

Energia solar des de la Lluna

David R. Criswell

Dan R. Greenwood

Robert D. Waldron

David Criswell és coinventor del Sistema d'Energia Lunar i és director de l'Institute for Space Systems Operations de la Universitat de Houston. Dan Greenwood és president de la Coalició del Sistema d'Energia Lunar i de Netrologic Inc. Robert Waldron és coinventor del Sistema d'Energia Lunar i un científic degà de Rockwell International

L'article tracta de plans per crear un Sistema d'Energia Lunar (energia solar recollida a la superfície de la Lluna i emesa en forma de microones cap a una sèrie d'antenes situades a la Terra) com un mitjà per rectificar els desequilibris en el consum d'energia i el seu impacte mediambiental, alhora que se satisfan les exigències globals. A la Terra, el sistema es pot afegir als sistemes de distribució d'energia ja existents, bàsicament com a connexions d'un reactor de fusió ja en marxa: el Sol.

Pràcticament, tots els assumptes mediambientals importants a què s'afronta el món tenen alguna relació significativa amb l'energia, la seva disponibilitat total, la seva conversió en formes útils i la seva distribució, o amb l'eficiència i els costos de la seva utilització.

El concepte d'energia solar, copsada a la superfície lunar i projectada en forma de microones a una sèrie d'antenes de la Terra és un pensament radical, però realista, que ofereix la perspectiva de crear una font d'energia immensa, neta i sostenible. Els aspectes tècnics d'aquest Sistema d'Energia Lunar (LPS) van ser resumits pels seus inventors, Dr. David R. Criswell i Dr. Robert D. Waldron (1991). Les seves idees es remunten a un treball anterior del Dr. Peter Glasser (1977), que proposava grans satèl·lits que recollissin l'energia solar en una òrbita geosincrònica i projectessin l'energia a la Terra, i a un altre de G. O'Neill (1975) que proposava la construcció d'aquests satèl·lits a l'espai, bàsicament amb materials lunars, per tal d'estalviar-se les dificultats i el cost d'enviar les parts de construcció en òrbita geosincrònica. L'LPS imaginat per Criswell i Waldron va més enllà d'aquestes primerenques idees i considera la Lluna un satèl·lit ja en òrbita, que pot servir con una muntura estable per disposar acumuladors fotovoltaics d'energia solar, convertidors d'energia solar a microones i les grans antenes segmentades d'energia projectada a la Terra (Figura 1). Aquesta idea desenvolupada en un sistema elaborat podria canalitzar desenes de terawatts d'energia no contaminant, fent servir tecnologia bàsica i verificada, amb equipament de massa passiva i baixa, recorrent grans distàncies a la velocitat de la llum, que es podria fer servir a on i quan fes falta, alhora que es minimitzarien les connexions físiques. A la Terra, el sistema es podria connectar a sistemes/graelles de distribució d'energia en molts llocs, com a nous generadors no contaminants, però bàsicament com a connexions amb un reactor de fusió ja en marxa: el Sol. Aquest article intenta: 1) presentar la potencialitat

de l'LPS en el context del medi ambient i els problemes i reptes socials relacionats amb el canvi global; 2) enumerar els seus papers en la planificació futura de les activitats espacials i les decisions polítiques; i 3) augmentar el coneixement bàsic que podria influir sobre les futures decisions polítiques per part de les nacions amb presència a l'espai. Aquestes intencions no prejutgen els resultats de l'importantíssim Programa de Recerca pel Canvi Global i el seu enfocament holístic en la comprensió de l'ecologia de la Terra. Efectivament, la probable resposta global a les aportacions de la indústria/tecnologia als gasos d'efecte hivernacle es comprendrà molt millor després d'una o dues dècades d'observació coordinada i de modelització numèrica. Per contra, ens interessem per les àrees complementàries de les noves tecnologies, les necessitats globals d'energia i per unes condicions de la vida humana sostingudes i millorades. L'LPS podria aportar beneficis a gairebé tots els sectors relacionats amb l'energia global i els problemes mediambientals actuals.

Comparacions

Els primers càlculs de l'LPS (Criswell i Waldron, 1990) prediuen que a llarg termini l'economia es desbordarà en relació amb els costos actuals d'energia, sense ni tan sols considerar la influència positiva sobre el medi ambient descrita abans. Tanmateix, els costos que precedeixen l'obtenció de qualsevol mena d'energia lunar són grans i inclouen els costos de desenvolupament de la nostra capacitat de fabricació a la Lluna per tal de fer servir components lunars amb materials majoritàriament lunars, habitatges lunars, transport terra-Lluna, i l'enginyeria i el desenvolupament dels subcomponents inicials del sistema total. Com a resultat, el desenvolupament de l'LPS ha de ser intrínsecament global, i caldrien organitzacions i estructures socials internacionals. A partir del moment que s'iniciï la trans-



● **Figura 1.** Sistema d'Energia Lunar

La Lluna com una plataforma per projectar una energia solar barata i mediambientalment neta a la Terra (0.1-100 TW). Construir l'LPS sobretot amb materials lunars

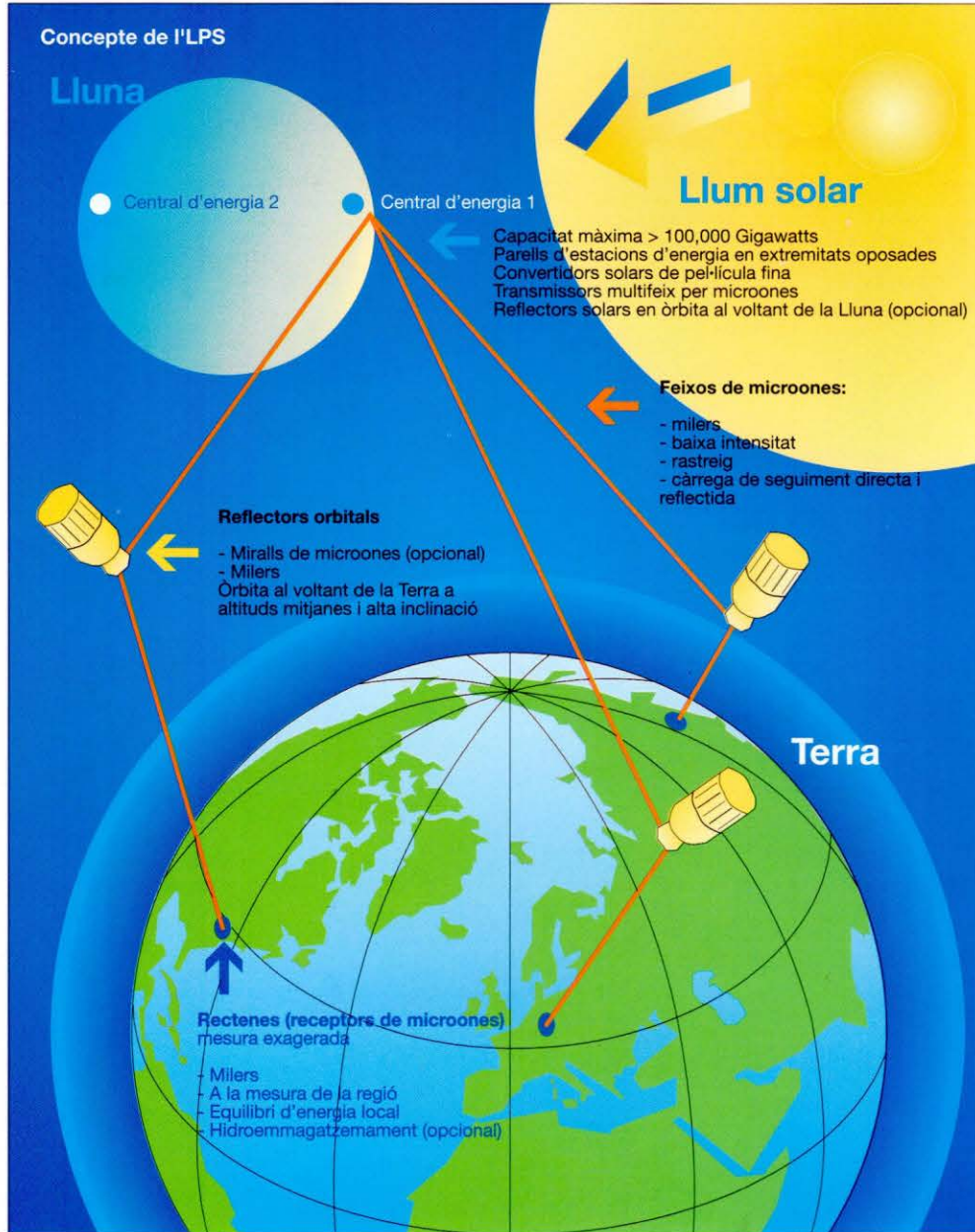


Figura 1. Esquema dels components més importants del Sistema d'Energia Lunar (sense escala). L'acumulació fotovoltaica i la transmissió per microones a la Lluna produeix feixos concentrats que són rebuts per antenes rectificadores de la Terra (rectenes), encara en un camp proper. S'aparellen sèries d'acumuladors i transmissors a la Lluna,

des del punt de vista de la Terra, per tal de preveure el cicle lunar de dia i nit. La transmissió cap a la part oculta de la Terra des de la Lluna es faria amb uns miralls de microones en òrbita. La llum solar addicional es podria reflectir en uns acumuladors des d'uns miralls que orbitessin la Lluna.

missió d'una quantitat significativa d'energia, l'expansió econòmicament sostenible de les instal·lacions lunars i terrestres s'anirà imposant gradualment.

El 1991, la nostra estimació dels costos per als EUA per a una configuració de l'LPS amb un rendiment d'1, 10 i 100 gigawatts (elèctrics) pujava a 60.000 milions de dòlars, 90.600 M\$ i 243.400 M\$, respectivament, per a períodes de deu anys de desenvolupament. L'actual excés mundial de capacitat de llançament, i la quantitat de científics i enginyers aeroespacials i de defensa sense feina abaixarien aquests costos, probablement en un factor de deu.

La concepció de l'LPS comparteix molts avantatges amb la teoria de l'energia solar terrestre, però té avantatges únics. La intensitat de la llum solar és més forta a la Lluna, no hi ha núvols que hi interfereixin, la construcció es pot alleugerir gràcies a la baixa gravetat i l'absència de vents, pluja, pedra, pols en quantitats significatives, terratrèmols, etc., els problemes de neteja no existirien, i les qüestions de l'emmagatzemament d'energia durant les hores nocturnes a la Terra s'evitarien. S'han fet molts avenços en tecnologia fotovoltaica (Sandia, D.O.E., 1989); les conversions es fan més eficients i les tecnologies de pel·lícula fina avancen (Fang, 1988). Probablement, no serà tan significativa una eficiència absoluta per a la conversió fotovoltaica solar sobre la Lluna com ho és la seguretat i la construcció; una reducció de l'eficiència es pot compensar amb un augment de la zona d'acumulació. Aquesta compensació no seria tan efectiva en l'acumulació solar terrestre, a causa dels requeriments de construcció més pesada, de neteja, manteniment i del preu de la terra.

Les instal·lacions fotovoltaïques terrestres i altres energies solars i el seu desenvolupament tècnic associat, amb valors de les energies netes i la terra reservada en zones altes i assolades de la Terra seran ideals perquè es converteixin en emplaçaments per a les sèries de rectenes necessàries per a l'LPS.

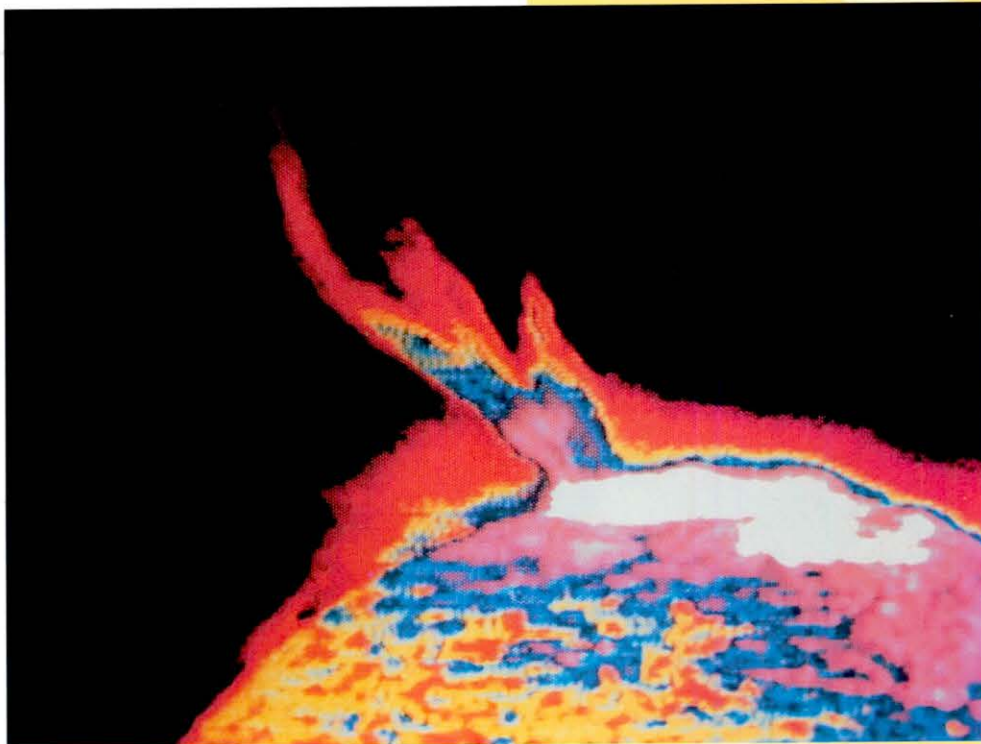
Evidentment, hi haurà una importació neta d'energia per sobre del nivell solar natural que penetrarà a l'atmosfera de la Terra (prop de 90.000 terawatts), si es fa servir la idea de l'LPS, però no pas més, en escales de períodes curts, que si es gastés la mateixa energia en combustibles fòssils però sense agreujar com aquesta l'efecte hivernacle. A més, l'energia rebuda no comportarà conversions fotovoltaïques o tèrmiques que suposin una minva de la seva eficiència. Les rectenes seran estructures molt obertes, i alguna mena de material reflector de baix grau sobre la mateixa zona pot compensar aquesta importació d'energia, si s'escau.

L'LPS també es compara favorablement amb els satèl·lits d'energia solar i la possible futura fusió D/He₃.

No hi haurà cap gran necessitat de satèl·lits geoestacionaris en un Sistema d'Energia Solar per Satèl·lit, que poguessin interferir amb els estudis astronòmics. Aquest sistema permet la transmissió des d'una base estable i poc canviant, de les característiques orbitals de la Lluna, alhora que permet fer servir antenes de transmissió molt llargues que projectin feixos de raigs microones dirigits des de grans obertures, impossibles de fer amb satèl·lits artificials.

La tecnologia de fusió, que considerem mereixedora d'una investigació contínua, necessita amb urgència un rendiment tecnològic important, ja que si més no deixa algun residu radioactiu; les idees per extreure He₃, implantat en sòls lunars pel vent solar i necessari per a la fusió D/He₃, tenen alguns aspectes de desenvolupament comuns amb l'aprofitament de l'energia solar des de la Lluna, com per exemple la recuperació de He₃ mentre es treballa a la superfície lunar amb els acumuladors i les antenes.

Sembla obvi que en el futur serà necessària una mescla d'energies viable i, per això, aprofitem que es considerin totes les energies alternatives. Tanmateix, tret de l'LPS, no hi ha cap font d'energia que tingui el potencial suficient per ser una font



d'energia global ni en un futur pròxim ni distant, com han estat fins ara els combustibles fòssils (Informe de la NASA Lunar Energy Enterprise Case Study Task Force, NASA TM 101652, juliol 1989). L'energia derivada de la biomassa, amb el seu clàssic atractiu, pot comprometre les necessitats d'aliments i provocar un empobriment del sòl. L'energia tèrmica dels oceans, que té un gran potencial en indrets molt concrets, com ara les illes oceàniques i algunes regions costaneres, fa curt si es tracta de distribuir-la a l'interior dels continents, i modificaria la temperatura dels oceans si es fes servir massivament durant segles com a energia global. Els vents adequats per crear una energia estable només es produeixen en algunes regions. Els recursos geotèrmics, que són suficients en algunes àrees, no estan regularment distribuït quant a accessibilitat i intensitat. Fins i tot l'extracció d'energia solar en grans quantitats d'algunes regions vulnerables de la Terra podria ocasionar canvis climàtics locals que podrien crear una capa de núvols extra. Hem preparat una taula (Taula 1) que compara els Sistemes d'Energia Global potencials més importants del segle XXI.

El concepte d'energia solar, copsada a la superfície lunar i projectada en forma de microones a una sèrie d'antenes de la Terra és un pensament radical, però realista, que ofereix la perspectiva de crear una font d'energia immensa, neta i sostenible

Un sistema d'energia global hauria d'augmentar més que no disminuir els recursos de la Terra i no hauria d'introduir nova contaminació. Hauria de créixer ràpidament per millorar i sostenir el nivell de vida dels països en desenvolupament i per preservar i millorar el nivell de vida de les nacions desenvolupades. L'energia solar recollida a la Lluna i enviada a la Terra ofereix aquesta perspectiva i podria ser definitiva per sostenir les necessitats energètiques mundials.

Fons per a la recerca de l'LPS

El govern dels EUA va dedicar prop de trenta milions de dòlars a comprovar la possibilitat d'obtenir energia de l'espai entre els anys 1970 i 1980, i des d'aleshores ha retallat les seves subvencions en aquests estudis. Nogensmenys, s'han gastat molts milions de dòlars en investigació per al Programa d'Iniciativa de Defensa Estratègica (IDE, la famosa *guerra de les gal·làxies* de Reagan) que inclou tecnologia que se sobreposa a moltes de les tecnologies necessàries per a l'LPS. El senyor Jim Sneyry de Ball Corporation's Aerospace Systems Group, i el capità Steve Katapski de la USAF, van proporcionar a la Coalició LPS molts dels detalls tècnics no classificats sobre els Experiments de la Missió Transmissió SDIO (RME), en què un raig làser va ser reflectit en un mirall de .0,6 metres a bord d'un satèl·lit que es movia aproximadament a 27.000 Km per hora a una altura de 500 kilòmetres. L'experiment va tenir un gran èxit i es pot disposar del mateix equipament per a experiments no militars com les investigacions de l'LPS. Els mètodes verificats al programa RME es van discutir en un article que contenia un sistema d'anàlisi de la distribució de l'energia global de l'energia solar terrestre fent servir satèl·lits reflectors (Rogers, 1981). Aquest concepte està molt relacionat amb un desenvolupament evolutiu possible dels satèl·lits reflectors de microones per distribuir l'energia LPS al cantó de la Terra que no estigui de cara

● **Taula 1.** Només l'energia solar aconsegueix l'objectiu amb un baix risc de sostenibilitat, i l'energia solar amb base a la Lluna té més avantatges a llarg termini

Sistema d'energia	1 Producció màxima	2 Màxim nivell d'energia utilitzable (Gw ^o)	3 Temps d'esgotament (anys)	4 Factors limitadors	5 Productes contaminants	6 Tendència dels costos a llarg termini	7 Riscos per assolir l'objectiu
Biorecursos	100*anys	1.000	<10	manipulació de masses nutrients, ús d'aigua superficial	CO ₂ , Bioriscos -metà -malaltia	augmenta	impossible
Carbó	<1.500.000	20.000	100	subministrament, contaminació	co ₂ , cendres, àcids, calor residual	augmenta	impossible
Petrolí	<100.000	5.000	<30	subministrament	co ₂ , àcids, calor residual	augmenta	impossible
Fissió nuclear	>500*anys	500 càrrega de base	100s	accidents i terrorisme, acceptació social	productes radioactius, combustibles consumits, components de calor residual	augmenta	alts
Fusió nuclear	>20.000 *anys	1.000	100s (D-T) <100s (D-He ₃)	enginyeria, demostració, vida de la primera paret, (D-T), equilibri energètic*	components de calor residual radioactius	?	alts
Hidroelèctrica	2.000*anys	2.000	<1.000s	emplaçaments i reompliment, pluja, trencament de presa	transport de sediments, aigua	augmenta	impossible
Oceanotèrmica	<1.000.000	<20.000	<100	aigües fredes i profundes	equilibri energètic	augmenta	impossible
Energia solar terrestre	>20.000* anys	>20.000 No lligada a càrrega màxima o de base	>10 ⁹	nebulositat emmagatzement, distribució, equilibri*	calor residual, producció de residus	disminueix	moderats
Energia solar per satèl·lits	2.000*anys	2.000 càrrega bàsica	>10 ⁹	deixalles orbitals, nebulositat runes orbitals	llum del cel, deixalles orbitals	disminueix	impossible
Sistema d'energia lunar	>>20.000* anys	>100.000 seguiment de base i càrrega	>10 ⁹	microones perdudes	cap	disminueix	baixos

*Equilibrant les càrregues tèrmiques locals i interhemisfèriques

Una comparació entre les possibilitats d'aconseguir l'objectiu de produir 20 terawatts (20.000 gigawatts - GW) d'energia utilitzable i continua de diversos Sistemes d'Energia per al segle XXI. L'objectiu de 20 terawatts es basa en 10 mil milions de persones amb 2 kW cada una. No hi ha una intenció de coherència entre les primeres tres columnes. La columna 1 expressa la producció màxima, per als recursos no renovables com a total disponible de GW per anys i per a les fonts renovables com a disponible continu en GW per anys. La columna 2 estima el nivell màxim d'energia utilitzable amb

un esforç màxim per explotar la font, i la columna 3 estima el temps d'esgotament a aquest esforç màxim, reconeixent també les limitacions i les sancions en forma de contaminació a la Terra, columnes 4 i 5. Les tendències del cost es veuen només a llarg termini per a una aplicació d'energia global, i no reconeixen possibles tendències a la baixa a curt termini en aplicacions de desenvolupament i locals, p. ex. oceanotèrmiques. Altres fluxos mediambientals, no enumerats (vent, geotèrmics, de la marea, de les ones), no s'acosten ni de lluny a l'objectiu, ni tan sols combinades.

a la Lluna. Creiem que aquest tipus de transferència de tecnologia acabarà sent molt beneficiosa per a l'aplicació amb una millor relació cost-eficiència de l'LPS.

Sembla que la tasca d'aconseguir fons per a la investigació i el desenvolupament de l'LPS requereix que la gent senti la mateixa urgència que s'acostuma a apoderar d'un país abans d'una guerra. Aquí la urgència que es busca va dirigida a obtenir prou energia neta per abastar les demandes de l'inexorable creixement de població sense fer malbé l'entorn cada vegada més fràgil de la Terra. Aconseguir aproximadament un bilió de dòlars per instal·lar un LPS que rendeixi més d'un trilió de watts d'energia elèctrica en un període de deu anys exigeix, per exemple, que cent milions de persones paguin mil dòlars l'any durant deu anys. Per un LPS totalment americà la manera més directa de fer-ho seria un tribut imposat pel govern. Actualment, cent milions de contribuents americans —o de futurs contribuents— paguen uns tres mil dòlars l'any per mantenir la potència militar. Partint de la base que s'establís una pau i una cooperació duradores, sembla més viable un programa de cooperació internacional i, òbviament, surt més a compte econòmicament.

Així doncs, amb aquest escenari, 400 milions de contribuents en tot el món pagarien 250 dòlars l'any durant deu anys. Amb la reducció actual d'hostilitats a tot el món aquesta quantitat de diners podria sortir de les assignacions per a defensa existents. De fet, molts treballadors del camp de la defensa podrien continuar fent pràcticament la mateixa feina. Aquest manteniment de les feines serviria per establir països amb grans infraestructures de defensa, com ara els EUA i l'antiga Unió Soviètica, en què es preveu una desocupació massiva com a resultat de les ràpides reduccions del pressupost dedicat a defensa (Burgasov, Maryniak 1993). Un dels avantatges de fer servir aquests fons/recursos per a l'LPS és que es calcula un 30 % de retorn de la inversió, cosa que no és possible amb les inversions en defensa

ni en les seves filials tecnològic/comercials associades. També és evident que un gran benefici polític serà la unificació i direcció mundial que aquest programa oferiria alhora que contribuiria a asserenar l'estat cada dia més caòtic del món, en què es produeix una crisi darrera l'altra.

Etapes següents

Tot i que no s'han trobat problemes tècnics irresolubles durant els treballs previs, els següents temes demanen un posterior estudi, reflexió creativa, avaluació i comparació amb les alternatives:

Interacció directa i indirecta amb la biosfera, dels feixos de microones de baixa intensitat i de radiació de microones de dispersió de baixa intensitat, incloent-hi interaccions via la ionosfera, l'atmosfera i altres dominis terrestres.

Precisió i seguretat dels feixos, fent èmfasi en els processos i les limitacions físiques, i incloent-hi el disseny de successius assaigs de validació més realistes.

Seguretat total, que inclourà reforçament i redundància, altres energies de continuació i necessitats d'emmagatzemament d'energia.

Transmissió d'energia, les perspectives i requeriments, i els camps electromagnètics associats.

Seguretat i vulnerabilitat davant els fenòmens naturals, com ara tempestes magnètiques i terratrèmols terrestres, i els errors i intencions humans, incloent-hi dissenys per minimitzar riscos.

Practicabilitat de la construcció lunar incloent-hi totes les tecnologies, habitatges, transport, necessitats d'energia lunar i activitats inicials per al desenvolupament lunar.

Complementarietat amb altres projectes, per exemple, aplicacions de la força dels ions en la recollida de He₃.

Costos i calendari, basats tant en anteriors estudis (p. ex. Koelle, 1988), com en d'altres de relacionats, o en aquest estudi.

Organització i estructures socials de suport, dedicades als recursos tècnics, so-

L'LPS pot proporcionar l'energia elèctrica solar a la Terra a un cost menor que els sistemes terrestres convencionals



cials, legals i financers amb un ampli suport de cooperació, i que estableixi les motivacions que serà necessari inculcar per portar a terme un projecte tan innovador.

Exigències de l'LPS

El 2050 els habitants de la Terra necessitaran més de 20.000 bilions de watts (GWt) d'energia elèctrica per continuar amb els estàndards de vida actuals. El segle XXI, les necessitats d'energia poden sobrepassar els 100.000 bilions de GWt.

El Sistema d'Energia Lunar (LPS) pot proporcionar l'energia elèctrica solar a la Terra a un cost menor que els sistemes terrestres convencionals i amb molt menys impacte mediambiental.

Una Base Lunar Internacional tripulada (ILB) podria accelerar el desenvolupament de l'LPS:

- proporcionant el transport inicial i l'habitatge, de manera que es reduirien enormement els costos i els riscos primaris.
- fent una demostració durant 5 o 10 anys d'instal·lació d'un LPS a escala moderada (1-100 GWt);
- fent possible l'estudi primerenc de dissenys alternatius de l'LPS, mètodes d'instal·lació, manteniment, i fabricació *in situ* de l'equipament d'instal·lació.

Els LPS poden estimular l'establiment d'una ILB:

- augmentant de forma notable la riquesa neta mundial i afavorint la prosperitat general;
- oferint un suport més ampli i més recursos a les operacions fora de la Terra més enllà de la investigació científica;
- accelerant el desenvolupament de recursos a la part de la Lluna visible des de la Terra i a tota la Lluna.

Un programa internacional de LPS pot fomentar la confiança mundial en el fet que els recursos lunars s'estan desenvolupant a favor del benestar de la humanitat. Aquí comparem els costos de SPS i LPS i esbossem l'organització d'un programa internacional de LPS.

Necessitat d'energia elèctrica solar des de l'espai

A la Figura 2 veiem les dues opcions energètiques oposades al món. La corba de dalt representa el món tal com és ara dependent dels recursos tèrmics d'energia derivats dels recursos terrestres (Edmons i Reilly 1985, DoE 1991, Holdren 1990). Es pot apreciar que el món acaba tot just de començar a fer un ús intensiu dels seus recursos no renovables d'energia tèrmica.

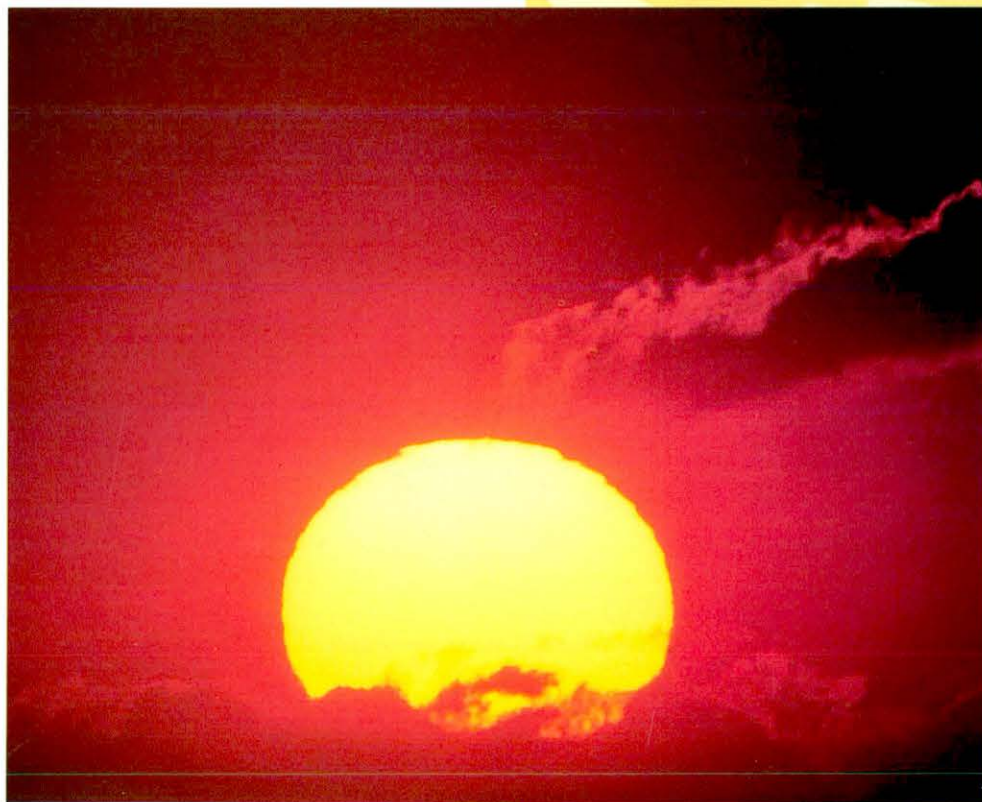
Des de l'inici de la revolució industrial l'ús total mundial d'energia industrial, bàsicament tèrmica, ha crescut un 3,6 % l'any aproximadament. A la Figura 2 s'assumeix que aquest índex de creixement continuarà fins que la producció per càpita mundial d'energia assoleixi els 10 kWt/persona a mitjan segle XXI. Actualment, els quatre mil milions de persones dels països en desenvolupament utilitzen menys de 0,7 kWt/persona. L'augment d'ús d'energia per càpita és la funció decisiva. El creixement de població és el factor secundari. Es considera que la població mundial creix el 0,9% l'any des de 1950 a 1900 i l'1,4% després.

El 2100, la quantitat total d'energia tèrmica utilitzada podria haver esgotat del tot l'inventari conegut (107 GWt-A) de totes les fonts no renovables de la Terra tret dels gasos deuteri i hidrogen que s'utilitzen en els reactors de fusió.

La Taula 2 resumeix la tasca, el capital i el conjunt de centrals d'energia necessàries per produir 1 GWt-Any d'energia amb les plantes d'energia existents actualment (DeLaquill et al. 1988; DoE 1980a; DoE 1980b; DoE 1988; Martin Marietta 1984). L'energia solar tèrmica terrestre (TTSP) i els sistemes d'energia solar fotovoltaica terrestre (TPSP) estan augmentats en un factor de 2. Això simula el seu ús com a subministradors d'energia de càrrega base més que d'energia només a la tarda o al vespre.

A més, per produir 1 GWt-A d'energia, una central de combustible fòssil ha de cremar aproximadament 2.700.000 tones de carbó. Això costa de 80 a 190 milions de dòlars. La central de fissió deu consumir aproximadament 200 tones d'urani enriquit de carboni amb una despesa de 12 a 48 milions de dòlars. El tractament dels residus dels sistemes fòssil i nuclear afegeix un cost significatiu a les despeses de combustible i capital.

Una transició entre energia solar terrestre i espacial es pot produir entre el 2000 i el 2050

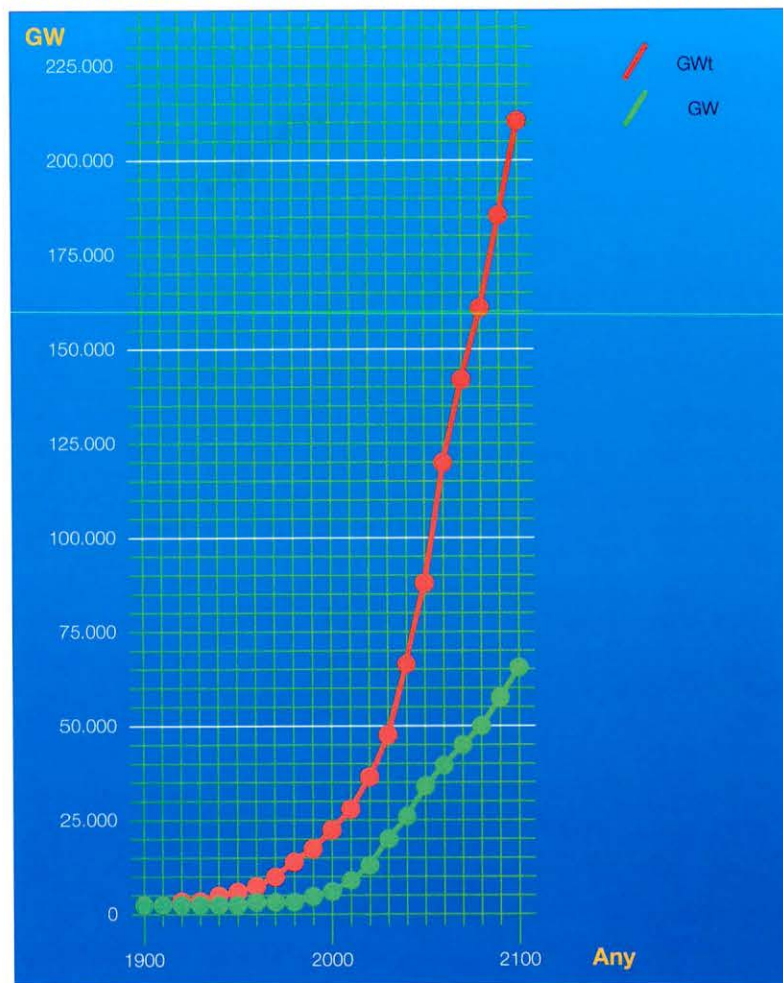


No és probable que un sistema d'energia solar terrestre (TPS) pugui arribar a ser el subministrador d'energia més important de la Terra. De mitjana, un TPS d'abast mundial que incorporés tecnologia avançada proporcionaria als usuaris menys de 20 Wt per m² d'àrea de recol·lecció. A més a més, les instal·lacions secundàries són cares i exigeixen l'emmagatzemament de quantitats immenses i indeterminades d'energia (100 - 1.000 GWt-A) i la redistribució mundial d'energia. La Taula 2 no inclou els costos d'aquests elements importants per a un sistema d'energia planetari basat en TTSP o TPSP (Criswell 1991).

La columna d'*Energia neta* es refereix a l'índex de duració de les respectives centrals d'energia. Això és la integral, sobre la duració de la central, de la producció neta d'energia anual dividida per la suma de les entrades d'energia externa anual. L'energia dels combustibles fòssils o nuclears no s'hi inclou. Les entrades inclouen l'energia provinent de l'exterior, per exemple, el petroli que fa funcionar un tren de carbó o l'energia per transformar l'òxid d'urani en urani enriquit. Inclou l'energia extreta del combustible primari per fer funcionar la planta i les entrades d'energia per construir la planta i els seus sistemes de subministrament d'energia. Els TTSP, TPSP i LPS porten energia de qualitat nova i neta a la Terra. Com més gran és l'índex d'energia neta més energia s'extreu del sistema per acumular l'energia necessària per construir-lo i mantenir-lo. Les plantes de fissió fòssil i nuclear disminueixen les reserves d'energia no renovable de la Terra.

La corba de baix de la Figura 2 dona el nivell equivalent funcional d'energia elèctrica a l'energia tèrmica de la corba de dalt. Si els escenaris de població estimada i d'utilització d'energia continuen com s'espera, una transició entre energia solar terrestre i espacial es pot produir entre el 2000 i el 2050.

● **Figura 2.** Creixement del sistema energètic global



● **Taula 2.** Opcions energètiques per GW-Any

	Tasca Treball-Any(1)	Capital 10 ⁶ \$	Massa per central tones	Energia neta
Fòssil(2)	260	200	10,000	3 to 4
Fissió(3)	800	250	41,000	3.3
Solar terrestre (torre d'energia)	1,500	470	314,000	11.5
Solar terrestre (fotovoltaica)	3,100	760	434,000	1.4
LPS	<20(Terra) <1(Lluna)	20 -	5,200 -	90(rect) 200(Lluna)

(1) \$36,000 a \$63,000/any per tasca (2) Més 81 a 190 M\$/GW-Any per carbó (3) Més 12 a 48 M\$/GW-Any per urani enriquit



La Lluna té un paper vital en el subministrament d'energia elèctrica a la Terra al segle XXI

Sistema d'energia lunar

El 1989, la NASA va finançar un estudi que va concloure que la Lluna té un paper vital en el subministrament d'energia elèctrica a la Terra al segle XXI. Una comissió de l'Oficina del President dels Estats Units ha recomanat un estudi de l'ús dels recursos lunars per proporcionar energia a la Terra (Stafford 1991). Una de les opcions presentades en tots dos informes és l'establiment de bases d'energia solar a la Lluna per enviar l'energia elèctrica a la Terra. Aquests estudis recents indiquen que l'LPS pot subministrar tota l'energia necessària per a la Terra l'any 2050 (>20.000 GWt) i augmentar el subministrament per satisfer una superior demanda.

Després de construir un LPS de demostració, tots els costos d'expansió de l'LPS es poden compensar amb els beneficis resultants de la venda d'energia de la Lluna. La filera de LPS de la Taula 2 indica que el sistema elaborat tindrà un capital i uns costos de treball baixos. L'LPS pot proporcionar un índex intern de retorn que sobrepassi el 30 % l'any. Això pot passar al cap de 10 anys de l'inici de la construcció sobre la Lluna. És raonable esperar beneficis nets de l'ordre de 15 bilions de dòlars/A si 20.000 GWt es venen a 0,1 \$/Kw/h. Els models econòmics preliminars indiquen

que l'LPS tindrà un impacte positiu en l'economia mundial. L'LPS pot proporcionar un creixement estable d'energia i estabilitzar el cost d'energia (Thompson i Criswell 1991).

Hi ha diverses opcions per a la construcció de l'LPS que minimitzen les operacions a l'espai i els components orbitals.

Un LPS bàsic inclou parelles d'estacions d'energia solar que projectin l'energia directament a les rectenes de la Terra durant l'estona que aquestes puguin veure la Lluna. L'emmagatzemament d'energia a la Terra o a la Lluna pot proporcionar una producció contínua d'energia a la Terra quan la Lluna no estigui a la vista (<16 hores/dia) o quan la Lluna tingui un eclipsi (<3 hores).

Un sistema més avançat inclou miralls de microones en òrbita al voltant de la Terra. Aquest sistema subministraria contínuament energia de càrrega a les rectenes de la Terra tret dels períodes de tres dies de la lluna nova. Els reflectors de microones, a una intensitat donada dels projectors de microones, donarien una reducció de factor tres en la mesura de les rectenes necessàries per proveir d'energia una regió de la Terra. Tanmateix, serien necessaris aproximadament tres dies d'emmagatzemament d'energia a la Terra o a la Lluna durant el període de lluna nova quan les bases dels dos extrems es trobin en nit lunar.

És preferible minimitzar l'ús de costosos sistemes d'emmagatzemament d'energia, i això es pot aconseguir amb miralls de microones en òrbita al voltant de la Terra. La duració dels dipòsits d'energia també es redueix augmentant la fracció del mes lunar en què cada estació d'energia està il·luminada pel Sol. També es poden construir altres unitats de conversió d'energia solar al llarg de l'extremitat lunar des de les respectives estacions de transmissió cap a la Terra. Cada sèrie de cruïlles d'extremitats proporciona energia elèctrica durant la lluna nova i durant tres quarts parts del mes lunar (Waldron i Criswell 1991).

L'LPS es pot augmentar col·locant miralls reflector (p. ex. veles solars) en òrbita polar al voltant de la Lluna. Aquests miralls il·luminen les bases lunars durant la lluna nova, durant un eclipsi i quan una base es troba en el seu cicle nocturn. Les veles també augmentarien el flux solar a les estacions d'energia durant el període diürn de superfície. Les veles solars funcionen com uns *poals de llum* que senzillament aboquen tota la seva llum solar en una secció de la base d'energia lunar més propera. No han d'estar de cara al Sol o ser contínuament recol·locades. Un LPS elaborat probablement inclourà tots els elements anteriors.

Una representació esquemàtica d'una de les bases extremes de l'LPS hauria d'incloure una sèrie de moltes parcel·les d'energia aïllades. Les parcel·les d'energia ocupen una zona el·líptica sobre la Lluna que se situa cap a la Terra al terminador; tal com es veu des de la filera A de les parcel·les d'energia, s'estenen des de la part de l'extremitat lunar orientada a la Terra al llarg d'una línia dirigida vers la Terra.

Els components primaris d'una típica parcel·la d'energia són els següents. La llum solar recollida pels conversors solars es canvia en electricitat. L'energia elèctrica es recull amb instal·lacions de superfície i subministra molts conversors de circuits integrats de microones en estat sòlid (MICC). Cada MICC envia un senyal individualment controlat a una graella reflectora de microones a la banda oposada de la parcel·la d'energia. Aquest senyal es reflecteix cap a la Terra com a subfeix aportat per aquesta parcel·la d'energia. Una sèrie de MICC, un MICC per parcel·la d'energia (i n'hi ha milers), actua per formar un feix. Els centenars o milers de MICC situats davant de cada graella reflectora de microones pot formar centenars o milers de feixos individuals. Tots aquests irradien des de la mateixa antena segmentada, però cada un dels raigs es pot dirigir a una rectena diferent de la Terra.

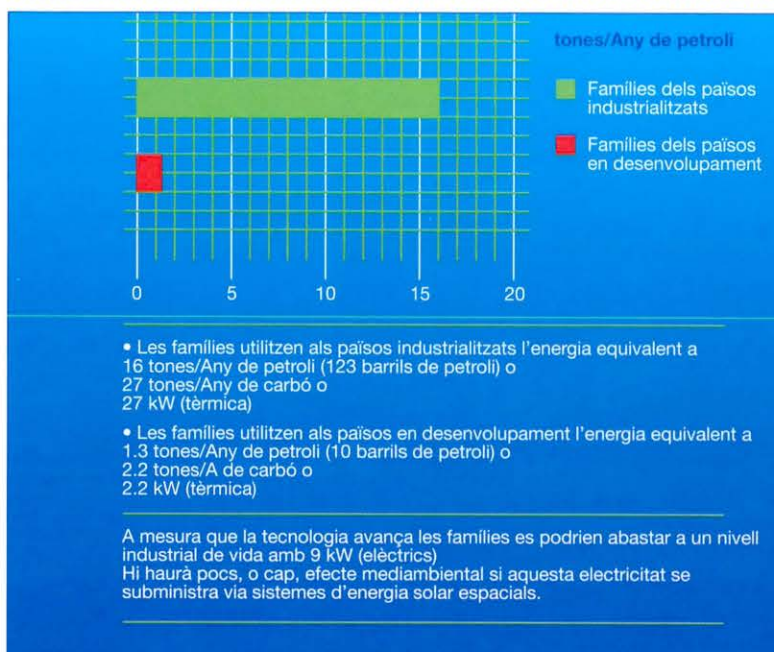
Cada feix de l'LPS des d'un diàmetre de base de 40 a 100 km està totalment controlat en intensitat, fins a una escala d'uns quants centenars de metres, transversalment a la zona seccional a la Terra. El control de fase i de l'amplària de cada un dels subtransmissors que aporten energia a un raig donat produeix l'amplitud desitjada de distribució a la Terra.

Per construir una parcel·la d'energia lunar (De Generes i Criswell 1983), serien necessaris uns quants tractors que aplanessin la superfície lunar, extraguessin ferro de gra fi, i enterressin les instal·lacions elèctriques per a l'acumulació d'energia. També haurien de posar uns vidres sota els quals es col·locarien fines pel·lícules de conversió solar. Aquestes pel·lícules serien d'eficiència de conversió moderada, 5-10 % serien suficients. Un processador de vidre mòbil fondria el sòl lunar per produir suports d'escuma de vidre, fibra de vidre i làmines de vidre. Els suports i la fibra de vidre es farien servir per fer els reflectors de microones. L'energia elèctrica solar la proporcionaria una sèrie de subtransmissors enterrats sota el terraplè a cada extrem orientat a la Terra de cada parcel·la d'energia. La Terra continua en la mateixa posició general al cel sobre una base donada. La flota de màquines relativament petites i independents es mou des d'una àrea de construcció a l'altra. L'índex d'instal·lació de noves fonts d'energia seria proporcional al nombre de màquines i de la seva productivitat.

Primers passos del desenvolupament de l'LPS

En aquesta etapa, l'LPS s'enfronta als primers obstacles. El primer és demostrar a la Terra la practicabilitat econòmica i d'enginyeria dels components crítics i dels sistemes de producció. El segon és reduir els costos bàsics. El tercer és demostrar que l'LPS és acceptable per a milers de milions d'usuaris potencials de la Terra. La Base Lunar Internacional és important per superar tots tres obstacles.

● **Figura 3.** Energia domèstica



Estudis de sistemes

Són urgents els estudis de disseny conceptual extensius de l'LPS i les alternatives al sistema de referència LPS descrit en aquest article. L'LPS és diferent de tota la resta de sistemes d'energia i aeroespacials importants. La integració primària de sistemes que forma el feix es produeix a l'espai entre la Lluna i la Terra. Els camps electromagnètics dels milers de parcel·les d'energia d'una base d'energia donada s'ajunten per produir els diversos raigs sintètics. L'amplitud de cada una de les fonts de microones que hi intervenen ha d'estar perfectament programada i controlada. Això és bàsicament un problema temporal i d'efimerietat, i entra dins de les possibilitats de l'electrònica moderna. La Lluna proporciona la plataforma que integra els sistemes físics. La mínima necessitat d'integració dels sistemes físics a gran escala té profundes implicacions en l'enginyeria i l'economia de l'LPS. Les parcel·les d'energia i les màquines que els construeixen no s'han de correspondre

absolutament, com per exemple les teules de les llançadores. Es poden estudiar molts dissenys diferents, es poden provar moltes sèries de components diferents i es poden utilitzar molts mètodes de producció diferents.

Fabricació al laboratori i al camp

Primer, és necessari un treball extensiu de laboratori en cèl·lules solars de pel·lícula fina que es puguin produir fàcilment a la Lluna emprant recursos locals. Després, cal formar els subreflectors de microones i produir les instal·lacions per acumular l'energia. El disseny d'aquests sistemes s'acobla al disseny i demostració de materials prototípics manipulats i la fabricació d'equipament. L'objectiu és fer servir equipament que tingui una massa relativament baixa per unitat de producció [Tones-equipament/(Tones-producció/Hora)]. L'equipament requeriria pocs components o massa estructural de la Terra, hauria d'estar molt automatitzat i s'hauria de poder reparar a la Lluna.

Un projecte important de disseny i d'enginyeria de sistemes de producció adaptable permetria un retorn a la Lluna amb equipament per començar immediatament una demostració de nivell de l'LPS. Des del començament, a mitjan anys seixanta, a la Terra es van fer experiments amb instal·lacions lunars simulades. Això va ser previ a l'aterratge a la Lluna. Des d'aleshores s'ha acumulat una gran reserva de coneixements pel que fa a materials i condicions lunars.

Es podrien fer simulacions adequades de construcció lunar a la Terra. Els laboratoris i els estudis més prometedors seran incorporats en sèries de demostracions autònomes de màquinària de producció mòbil a la Terra. L'equipament de producció consistiria en unitats d'exploració de caràcter general.

Radiació d'energia

No hi ha misteris tècnics bàsics relacionats amb la projecció d'energia per mitjà de microones. La teoria bàsica està entesa i la pràctica està generalitzada en el món de l'electrònica. Considerem per exemple, que tots els aparells de radar fessin servir radiació d'energia ja sia fixada per la seva òptica física o controlada a través de la programació dels subradiadors individuals. S'ha demostrat la programació de grans sistemes d'energia de microones a l'Accelerador Lineal de Stanford de tres quilòmetres de llarg des del 1968 (NRC 1981, p. 21). La tecnologia de microones està molt avançada. Tanmateix, l'aplicació de la tecnologia per projectar a nivells d'energia realistes durant períodes de temps raonables es pot demostrar a satisfacció tant de la població general com de la comunitat científica.

Es poden fer separatament les demostracions de control de feix i energia de feix. La demostració del control de l'emissió de la Lluna a la Terra es pot fer a uns nivells d'energies molt baixos. La projecció a un nivell d'energia més alt es pot fer des de la Terra a l'òrbita i de la Terra a la Lluna.

Aquestes demostracions tenen diferents propòsits. La Lluna es podrà confirmar com una plataforma adequada per a una llarga disposició sintètica, i es posaran en pràctica diferents mètodes per plantejar aquesta disposició lunar. També es podria estudiar els efectes de l'atmosfera i la ionosfera sobre els raigs d'alta densitat d'energia.

Les demostracions lunars es poden fer fent aterrar una sèrie de vehicles no tripulats a la Lluna que poden operar durant uns quants anys. Seran senzills i es podrien enviar a la Lluna en un període de cinc anys. Tres o quatre dels vehicles es col·locarien uniformement al llarg del perímetre de l'emplaçament d'una base d'energia lunar potencial. L'últim vehicle es posaria prop del centre. Cada un portaria un sistema transmissor per microones, desplegament solar i emmagatzemament en bateria que fos adequat per tal que el transmissor pogués funcionar tota la nit. Els transmissors per microones estan pensats per enviar ben poca energia, de fet, senyals de prova estretament colimats a la Terra. Els senyals es rebran normalment i podran ser contínuament controlats en grans estacions espacials. Tanmateix, els senyals de curta durada i alt nivell d'energia es poden dirigir a uns receptors menys cars de qualsevol punt de la Terra. Per exemple, el feix pot ser escanejat per sobre el campus de grans universitats per demostrar el control i la localització del feix.

Els vehicles també poden contribuir a altres estudis científics i d'enginyeria. Es poden equipar amb excavadores que enterin els transmissors de 10 a 30 centímetres al sòl lunar. Això simularia la col·locació de transmissors en un medi subsuperficial molt constant. També s'hi poden afegir paquets d'enginyeria com ara articles de prova cel·lular solar i fibres de vidre revestides de metall. Potser s'hi podria incloure exploradors robòtics autosuficients (de pocs quilos) per fer inspeccions de l'emplaçament a uns quants centenars de metres al voltant del vehicle.

Els vehicles també poden rebre senyals de prova potents des de la Terra. L'atmosfera i la ionosfera de la Terra creen les grans perturbacions dels raigs microones. Els feixos són absorbits bàsicament (un petit percentatge o menys). L'efecte secundari consisteix a autoenfocar esporàdicament una fracció de l'energia de feix en una nova direcció. Els efectes de desviació seran molt més grans si són senyals enviats des de la Terra a la Lluna que en el cas contrari. Es poden adaptar a aquesta funció grans sistemes de radar, com ara els associats amb els primers radars d'avís i el rastreig de míssils balístics intercontinentals (ICBM). Aquests radars poden proporcionar feixos sobre un ampli abast de potència i freqüència per establir la resposta completa de l'atmosfera i la ionosfera.

L'LPS proporciona energia contínua i potència de càrrega cap a una rectena de la Terra reflectint el feix d'energia des d'una successió de miralls de microones en òrbita al voltant de la Terra (Figura 1). Es poden col·locar miralls de prova de > 100 metres de diàmetre en una òrbita baixa de la Terra (LEO) des del transbordador espacial o coets no tripulats. Els sistemes de radar amb base a la Terra poden dirigir feixos de prova molt potents a aquests miralls de microones. Aleshores, els feixos es poden reflectir i redirigir a uns receptors de prova locals o a uns receptors a milers de quilòmetres de distància. Els miralls són de baixa massa però són uns mecanismes de gran abast que es poden derivar fàcilment de l'experiència existent a la NASA sobre grans estructures espacials i antenes potents. Si se'ls dona prioritat, els reflectors de 100 metres podrien estar en òrbita d'aquí a tres o cinc anys. Els transmissors amb base a la Terra del Departament de Defensa (DOD) i la Fundació Nacional Científica (NSF) (p. ex. Arecibo) i els miralls de microones poden provar perfectament els feixos de microones als nivells màxims d'energia. Aquests experiments es poden elaborar i posar en marxa ràpidament.

L'estació espacial Freedom pot donar suport a la R+D dels grans reflectors orbitals. Les tasques importants inclouen la verificació de les toleràncies de superfície, demostració de muntatge i procediments de manteniment, i l'envelliment accelerat dels components clau.

Organització i desenvolupament de l'LPS

Per elaborar un LPS, són necessaris tres tipus d'inversors: governs, consorcis i organitzacions locals. Entre ara i el 2001, els programes de govern segurament pagaran per al desenvolupament i posada en marxa dels elements de transport i la base lunar. En aquest període, les despeses es poden comparar per presentar al govern dels Estats Units les despeses en productes aerospacials per al Departament de Defensa de la NASA. L'LPS pot aportar un enfocament pacífic a la defensa actual i a les organitzacions relacionades amb la tecnologia de les nacions amb pressupost espacial.

Es pot formar un consorci nacional o internacional per elaborar, obtenir i aplicar els elements per a la producció de l'LPS i realitzar la R+D per a les rectenes. Després de l'any 2001, aquest consorci pot dirigir totes les operacions fora de la Terra. Entre el 2001 i el 2005, el consorci començaria a veure els primers ingressos de la venda d'energia a la Terra. Es podria formar més d'un consorci. Caldrien moltes bases lunars.

La R+D de les rectenes com també els seus mitjans de producció hauria d'implicar totes les nacions de la Terra. Les rectenes haurien de ser construïdes, operades i pagades per grups privats, cooperatives i països. Pràcticament tots els costos de la producció de rectenes es podrien cobrir amb el flux de líquid actual. Els principals entrebancs són els costos d'iniciació i la confiança del públic en l'LPS.

Un bon programa, del tipus Apollo, podria iniciar la construcció de l'ILB i la demostració de l'LPS a la Lluna màxim en

deu anys. Estem convençuts que l'LPS establirà una ferma economia entre els dos planetes, farà créixer el comerç entre la Terra i la Lluna, i la prosperitat en tot el món.

Referències bibliogràfiques

- Burgasov, M., Maryniak G. *Status of Russian and Former Soviet Space Power and Wireless Power Transmission Activities*, Proc. WPT-93, San Antonio, 1993.
- Criswell, D.R. «Terrestrial and space power systems: life-cycle energy considerations», a *Proceedings of SPS 91 Power from Space. The Second International Symposium*, paper a 1.2, 9 pp., París, França. Agost, 1991.
- Criswell, D.R.; Waldron, R.D. «Lunar System to Supply Power to Earth» (paper #900279), a *Proceedings of the 25th Annual Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Vol. 1 (Aerospace Power Systems), pp. 61-71, Reno, Nevada, Agost 12-17, 1990.
- Criswell, D.R.; Waldron, R.D. «Results of Analyses of a Lunar-based Power System to Supply Earth with 20,000 GW of Electric Power», a *Proceedings of SPS 91 Power from Space*, París, França. Agost, 1991b.
- De Generes, W.; Criswell, D.R. Amb l'autorització d'Unisys Corporation, 1983.
- DeLaquill, P.; Kelly, B.D.; Egan, J.C. *RD and D: Solar Central Receiver Technology Advancement for Electric Utility Applications: Phase 1 - Topical Report*, Vol. 1, Pacific Gas and Electric Company Contract GM 6343022-9. Bechtel National, Inc., Report 007.2-88.2, Agost, 1988.
- DoE. *National Energy Strategy*, First Edition 1991/1992, 217 pp. i apèndixs, Departament d'Energia, Washington, D.C. 1991.
- DoE/NE-0095 161 pp., Washington, D.C. Setembre, 1988.
- DoE; Cirillo, R.R.; Cho, B.S.; Monarch, M.R.; Levine, E.P. *Comparative Analysis of Net Energy Balance of Satellite Power Systems (SPS) and Other Energy Systems*, Departament d'Energia, DoE/ER-0056, 136 pp. Washington D.C. Abril, 1980a.
- DoE *Prototype Environmental Assessment of the Impacts of Siting and Constructing a Satellite Power System (SPS) Ground Receiving Station (GRS)*, Departament d'Energia, DoE/ER-0072, Contract #31-109-38-5251, 219 pp. i apèndixs, Washington, D.C. Agost, 1980b.
- Edmonds, J.; Reilly, J.M. *Global Energy: Assessing the Future*, 317 pp., Oxford University Press, 1985.

- Fang, Dr. P.H. «A Lunar Solar Cell Production Plant», a *Solar Cells*, 25: 31-37, 1988.
- Glaser, P. P. «Solar power from satellites», a *Physics Today*, pp. 30-38. Febrer, 1977.
- Holdren, J. P. «Energy in Transition», a *Scientific American*, pp. 157-163. Setembre, 1990.
- Koelle, Dr. H.H. «On the Life Cycle Cost and Return on Investment of a 500 GW Global Space Solar Power System», a *Acta Astronautical* Vol. 18, i a *Selected Proceedings of the 38th International Astronomical Federation Congress*, pp. 181-189, 1988.
- Martin, M. *Design of a Photovoltaic Central Power Station*, 69 pp., Contract Report SAND82-7149, DoE Contract DE-AC04-76DP00789. Febrer, 1984.
- NASA *Lunar Power System: Summary of Studies for the Lunar Energy Enterprise Task Force NASA - Office of Exploration*, Appendix B 4, vegeu Criswell (pp. 84-96) a *Report of NASA Lunar Energy Enterprise Case Study Task Force*, NASA Tech. Memorandum 101652, 178 pp., juliol NASA (1989b) Report of the 90-Day Study on Human Exploration of the Moon and Mars, 145 pp., Washington, D.C. Novembre, 1989.
- NRC *Electric Power from Orbit. A Critique of a Satellite Solar Power System*, 332 pp., National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C. 1981
- O'Neill, Dr. G.K. «Space Colonies and Energy Supply to the Earth», a *Science*, 190(4218): 943-947. «Photovoltaic Gaining Place in Sun», a *Energy Technologies at Sandia National Laboratories: Past, Present, Future* (1989) SAND89-1832, UC-900, 1989: 59-71, 1993.
- Rogers, T.R. «Reflector Satellite for Solar Power», a *IEEE Spectrum*, pp. 38-43, juliol, 1981.
- Stafford, T. P. *America at the Threshold: America's Space Exploration Initiative, Synthesis Group* (T. P. Stafford-Chairman), 144 pp. i 64 pp. apèndix. U.S. GPO, Washington, D.C. 20402, 1991.
- Thompson, R.; Criswell, D. R. (en preparació) *Solar Power Economic Potential*, Universitat de Houston, 1991.
- Waldron, R.D.; Criswell, D.R. «System Requirements/Constraints and Design Options for a Global Lunar Power System», a *Proceedings of the 26th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Vol. 1 «Aerospace Space Power Systems». (Boston, MA). 7 pp. Paper #91-0277. Agost, 1991.