

Prototip de veles solars impulsades per làser per al viatge interestel·lar

Josep Pinyol Escala

Universitat Politècnica de Catalunya UPC, Departament de Física, Av. Víctor Balaguer 1, Vilanova i la Geltrú-08800, SPAIN

Resum. El principal objectiu d'aquest treball és fer el disseny d'una sonda espacial que pugui ser capaç de realitzar un viatge interestel·lar.

En el treball s'avaluen varis mètodes de propulsió i es decideix que la utilització de veles solars és el més adient per a realitzar el viatge tenint en compte la característica més important (la velocitat de desplaçament que pot assolir el mètode) ja que la velocitat determina la duració del viatge, un aspecte molt important a tenir en compte en aquest tipus de missió. Previ a la realització del disseny de la sonda s'estudien altres missions realitzades amb veles solars per a poder tenir-les en compte. Després d'estudiar les propietats de varis materials, es determina que el material òptim per a la construcció dels reflectors és un material compost pel polímer Kapton i per una prima capa reflectora d'alumini.

Es determina un destí interessant a enviar-hi la sonda, el planeta potencialment habitable Pròxima b. Després d'un estudi també realitzat en el treball, seria el viatge interestel·lar relativament més senzill possible de realitzar donada la seva proximitat (4,2 anys llum).

La conclusió més destacable després de la realització del disseny de la vela solar amb 1.800 m² de superfície i només 99,27 Kg, és que la sonda tarda més de 4.200 anys en realitzar el viatge fins a Pròxima b i aquest temps fa totalment inviable la seva utilització en un viatge interestel·lar tripulat. Per altra banda, la sonda aconsegueix assolir una velocitat de 300.000 m/s, superior a mecanismes de propulsió actuals i aquesta velocitat obre un ample ventall de noves propostes de missions amb la utilització del disseny de vela realitzat en aquest projecte.

Paraules clau: Vela Solar, Propulsió Espacial, Pròxima b, Viatge interestel·lar, Material reflector, Radiació Electromagnètica, Irradiància, Làser

I. Introducció

L'esperit explorador constitueix una part del ser humà. Gràcies a la tecnologia sabem que existeixen altres planetes potencialment habitables orbitant en estrelles relativament properes. És clar doncs que descobrir quin o quins d'aquests podrien ser futures colònies habitables és un objectiu a assolir anterior a un projecte més gran.

Per a poder fer el disseny adequat d'una sonda espacial, capaç de realitzar un viatge interestel·lar, o viatge a un altre sistema estel·lar, s'ha de tenir en compte quin és el destí. Les característiques de la sonda poden variar molt segons el viatge, en el cas d'un viatge d'anys llum, el més important és valorar quin és el millor mètode per a realitzar el viatge ja que el mètode escollit afectaria a la velocitat màxima de la sonda i per tant a el temps del viatge, que és el factor més important a tenir en compte.

L'estudi i el disseny de la sonda es desenvolupa sempre tenint en compte les limitacions que presenta la realització d'un projecte d'aquesta envergadura. Degut a que aquest treball és molt extens, jo com a alumne d'enginyeria mecànica el faig amb l'objectiu d'aprendre i entendre tot el possible del funcionament de varis mètodes de propulsió i les característiques d'un viatge interestel·lar. En el meu cas existeixen obstacles com el temps limitat i els recursos disponibles per a la realització del treball. Empreses d'investigació aeronàutica i espacial tenen milers d'enginyers dedicant-se a el desenvolupament d'una sonda.

II. Mètode de propulsió

La llei de la conservació del moment lineal o quantitat de moviment diu que qualsevol motor que no utilitzi massa reactiva no pot propulsar-se, no obstant això, no ens hem d'oblidar que l'espai no està buit i que és possible aprofitar característiques del entorn per poder impulsar a un cos. Els mètodes de propulsió espacial es poden dividir en 2 grups,



els que porten combustible i utilitzen a aquest per propulsar-se i els que aprofiten característiques del entorn (camps magnètics o vent solar), per propulsar-se.

Les veles solars utilitzen un fenomen físic que ha estat comprovat i mesurat a l'espai. La pressió solar afecta a qualsevol cos, sigui una estació interplanetària en òrbita, o una sonda amb destí a un altre planeta. Una sonda enviada a Mart, seria desviada centenars de quilometres només a causa de la pressió per radiació electromagnètica i actualment es tenen en compte en el càlcul de trajectòries. [1]

En el treball es justifica la vela solar com el mètode de propulsió més viable per a el viatge interestel·lar.

III. Objectiu de la sonda

El motiu de la missió és adquirir més coneixement sobre l'espai exterior que ens rodeja. Hi han diferents llocs de l'univers per a explorar i coneixem varis exoplanetes que podrien contenir vida, situats en la Zona d'Habitabilitat (ZH) (Taula 1).

Planeta	Estrella (Tipus espectral)	Limits ZH min-màx (UA)	Distància estrella (UA)	Distància a la Terra (al)	T (°C)	m (M _⊕)	r (R _⊕)	Rotació Sincrona
 Terra	G	0,84 1,67	1	0	14,9	1	1	No
 Proxima b	M	0,023 0,054	0,05	4,22	-39	1,27	1,1	Sí

Taula 1 Taula d'exoplanetes potencialment habitables, Terra inclosa per comparació. Font: pròpia

IV. Principi de funcionament

Un material que reflecteixi la radiació impulsarà la sonda mentre que un que no ho reflecteixi suficient l'absorbirà, s'escalfarà i fondrà els reflectors. La pressió de la radiació és la pressió (Força dividida per la superfície) exercida sobre qualsevol superfície exposada a la radiació electromagnètica. Quan la llum és absorbida per una superfície (superfície negra), la pressió que causa la llum sobre aquesta superfície és la densitat del flux de l'energia dividida per la velocitat de la llum. Per altra banda, quan la llum és totalment reflectida en una superfície, la pressió en aquesta superfície es duplica.

Radiation Pressure Coefficient

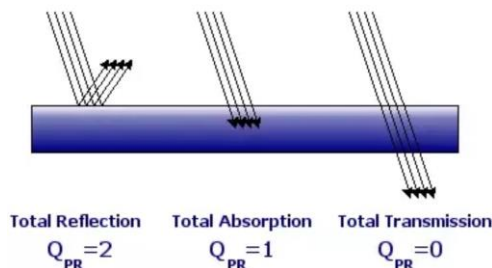


Figura 1 Coeficient de pressió de radiació electromagnètica per a diferents casos. Font: quora

Tenint en compte els coeficients de reflexió de la pressió de la radiació electromagnètica, la pressió màxima s'obté quan hi ha reflexió absoluta en una superfície. ($Q_{pr} = 2$). L'equació IV.1 determina la pressió de radiació electromagnètica que rep una superfície exposada a una font de fotons. Depèn de la irradiància (I_f) (que és igual a la potència entre la superfície de la font de fotons)

$$p = Q_{pr} \frac{I_f}{c} \quad (IV.1)$$

Coneixent la pressió per radiació que s'aplica a la sonda, es pot calcular l'acceleració que rep la Vela solar amb la equació IV.2.

$$a = \frac{p \cdot A}{m} \quad (IV.2)$$

L'equació IV.2 determina que l'acceleració de la vela és igual al producte de la pressió de radiació electromagnètica i l'àrea A dels reflectors de la sonda entre la massa m de la sonda. D'aquesta equació es dedueix que com major sigui la superfície reflectora de la vela i menor la seva massa, podrà obtenir una major acceleració.

V. Materials de la Sonda

El material pels reflectors més comú utilitzat en els últims dissenys de veles solars consisteix en una làmina composta per una capa prima de material reflector que cobreix una capa de polímer (plàstic). El polímer ofereix un bon suport mecànic a la vegada que dona flexibilitat en el desplegament de la vela. Mentre que la capa prima de material reflector és el que proveeix a la vela de la capacitat de propulsar-se. El material reflector només és necessari en la cara receptora de fotons.

Material	Densitat (g·cm ⁻³)	T. Fusió (°C)	Reflexió màx. (%)
Alumini	2,7	660	≈98
Magnesi	1,74	650	≈93
Beril·li	1,85	1287	≈93

Taula 2 Característiques dels principals materials reflectors lleugers. Font pròpia elaborada amb dades [2]

Encara que l'alumini presenta una densitat superior a la dels altres dos materials, continua sent una millor opció que la resta per a la construcció dels reflectors perquè al presentar una reflexió més alta, evita que els reflectors s'escalfin considerablement i que parts de la sonda es fonguin. Aquesta propietat és important a considerar ja que si es decideix accelerar la sonda utilitzant làsers, els reflectors de la sonda rebrien molta energia en poc temps, de la que aproximadament el 98% propulsaria la sonda, però el 2% restant seria absorbida en forma de calor. Una diferència de només el 5% en la reflexió és suficient per anteposar l'elecció de l'alumini a la dels altres materials.

Igual que tots els materials reflectors, l'alumini te una reflectància variable que depèn de les longituds d'ona de la radiació electromagnètica que reflecteix. La llum del Sol és una llum blanca (combinació de varies longituds d'ona) i per tant els reflectors d'una vela solar rebrien un major impuls utilitzant una font de llum monocromàtica (d'una sola longitud d'ona) que no pas rebent llum del Sol. Tenint en compte aquest raonament, la manera més rendible d'accelerar una vela solar seria fer-ho amb un làser (font de llum monocromàtica) que emeti una radiació electromagnètica de longitud d'ona específica. La llum emesa del làser hauria de tenir la longitud d'ona específica que el material reflector és capaç de reflectir millor. Encara que en aquest treball no s'estudia el làser que propulsaria la sonda, sí que s'estudia a quina longitud d'ona hauria de emetre la llum i la sonda es dissenya tenint en compte que seria accelerada utilitzant aquesta font de fotons (la més òptima).

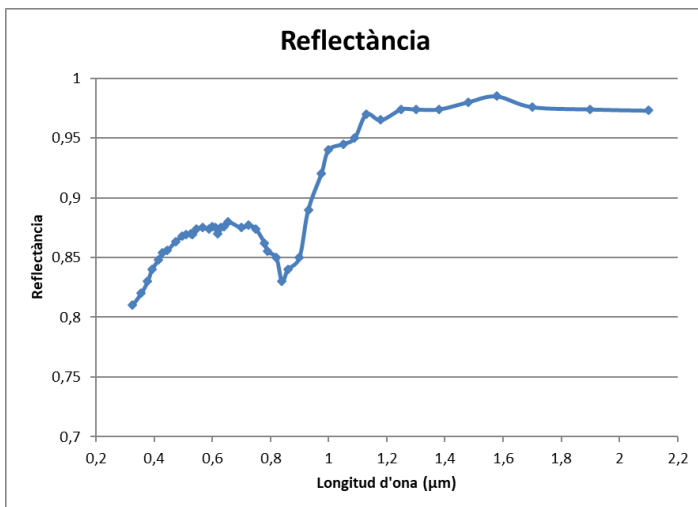


Figura 2 Gràfica de la reflexió de l'alumini en (%) en funció de la longitud d'ona. Font: pròpia, realitzada amb dades de [2]

Tal i com es mostra en la (Fig. 2), l'alumini ofereix la major reflexió en la longitud d'ona 1,58 µm. En el cas de que la vela fos propulsada utilitzant un làser, per treballar de forma òptima hauria d'emetre llum monocromàtica en aquesta longitud d'ona per tal de que la sonda obtingui la màxima propulsió possible.

Mentre la capa d'alumini te l'objectiu de reflectir els fotons, una segona capa d'un material no necessàriament reflector dona consistència i capacitat a les veles de ser desplegadas sense patir cap dany. Després d'un estudi per determinar el material d'aquesta segona capa dels reflectors, s'opta per a la utilització de Kapton en aquesta altre capa.

Un cop determinats els materials de les capes, la secció dels reflectors te un gruix total de 27 µm (gruix_{alumini} + gruix_{kapton}), i la densitat superficial dels reflectors és de 43,9 g/m² ($\sigma_{alumini} + \sigma_{kapton}$).

El material de l'estructura ha de proveir a l'estructura d'una certa consistència per a constituir una base que suporti els reflectors. L'estructura de la vela solar consisteix en 4 perfils units a un cos principal on també s'hi localitzen els sensors de la sonda. L'alumini és el material convencional normalment utilitzat per a estructures de sondes de qualsevol tipus però degut a que el material dels perfils ha de tenir el major ràtio rigidesa/densitat possible, s'opta per a la utilització de fibres de carboni o grafè. [3][4]

Els 4 perfils units al cos principal són de secció tubular circular per oferir també un alt ràtio de rigidesa/massa. Els perfils presenten una densitat lineal de 1,1875 g/cm.

VI. Configuració de les veles i disseny

Es poden considerar varies configuracions geomètriques per a aplicar al disseny de la vela solar. Les més comuns utilitzades en altres dissenys de veles solars són la quadrada, la circular y Heliogyro. Cadascuna d'aquestes configuracions presenta uns beneficis respecte a les altres dependent del propòsit de la missió. Un estudi del JPL (Jet Propulsion Laboratory) de la NASA, va determinar que la millor opció a llarg termini és la vela de perfil quadrat. [5]

En aquest treball es corrobora que la millor geometria de la vela a utilitzar en una missió de llarg recorregut és la quadrada. Es basa en determinar quin dels perfils de veles necessita menys longitud d'estructura per a suportar la mateixa àrea. Tenint en compte que la sonda ha de tenir la menor massa possible, la geometria que ofereixi una menor longitud total d'estructura serà la de menys massa.

S'observa que en tots dos casos, el càlcul de la longitud de l'estructura varia amb la superfície A segons \sqrt{A} i es pot

obtenir una relació de la longitud d'estructura entre la vela de perfil quadrat i la de perfil circular que és independent de l'àrea. La raó entre D_s , la longitud d'estructura d'una vela quadrada, i D_c , la longitud d'estructura d'una vela circular amb la mateixa àrea per l'equació VI.1.

$$\frac{D_s}{D_c} = \frac{2\sqrt{2A}}{2\sqrt{\pi A}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \approx 0,8 \quad \text{VI.1}$$

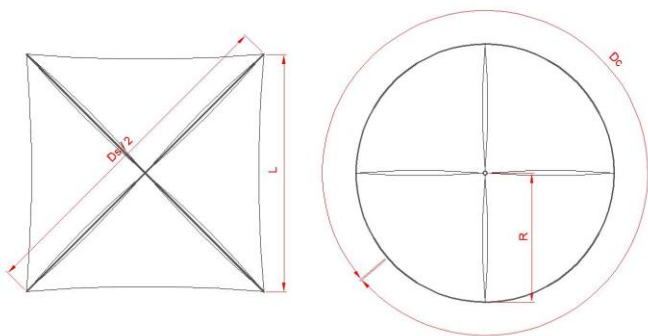


Figura 3 Comparació de configuracions amb la mateixa àrea Font: Pròpia

Aquesta relació és una mesura aproximada de l'eficàcia relativa d'aquestes dos configuracions en termes de disseny estructural. La relació determina que per a una mateixa àrea reflectora, la vela de perfil quadrada necessita aproximadament un 20% menys de longitud d'estructura i per tant l'estructura d'aquesta tindria una massa aproximadament un 20% inferior a la del perfil circular. Aquests càlculs són només una aproximació de les masses dels elements estructurals ja que tenen en compte que l'estructura té la mateixa secció al llarg de tota la seva longitud, no es tenen en compte possibles reforços que podria tenir l'estructura de la vela quadrada ja que a diferència de la circular que presenta la mateixa tensió al llarg del perfil, podria experimentar vinclament als extrems de les diagonals.

Els materials determinats per a la construcció de la vela solar són alumini i Keplar pels reflectors i fibra de carboni per a l'estructura. La configuració òptima de les veles és la quadrada. Es defineixen a continuació les dimensions de la vela. El disseny de la vela es realitza amb l'estil de que en cas de realitzar una vela d'una escala diferent però de mateix disseny, aquestes dues compartirien lleis de semblança i per tant els càlculs posteriors a el disseny de la vela com acceleracions, velocitats, temps de viatge d'aquesta es realitzarien de forma semblant.

Per a una vela solar de 1.800 m² de superfície, la vela de configuració quadrada tindria les dimensions de 42,43 m x 42,43 m de costat. Es decideixen aquestes dimensions perquè en aquest cas, les peces més crítiques del disseny i més difícil de posar en òrbita (barres de l'estructura) mesuren 30 m. Peces de dimensions difícils de posar en

òrbita però possibles. Fent el sumatori de totes les peces de la sonda amb les seves respectives masses, la sonda té una m_{total} de 99,27 kg (Fig. 4)

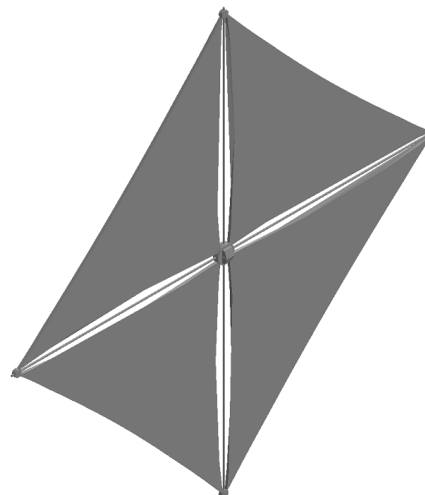


Figura 4 Perspectiva de la vela solar de (42,43 m x 42,43 m) i 99,27 kg Font: Pròpia

VII. Anàlisi de resultats

Per a poder constatar la viabilitat del prototip de vela solar dissenyat és imprescindible realitzar càlculs amb la finalitat de conèixer la velocitat màxima de la sonda, el temps que tardarà a assolir-la i el temps total del viatge un cop fixat el destí. Amb aquestes dades es pot decidir si és viable o no la utilització de la sonda de veles solars per a un viatge interestel·lar concret.

Després de la seva posada en òrbita a 630 km de distància respecte la superfície terrestre s'ha suposat que la vela és accelerada amb un làser de potència 8.000 MW (aproximadament la potència màxima que una central nuclear pot generar) i d'un angle de divergència (θ) del raig de $1 \cdot 10^{-6}^\circ$, situat a la superfície terrestre. S'ha suposat que el làser té aquestes característiques (característiques idònies) per a poder comprovar la viabilitat de la sonda. En cas d'obtenir resultats no prometedors amb aquests valors, amb valors més desfavorables tampoc ho seran.

La irradiància procedent d'un làser que rep la sonda en funció de la distància es calcula segons l'equació VII.1 on P és la potència del làser, d la distància de la sonda respecte el làser, θ l'angle de divergència del raig del làser i A l'àrea en la que es projecta la llum del làser (que augmenta en funció de la distància).

$$I_f = \frac{P}{A} = \frac{P}{\pi(r)^2} = \frac{P}{\pi(d \cdot \sin \theta)^2} \quad \text{VII.1}$$

Substituint els valors de potència (P) i angle de divergència del làser, la irradiància queda només en funció de la distància.

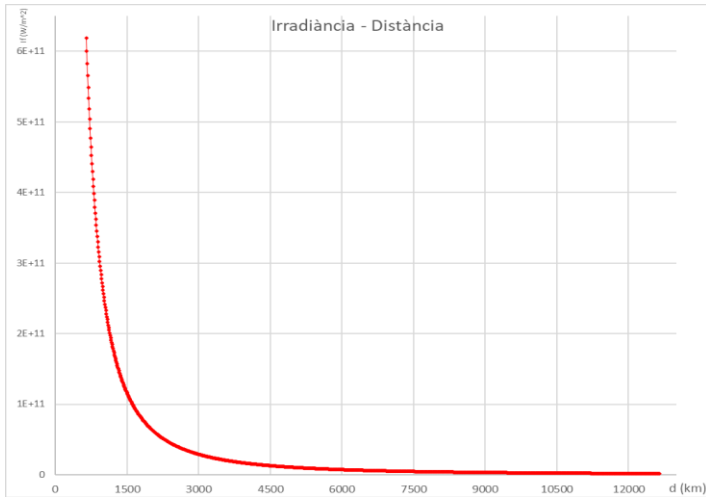


Figura 5 Gràfica de la irradiància que rep la sonda en funció de la distància. Font: Pròpia

En la gràfica d'irradiància respecte la distància (Fig. 5), s'observa que la irradiància màxima $6,19 \cdot 10^{11} \text{ W/m}^2$ s'obté a la distància inicial de 630 km i disminueix considerablement a l'allunyar-se de la font de fotons. A una distància de 1.500 km la sonda ha passat a rebre només 1/6 part de la irradiància que rebia inicialment. A 12.000 km la sonda ja pràcticament no rep irradiància.

Amb les equacions IV.1 i IV.2 i l'equació VII.1 de la irradiància, es pot conèixer l'acceleració de la sonda.

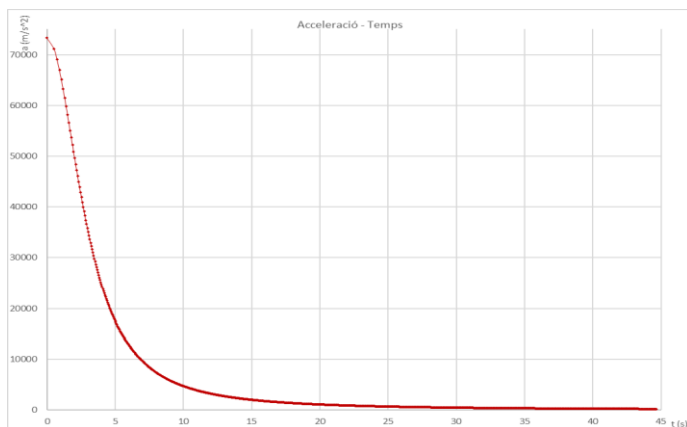


Figura 6 Gràfica de l'acceleració de la sonda respecte el temps Font: Pròpia

En la gràfica d'acceleració respecte el temps (Fig.6), també s'observa que l'acceleració màxima s'obté a l'inici (73.000

m/s²) i disminueix considerablement als pocs segons a causa de que ràpidament la sonda s'ha allunyat de la font de fotons.

Coneixent l'acceleració de la sonda en cada punt es pot trobar la velocitat de la sonda. En la gràfica de la velocitat respecte el temps (Fig.7) s'observa que la velocitat augmenta considerablement en pocs segons i als 45 s arriba a 300.000 m/s. Com que al espai no hi ha fregament, la sonda es mantindria amb la velocitat constant de 300.000 m/s.

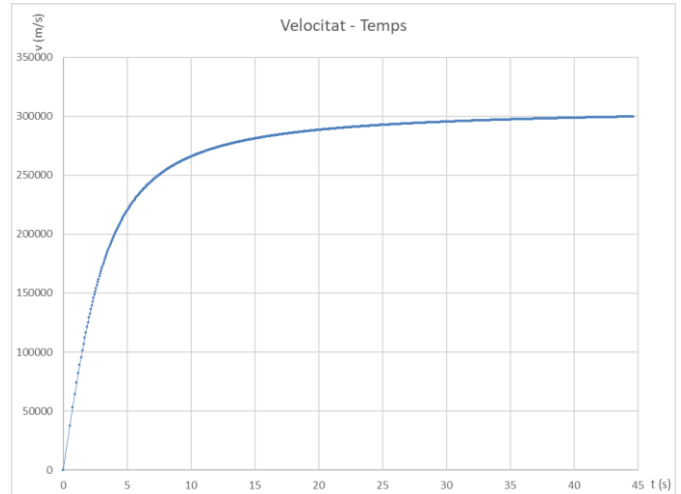


Figura 7 Gràfica de la velocitat respecte el temps. Font: Pròpia

Sabent que la sonda assolix una velocitat màxima de 300.000 m/s, es calcula que la sonda surt del Sistema solar (50 UA) en 288 dies i tarda 4.217 anys en arribar a Pròxima B.

VIII. Conclusions

En primer lloc, s'ha determinat que la vela solar és el mètode de propulsió adient per a la realització d'un viatge de característiques interestel·lars degut a que teòricament és el capaç d'assolir més velocitat.

En el treball s'ha determinat que la destinació més interessant on anar fora del Sistema solar és l'exoplaneta més proper Pròxima b (a 4,2 anys llum de distància), donat que presenta condicions d'habitabilitat.

Després de valorar les característiques de varis materials, s'ha deduït que el keplar amb una capa d'alumini reflectora és el material més adient per a la construcció dels reflectors de la sonda i la utilització de fibra de carboni per a els perfils de l'estructura.

S'ha determinat que la configuració de les veles més adient per a una vela solar tenint en compte que l'objectiu és

disposar del major ràtio superfície/massa possible, és la configuració quadrada.

Després del disseny de la vela i de realitzar els càlculs s'ha determinat que la vela dissenyada de 1.800 m² de superfície reflectora i 99,27 kg de massa assoleix una velocitat de 300.000 m/s. Recorria el viatge plantejat fins a Pròxima b en 4.217 anys, el que de moment faria inviable aquest mètode per a un viatge interestel·lar tripulat. No obstant això, si que es pot donar un ús alternatiu a aquest mètode en altres missions de diferents característiques ja que permet sortir del sistema solar en només 288 dies.

Futures ampliacions del treball són la utilització de la vela solar dissenyada en missions amb destinacions no interestel·lars més pròximes. Un destí per a aquestes missions podria ser el cinturó de Kuiper o inclús el Núvol de Oort, amb l'objectiu de l'exploració d'aquests.

Una altre continuació del treball podria ser la investigació del làser propulsor de la vela. En aquest treball s'ha vist que la font de fotons és de gran importància en una sonda que utilitzi la vela solar com a font de propulsió, es podria dir que té més importància la investigació del làser propulsor que el disseny en si de la vela.

IX. Agraïments

En primer lloc, agrair al tutor i Doctor en ciències físiques d'aquest treball Manuel Moreno Lupiañez per haver-me donat la idea i haver tingut la confiança per poder realitzar aquest treball, també donar-li les gràcies pel seu temps dedicat a la revisió d'aquest treball aportant-li millores. Agrair també a Manel Escoda Soler amic i company de facultat amb el que demostrant també un interès sobre mètodes de propulsió espacial, he discutit sobre aspectes relacionats amb el treball, transmetin-me una gran motivació per treballar constantment en el projecte. Per últim però no menys important, donar també les gràcies a familiars i amics que m'han donat el seu suport al llarg de la realització del projecte.

Referències

[1] Wikipedia, Solar Sails. [En línia] [consultat el: 28/11/2019] https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_sail

[2] The reflecting power of various metals by W. W. Coblentz [2008]

[3] NASA, Materials and Manufacturing. [En línia] [consultat el: 01/01/2020]

https://www.nasa.gov/centers/johnson/pdf/584729main_Wi ngs-ch4c-pgs200-225.pdf

[4] Sciencedirect, graphite fiber. [En línia] [consultat el: 01/01/2020]

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/graphite-fiber>

[5] Rocas, Marc y Méndez, Adrià. Mecánica orbital para un viaje interestelar utilizando velas solares. [Document] [consultat el: 15/10/2019] Vilanova i la Geltrú, Barcelona, España : s.n., junio de 2016