més accessibles els viatges espacials.

D'entre altres mètodes en experimentació, hem triat l'ascensor espacial i hem analitzat amb major o menor detall alguns dels seus aspectes. Així doncs, de tot el que s'ha dit, quins són els punts que ens han de fer veure amb més claredat que l'ascensor espacial és una alternativa viable per a la futura exploració espacial? Els detallarem a continuació.

- El primer i més important és la **reducció de costos** d'explotació del sistema. Amb l'ascensor, l'energia gastada en enviar una massa a l'espai és directament proporcional al valor d'aquesta massa. La reducció, que pot arribar a ser de més del 95% per enviaments anàlegs als dels transbordadors actuals, implica un accés molt més ampli per part de la societat a l'exploració aeroespacial, permetent que s'hi incorporin universitats, països en desenvolupament, empreses, particulars...

No només hi ha una reducció del cost energètic, sinó que aquesta energia pot ser subministrada per qualsevol font d'energia terrestre (de les que disposem en abundància) i no és necessari carregar tones i tones de combustible en dipòsits per obtenir energia química, com en l'actualitat.

En resum: tan sols es paga pel que s'envia, i a més es paga menys.

- Un altre avantatge és la **homogeneïtzació del transport**. En l'actualitat per transportar una càrrega a diferents llocs de l'atmosfera calen sistemes diferents: per exemple, els transbordadors només són capaços d'arribar a la òrbita baixa terrestre (entre 200 i 2000 km d'alçada), i per arribar a òrbita geosíncrona (36000 km d'alçada) calen coets més potents (i evidentment més cars).

Amb l'ascensor, aquesta disparitat de sistemes de transport desapareix: tot es pot ascendir i descendir amb el mateix sistema i deixar-ho en òrbita a l'alçada desitjada, o fins i tot, com ja s'ha explicat, "disparar" un cos a l'espai exterior com si es tractés d'una fona i una pedra.

- Malgrat els costos astronòmics que pugui tenir la seva **construcció**, s'ha de tenir en compte que és una inversió que a mig o llarg termini es pot amortitzar, que les tecnologies necessàries per al seu desenvolupament tenen continuïtat més enllà de l'exploració espacial (els nanotubs, en medicina i electrònica, per exemple) i que, al capdavant, la renovació total de la flota de transbordadors espacials dels Estats Units (prevista a partir del 2010) també tindrà un cost astronòmic per als contribuents nord-americans.
- La **tecnologia** necessària és un altre aspecte interessant. Tot i que no estigui disponible en la seva totalitat a dia d'avui, res fa pensar que sigui inassolible. De fet, la investigació està, majoritàriament, en el bon camí.

Fa tan sols vint anys, aquest projecte s'hauria qualificat d'irrealitzable pel fet que es desconeixia l'existència dels nanotubs de carboni, el material per construir el cable. Si bé és cert que encara hi ha dubtes respecte si són realment la solució, i que encara s'estan investigant en detall les seves propietats, representen un avanç molt important. Un altre aspecte en el qual s'avança positivament és la propulsió de l'ascensor. Les tecnologies de levitació magnètica s'estan optimitzant cada vegada més, fent aquest sistema viable per a cada vegada més aplicacions: perquè no l'exploració espacial?

És més: un acord internacional amb l'objectiu de tirar endavant l'ascensor espacial aniria més enllà del simple fet de la seva construcció i els avantatges derivats, ja que donaria un impuls definitiu a la recerca en altres àmbits de la ciència i la tecnologia (els nanotubs o la levitació magnètica tan sols en són un exemple) que tindrien multitud d'aplicacions pràctiques a la Terra.

Així doncs, es pot concloure que serà viable la construcció de l'ascensor espacial, com a alternativa? En la meua opinió, i tal com s'ha intentat demostrar en aquest treball, la resposta és concloent: sí. Potser no avui mateix, però d'aquí deu o vint anys és perfectament possible.

ANNEX 1

ESTIMACIÓ DE L'ENERGIA NECESSÀRIA PER L'ENVIAMENT D'UNA MASSA A L'ESPAI AMB L'ASCENSOR I AMB UN TRANSBORDADOR ESPACIAL

Aquest annex descriu el procediment i els càlculs en els quals s'ha basat el gràfic de la pàgina 7 (apartat 1.1 *Perquè ens cal un ascensor espacial?*).

ENERGIA NECESSÀRIA AMB L'ASCENSOR ESPACIAL

Per a calcular l'energia que cal aportar a un **ascensor espacial** per a pujar una certa massa a una certa alçada, hem tingut en compte:

- El **treball** que s'ha d'efectuar per **vèncer el fregament** amb l'aire atmosfèric. Aquest treball depèn de l'alçada que es recorre i de la força de fregament a vèncer ($W_{freg} = F_{freg} \times h$).

La força de fregament, al seu torn, depèn de:

1. La densitat de l'aire (ρ), que varia molt amb l'alçada, des de 1.2250 kg/m³ a nivell de superfície fins a pràcticament zero a una altura de 100 km. A partir d'aquesta altura la densitat és tan petita que el fregament ja es pot menysprear. Les dades de densitat en funció de l'altura que s'han emprat corresponen a la de l'atmosfera estàndard (*Introducción a la Mecánica de Fluidos, Fox&McDonald, 4a ed. 1995*).
2. La velocitat del cos (v). Per simplificar-ho, s'ha suposat constant i del mateix ordre de la que s'obté en els trens bala amb tecnologia maglev: 100 m/s.
3. La superfície de l'ascensor que frega amb l'aire (S). S'ha suposat la hipòtesis de que es tractés d'un disc de 10 m de radi amb un forat al mig de 5 m.
4. El coeficient aerodinàmic del cos (c_d): el d'un disc foradat és de 1,1 (*Introducción a la Mecánica de Fluidos, Fox&McDonald, 4a ed. 1995*).

I es pot expressar com:

$$F_{freg} = \frac{1}{2} \times c_d \times \rho \times v^2 \times S$$

D'aquesta manera, el treball total necessari per vèncer el fregament es calcula sumant el que es necessita per a diferents capes de l'atmosfera, entre altura = 0 i altura = 100 km (més enllà el fregament és pot considerar nul):

$$W_{freg} = \frac{1}{2} \times c_d \times v^2 \times S \times \sum \rho_i \times h_i$$

La següent taula mostra les diferents capes en les quals s'han dividit els 100 primers km d'atmosfera, el valor puntual de la densitat i el valor mitjà que s'ha emprat en cada tram.

densitat de l'atmosfera		
altura (km)	densitat (kg/m3)	d. mitjana (kg/m3)
0,0	1,22500	
0,5	1,16375	1,19438
1,0	1,11169	1,13772
3,0	0,90932	1,01050
6,0	0,66015	0,78474
9,0	0,46709	0,56362
12,0	0,31189	0,38949
18,0	0,12164	0,21676
24,0	0,04694	0,08429
30,0	0,01841	0,03268
40,0	0,00400	0,01120
50,0	0,00103	0,00251
60,0	0,00031	0,00067
70,0	0,00009	0,00020
80,0	0,00002	0,00005
90,0	0,00000	0,00001
100,0	0,00000	0,00000

- El **treball per ascendir un cos dins del camp gravitatori**. Ve donat per la fórmula:

$$W_{\substack{\text{vèncer} \\ \text{gravetat}}} = \left(m_{\substack{\text{càrrega} \\ \text{útil}}} + m_{\text{ascensor}} \right) \times M_{\text{Terra}} \times G \times \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_f} \right)$$

1. Les m són les masses a ascendir: la de la càrrega ($m_{\text{càrrega}}$) i la de l'ascensor buit (m_{ascensor}). Aquesta última depèn del radi de l'ascensor, de la seva densitat, alçada i gruix de les seves parets. M_{Terra} és la massa de la Terra.
2. G és la constant gravitatòria universal.
3. Els valors r_0 i r_f són, respectivament, els radis inicial (des d'on parteix el cos) i final (on arriba el cos) respecte el centre de la Terra.

La **suma d'aquests dos treballs** (treball per vèncer el fregament i treball per vèncer el camp gravitatori) proporciona l'**energia total** que s'ha d'aportar per a ascendir una massa concreta amb unes propietats com les descrites anteriorment amb l'ascensor espacial.

Per tal d'avaluar la massa de l'ascensor s'han fet les següents hipòtesis:

1. Es tracta d'un ascensor en forma de torus.
2. Té un radi extern de 10 m i un radi intern de 5 m
3. Té una altura $a = 5$ m
4. El gruix mitjà de les parets és de 0,1 m (10 cm)
5. La densitat mitjana de l'ascensor és de 3000 kg/m^3 (similar a l'alumini).

Mitjançant les dades i la fórmula següent podem trobar la massa aproximada de l'ascensor:

$$m_{\text{ascensor}} = 2\pi \times [(r_{\text{extern}}^2 - r_{\text{intern}}^2) + h \times r_{\text{extern}} + h \times r_{\text{intern}}] \times a \times \rho$$

Variant l'alçada a que es vol enviar la càrrega, la massa d'aquesta càrrega i les característiques físiques del cos s'obté, mitjançant el procediment descrit, l'energia necessària que s'ha fet servir per a elaborar el gràfic. Tot això es troba explicitat a la taula següent per al cas d'una massa de 13000 kg i una alçada de 360 km (òrbita baixa terrestre):

COST ENERGÈTIC DE PUJAR UNA MASSA 13000 kg FINS UNA ALÇADA 360 km

AMB L'ASCENSOR ESPACIAL	
Treball fregament	1,3671E+10J
v (velocitat d'ascensió)	100m/s
c_d (coeficient aerodinàmic)	1,1
radi extern	10m
radi intern	5m
Superfície de fregament	235,6m ²
Treball de fregament	1,3671E+10J
Treball gravitatori	1,0116E+12J
m (massa ascendida)	13.000,00 kg
G (constant gravitatòria universal)	6,67E-11 N·m ² /kg ²
radi inicial (superfície terrestre)	6.300.000,00 m
radi final	6.660.000,00 m
M_{Terra}	5,97E+24kg
Treball total	1,0252E+12J

Repetint aquests càlculs per a masses d'entre 0 i 25000 kg , i amb les opcions de 36000 km i 360 km d'alçada obtenim el gràfic de l'energia en funció de la massa carregada, obtenint dues rectes ascendents quan augmenta la massa. Això ens permet concloure que **l'energia emprada és directament proporcional a la càrrega ascendida**.

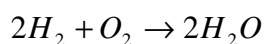
ENERGIA NECESSÀRIA AMB UN TRANSBORDADOR ESPACIAL

Per altra banda, calcularem l'energia que cal aportar a un **transbordador espacial** per a pujar una certa massa a l'espai exterior. Cal tenir en compte que aquests càlculs s'efectuen amb el model de transbordador espacial nord-americà, que tan sols és capaç d'enviar càrrega útil a l'òrbita baixa terrestre (per exemple, a 360 km d'alçada, on es troba la Estació Espacial Internacional).

Per a efectuar el càlcul s'ha tingut en compte el mètode emprat per l'ascensor per propulsar-se i escapar de la gravetat terrestre, el Tercer Principi de Newton d'acció reacció: el transbordador ha d'ejectar una quantitat de material mitjançant coets propulsors per a accelerar-se.

Trobem dos tipus de coets:

- El **coet extern**, disposa d'un dipòsit on hi ha O_2 i H_2 , i on es produeix la reacció:



L'entalpia de formació de l'aigua (degut a la reacció que té lloc dins del dipòsit de combustible extern) és: $\Delta H_{fH_2O} = 241,830 kJ / mol$

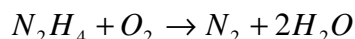
Segons la taula següent, les quantitats de H_2 i O_2 al dipòsit extern són:

Càrrega dipòsit extern	102.000,00	kg H_2
	616.000,00	kg O_2
	718.000,00	kg total
Mols totals H_2	51.000.000,00	mols

Amb l'entalpia de formació de l'aigua i sabent els mols d' H_2 que contenia el dipòsit podem saber l'energia despesa; en aquest cas és:

Energia del dipòsit extern	1,2333E+13 J	
Entalpia de formació H_2O	241.830,00	J/mol
Mols totals H_2	51.000.000,00	mols
Energia obtinguda a l'extern	1,23E+13 J	

- Els **coets SRB**, o coets auxiliars (que tractarem com si fossin un de sol del doble de capacitat). Obtenen l'energia de la combustió d'una substància anomenada hidrazina (N_2H_4). La reacció és la següent:



L'entalpia de combustió de la hidrazina és: $\Delta H_{fN_2H_4} = 691,166 \text{ kJ/mol}$ (A. Cotton, G. Wilkinson, *Química Inorgànica Avanzada*, LIMUSA, 1976)

Entre els dos coets SRB disposen d'una massa de combustible de 1.000.000 kg, repartida a parts iguals entre O_2 (massa molar 32 g/mol) i N_2H_4 (massa molar 32 g/mol). És a dir, que es produeix la combustió de 500 000 kg de hidrazina (suposant que la càrrega es produeix en proporcions estequiomètriques).

El càlcul de l'energia despesa queda explicat en aquesta taula:

Energia obtinguda dels dipòsits SRB		
	9,6745E+12J	
Entalpia de combustió hidrazina	619.166,67	J/mol
Càrrega dels SRB total (2)	1.000.000,00	kg
Càrrega total hidrazina	500.000,00	kg
Mols totals hidrazina	1,563E+07mols	
Energia obtinguda als SRB	9,674E+12J	

La **suma de l'energia** aportada per la combustió de l'**hidrogen** del dipòsit extern i la **hidrazina** dels dipòsits auxiliars SRB representa l'energia total que cal aportar per a ascendir una massa determinada. A la taula següent es reproduïx el càlcul complet per a obtenir els resultats descrits abans:

COST ENERGÈTIC DE PUJAR UNA MASSA x AMB UN TRANSBORDADOR ESPACIAL	
Energia del dipòsit extern	1,2333E+13J
Entalpia de formació H_2O	241.830,00J/mol
Càrrega dipòsit extern	102.000,00kg H_2
	616.000,00kg O_2
	718.000,00kg total
Mols totals H_2	51.000.000,00mols
Energia obtinguda a l'extern	1,23E+13J
Energia dels dipòsits SRB	9,6745E+12J
Entalpia de combustió N_2H_4	619.166,67 J/mol
Càrrega dels SRB total (els 2)	1.000.000,00kg
Càrrega total hidrazina	500.000,00kg
Mols totals hidrazina	1,563E+07mols
Energia obtinguda als SRB	9,674E+12J
Energia total	2,2008E+13J

Com es pot comprovar, aquesta energia no depèn de la massa ascendida: pràcticament sempre és la mateixa, tan si es vol ascendir un cap d'agulla com si es vol ascendir del telescopi Hubble. Això es deu a la gran massa de tot el conjunt del transbordador (prop de 2.000.000 kg, 2.000 tones) en comparació amb la massa que es pot ascendir (30 tones contant els astronautes i altre material), de manera que una petita variació en la càrrega no afecta pràcticament en el volum de matèria que els coets han d'expulsar per a accelerar el transbordador.

Així doncs, no cal repetir aquest càlcul per a diferents masses ni per a diferents alçades (les dades emprades corresponen únicament a un transbordador nord-americà, que només arriba a l'òrbita baixa terrestre, com per exemple 360 km), de manera que a la gràfica de la pàgina 7 (apartat 1.1 *Perquè ens cal un ascensor espacial?*) **l'energia emprada pel transbordador és constant.**

ANNEX 2

VARIACIÓ DEL PERÍODE DE ROTACIÓ DE LA TERRA

El principi de conservació del moment angular ens diu que aquesta magnitud és sempre constant. La modificació del sistema Terra per formar el sistema Terra-ascensor (amb molt més diàmetre i una massa lleugerament superior si s'importa un asteroide per a la construcció) implica la reducció de la velocitat de rotació del planeta per a que es compleixi el principi (i una reducció del període).

L'objectiu, doncs, és quantificar la variació del període de rotació terrestre, no fos cas que el planeta reduís catastròficament la seva velocitat rotacional. Cal calcular, doncs, la velocitat del sistema en dos casos per al mateix moment angular:

- 1) El cas actual, el planeta Terra sol
- 2) El cas hipotètic, el planeta Terra amb l'ascensor inclòs. Consta del planeta, el cable i el contrapès.

Primerament definim el **moment angular** (L) d'un sòlid com el producte del seu moment d'inèrcia (I) per la seva velocitat angular (ω)

$$L = I \times \omega$$

La **velocitat angular** és la mateixa per a tots els elements de cada sistema, ja que el període de rotació és el mateix.

El **moment d'inèrcia** d'un sòlid és un paràmetre que depèn de la distribució de masses del sòlid i del seu eix de rotació. A major massa i diàmetre, tenim un moment d'inèrcia més gran.

Segons el principi de conservació del moment angular (L):

$$\begin{aligned} L &= L' \\ I \times \omega &= I' \times \omega' \end{aligned}$$

Així doncs, el moment angular ha de ser igual abans i després (és constant), i si es modifica el moment inercial es modificarà la velocitat angular.

CAS A) LA TERRA

El moment d'inèrcia total del cas **A)** és igual al de la Terra

Si es té en compte que el radi de la Terra i la seva massa són:

$$r = 6378 \text{ km} = 6,378 \times 10^6 \text{ m}$$
$$m = 5,9660 \times 10^{24} \text{ kg}$$

El moment d'inèrcia de la Terra, I_{Terra} és igual a:

$$I_{Terra} = I_{TOTAL \text{ A)}} = \frac{2}{5} \times m \times r^2$$
$$I_{TOTAL \text{ A)}} = \frac{2}{5} \times 5,9660 \times 10^{24} \text{ kg} \times (6378 \times 10^6 \text{ m})^2 = 9,7076088 \times 10^{37} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

CAS B) LA TERRA, EL CABLE I EL CONTRAPÈS

La $I_{TOTAL \text{ B)}}$ és igual a la suma de la I_{Terra} , I_{cable} i la $I_{contrapès}$, que calcularem a continuació.

$$L = I_{TOTAL \text{ B)}} \times \omega' = (I_{Terra} + I_{cable} + I_{contrapès}) \times \omega'$$

La I_{Terra} és la mateixa que abans

$$I_{Terra} = 9,7076088 \times 10^{37} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Per al cable, cal tenir en compte que:

$$l = \text{longitud del cable} = 36000 \text{ km} = 3,6 \times 10^6 \text{ m}$$
$$r = \text{radi del cable} = 5 \text{ m}$$
$$\rho = \text{densitat del cable (densitat dels nanotubs de carboni)} = 2260 \text{ kg/m}^3$$

Així doncs, la I_{cable} és

$$I_{cable} = \frac{1}{3} \times m \times r^2 = \frac{1}{3} \times [\rho \times (\pi \times r^2 \times l)] \times l^2 = 2,7604 \times 10^{27} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Per al contrapès, cal tenir en compte que:

$$m = \text{massa del contrapès (especulació)} = 7,5 \times 10^9 \text{ kg}$$
$$r = \text{distància entre el centre de la Terra i el contrapès} = 42000 \text{ km} = 4,2 \times 10^6 \text{ m}$$

Així doncs, la $I_{contrapès}$ és:

$$I_{contrapès} = m \times r^2 = 1,323 \times 10^{25} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Concloem que la $I_{TOTAL\ B)}$ és:

$$I_{TOTAL\ B)} = I_{terra} + I_{cable} + I_{contrapès}$$

$$I_{TOTAL\ B)} = 9,707608877706 \times 10^{37} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 + 2,7604 \times 10^{27} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 + 1,323 \times 10^{25} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{TOTAL\ B)} = 9,70760887803736 \text{ } 106 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

COMPARACIÓ CASOS A) I B): CONSERVACIÓ DEL MOMENT ANGULAR

Degut al principi de conservació del moment angular, aquest ha de ser el mateix sigui quin sigui el moment d'inèrcia dels sistemes. Així, com que el moment d'inèrcia ha variat amb la construcció de l'ascensor, també variarà la velocitat de rotació del planeta.

Aplicant el principi de conservació del moment angular:

$$L_{A)} = L_{B)}$$

$$I_{TOTAL\ A)} \times \omega_{A)} = I_{TOTAL\ B)} \times \omega_{B)}$$

$$9,7076088777 \text{ } 6 \times 10^{37} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \times \omega_{A)} = 9,70760887 \text{ } 803736 \text{ } 106 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \times \omega_{B)}$$

$$\omega_{B)} = \omega_{A)} \times 0,9999999999 \text{ } 71428$$

La velocitat angular del cas **B)** és lleugerament més petita que en el cas **A)**. Si assumim un període de rotació de la Terra de 23,9345 hores, o el que és el mateix 86 164,2 segons, obtenim que el nou període de rotació serà:

$$T_{B)} = T_{A)} / 0,9999999999 \text{ } 71428 = 86164,2 \text{ s} / 0,9999999999 \text{ } 71428$$

$$T_{B)} = 86164,2000024618 \text{ s}$$

És a dir, que amb l'afegiment de l'ascensor espacial la Terra trigarà 0,000024618 s més a realitzar una rotació completa sobre el seu eix ($2,4618 \times 10^{-6} \text{ s}$).

Per a fer aquesta aproximació s'ha considerat el pitjor dels casos: assumint que l'ascensor té un contrapès exterior (un asteroide) i a més que el material per als nanotubs no prové del planeta. Si el material amb que es construí l'ascensor provingués de la Terra i el contrapès fos una estació espacial també terrestre, el sistema no patiria un augment de massa, per la qual cosa el canvi encara seria menor. Per altra banda assumim moltes simplificacions: que el radi del cable és constant, que es tracta d'un cable massís... De totes maneres el resultat seria molt similar.

REFERÈNCIES I BIBLIOGRAFIA

Associació *Astroseti* de divulgació científica en espanyol. www.astroseti.org

Charles Clarke, Arthur, *Fountains of Paradise*, Victor Gollancz Ltd., 1979

Cotton A., Wilkinson G., *Química Inorgánica Avanzada*, LIMUSA, 1976

Fox J., MacDonald A., *Introducción a la Mecánica de Fluidos*, McGraw-Hill, 1995.

LiftPort Group, Il·lustracions del departament de divulgació; agraïments a Michael Laine.
www.liftport.com

Oly, Cristophe, "Ascenseur spatial: un rêve qui manque de solidité.", 2006.

Pearson J. (1975). "The orbital tower: a spacecraft launcher using the Earth's rotational energy".
Acta Astronautica 2: 785–799.

Pugno, Nicola, "On the Strength of the Carbon Nanotube-Based Space Elevator Cable: From Nano- to Mega-Mechanics", 2006.

Fundació *Wikipedia*. www.wikipedia.org