



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL FINAL DE GRAU

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

AUTORS: Pinyol Escala, Josep

DATA DE PRESENTACIÓ: Febrer 2020

COGNOMS: Josep Pinyol

NOM: Josep

TITULACIÓ: Grau en Enginyeria Mecànica

PLA: 2014

DIRECTOR: Manuel Moreno Lupiañez

DEPARTAMENT: Departament de Física

QUALIFICACIÓ DEL TFG

TRIBUNAL

PRESIDENT

SECRETARI

VOCAL

ALEXANDER LEBRATO

ORIOI GARGALLO

SANTIAGO MESTRES

DATA DE LECTURA: 05 / 02 / 2020

Aquest Projecte té en compte aspectes mediambientals: Sí No

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.

El treball té dues parts, una que consisteix en un estudi del estat del art, un plantejament determinant a on estem i quins son les principals etapes a superar per a el viatge interestel·lar, i una segona part que consisteix en tenir en compte tots els aspectes plantejats anteriorment i desenvolupar el disseny d'una vela solar no tripulada capaç de suportar 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.

En el treball també es determina un destí interessant a enviar-hi la sonda, el planeta potencialment habitable Pròxima b, ja que després d'un breu estudi també realitzat en el treball. Aquest exoplaneta no només presenta unes característiques idònies per a la vida, també orbita al voltant de l'estrella fora del sistema solar més propera, i enviar-hi una sonda, seria el viatge interestel·lar relativament més senzill possible de realitzar.

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 4.000 anys en realitzar el viatge fins a Pròxima b i aquest temps fa totalment inviable la seva utilització en el viatge interestel·lar. 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 (màxim 10):

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

ABSTRACT

The principal objective of this work is designing an spacecraft able to perform an interstellar travel.

This work consists in two stages, one consists in a study about state of the art, an approach that determinates where we are and which ones are the principal stages for overcome an interstellar travel. The second stage consists in the development of the design of an unmanned solar sail considering all aspects studied in the first stage with the objective to apply it in the realized design to overcome an interstellar travel.

Some space propulsion methods are studied in this work and solar sail propulsion is chosed for this type of travel considering the most important characteristic (màximum speed that each method can reach), speed is important because it is what can determinate the duration of the travel, an important aspect to consider in this kind of mission. Before the realization of the solar sail design, some realized missions that already used solar sails as a propulsion method are studied, this is important to consider them in the own realization of the solar sail. After studing some materials propieteies, one composed material is chosen for the construction of the solar sail reflectors, this material is composed by a thin polyimide Kapton layer and another thin aluminium reflector layer.

This work also determinates an interesting destiny for the solar sail, the potencially habitable planet Proxima b, this planet is chosen after a brief study also inroduced in this work. This planet not only have ideal characteristics for life, this planet also orbits around the nearest star outside solar system, and sending a solar sail there can be the most relatively simple of all possible interstellar travels.

The most important conclusion after completing the design of the solar sail with 1,800 m² of surface and only 99.27 Kg, is that the sail takes more than 4,000 years to make the trip to Proxima b, this time makes totally unviable the utilization of this sail for interstellar travel. On the other hand, the design is able to reach a speed of 300,000 m / s, higher than current propulsion mechanisms and this speed opens up a wide range of new missions proposals with the use of the design done in this project

Keywords (10 maximum):

Solar Sail	Space propulsion	Proxima b	Interstellar Travel
Reflective Material	Electromagnetic Radiation	Irradiance	Laser

SUMARI

1. INTRODUCCIÓ	12
2. OBJECTIUS	13
3. INVESTIGACIÓ DEL ESTAT DE L'ART	14
3.1 MÈTODES DE PROPULSIÓ ESPACIAL	14
3.1.1 MOTOR QUIMIC CONVENCIONAL	14
3.1.2 MOTOR IÒNIC	17
3.1.3 RESISTOJET I ARCJET	19
3.1.4 MOTOR TÈRMIC NUCLEAR (NTR)	20
3.1.4.1 FISSIÓ	20
3.1.4.2 FUSIÓ	21
3.1.5 MOTOR D'ANTIMATÈRIA	23
3.1.6 BUSSARD RAMJET	24
3.1.7 VELES DE PLASMA	25
3.1.8 VELES SOLARS	27
3.1.8.1 PROJECTES REALITZATS	29
3.1.8.2 PROJECTES EN DESENVOLUPAMENT	32
4. OBJECTIU DE LA SONDA	33
4.1 ESTUDI DE SISTEMES ESTELARS HABITABLES	33
4.1.1 ESTUDI DE PLANETES HABITABLES	35
4.2 QUÈ ENS SEPARA DE PRÒXIMA B?	36
5. SONDA	38
5.1 PRINCIPI DE FUNCIONAMENT DE LA SONDA	38
5.2 MATERIALS DE LA SONDA	41
5.2.1 REFLECTORS	41

5.2.2	ESTRUCTURA	45
5.3	CONFIGURACIÓ DE LES VELES	46
5.4	MASSA I DIMENSIONS	50
6.	ANÀLISIS DE RESULTATS	51
6.1	IRRADIÀNCIA	51
6.2	ACCELERACIÓ	53
6.3	VELOCITAT	54
	CONCLUSIONS	56
	AGRAÏMENTS	57
	BIBLIOGRAFIA	58
	INFOGRAFIA	61
	ANNEX 1 - PLANOLS	64
	ANNEX 2 - SEMBLANÇA I TEORIA DE MODELS	68

SUMARI DE FIGURES

Figura 3.1 Esquema del funcionament d'un motor de combustible líquid. Font: Martin Trolle Mikkelsen (Blog)

Figura 3.2 Imatge del coet Saturn V, coet de 3 fases de combustible líquid desenvolupat per la NASA en el programa Apollo. Font: NASA

Figura 3.3 Dibuix esquemàtic del funcionament d'un motor de ions. Font: commons.wikimedia

Figura 3.4 BepiColombo, el satèl·lit construït per a la ESA y la JAXA. llençat el octubre del 2018. Té previst arribar a mercuri el 2025 utilitzant 4 propulsors iònics. Font: Aviaciondigital

Figura 3.5. Diagrama simplificat del funcionament del resistojet. Font: Viquipèdia.

Figura 3.6 Diagrama simplificat d'un motor de fissió nuclear. Font: Sreechithra.as (blog)

Figura 3.7 Disseny d'un NERVA (Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application) Font: NASA

Figura 3.8 Esquema del funcionament d'un DFD, en el interior hi hauria contingut plasma de heli-3 i deuteri (un tipus específic d'hydrogen que te un neutró en el nucli). Font: universitat de Princeton

Figura 3.9 Prototip de DFD del laboratori de la universitat de Princeton. Font: Universitat de Princeton

Figura 3.10 Disseny d'un coet d'antimatèria Font: Nick Stevens Graphics

Figura 3.11 Esquema d'una sonda Bussard Ramjet. Font: Stan Giblisco

Figura 3.12 Esquema del camp d'una vela magnètica en un vent de partícules carregades. Font: wikipedia

Figura 3.13 Representació d'una vela de camp elèctric. El canó d'electrons mantindria els cables de la sonda carregats positivament, desviant d'aquesta manera els protons del vent solar i obtenint moment. Font: Janhunnen

Figura 3.14 Vista general del Cosmos 1. Font: The planetary society

Figura 3.15 Desplegament d'una vela del cosmos 1. Font: The planetary society

Figura 3.16 Il·lustració de la sonda IKAROS. Font: JAXA

Figura 3.17 Reflexió controlable del RCD. Font: JAXA

Figura 3.18 Desplegament de la vela IKAROS Font: JAXA

Figura 3.19 Visió general i objectius principals de la missió del IKAROS Font: JAXA

Figura 3.20 Concepte de la vela solar de Breakthrough Starshot. Font: breakthroughinitiatives

Figura 4.1 Diagrama que defineix els límits de la zona habitable, límits que son afectats segons el tipus d'estrella. Font: microsiervos

Figura 4.2 Classificació de les estrelles en el estat de seqüència principal. Font: EcuRed

Figura 4.3 El diagrama mostra la disminució de la velocitat del vent solar causat per l'apropament a l'heliopausa. Font: John D. Richardson, The Limits of Our Solar System [2008]

Figura 4.4 Concepte artístic de les distàncies del sistema solar en perspectiva. La distància esta en unitats astronòmiques i en escala logarítmica Font: NASA

Prototip de vela solar impulsada per làser per al viatge interestel·lar
Josep Pinyol Escala

Figura 5.1 Coeficient de pressió per radiació electromagnètica per a diferents casos. Font: quora

Figura 5.2. Irradiància a distància d del sol. Font: pròpia

Figura 5.3 Gràfica de la reflexió de l'alumini en funció de la longitud d'ona. Font: pròpia, realitzada amb dades de *W. W. Coblenz, The reflecting power of various metals*

Figura 5.4. Secció del material compost dels reflectors de la vela solar. Font: Pròpia

Figura 5.5 Secció del perfil tubular de l'estructura. Font: Pròpia

Figura 5.6 Configuració quadrada. Font: Pròpia

Figura 5.7 Configuració circular. Font: Pròpia

Figura 5.8 Comparació de configuracions amb la mateixa àrea Font: Pròpia

Figura 6.1 Gràfica de la irradiància que rep la sonda en funció de la distància. Font: Pròpia

Figura 6.2 Gràfica de l'acceleració de la sonda respecte el temps Font: Pròpia

Figura 6.3 Gràfica de la velocitat respecte el temps. Font: Pròpia

GLOSSARI DE SIGNES, SÍMBOLS, ABREVIATURES, ACRÒNIMS I TERMES

Sigles/Acrònims

DFD	Direct Fusion Drive
ESA	European Space Agency
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
JPL	Jet Propulsion Laboratory
NERVA	Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application
NTR	Nuclear Thermal Rocket
Qty.	Quantitat
RCD	Reflective control device
IKAROS	Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun
ZH	Zona Habitable

Símbols

ρ	Densitat volumètrica (kg/m³)
σ	Densitat superficial (kg/m²)
θ	Angle de divergència (°)
A	Àrea (m²)
b	Base (m)
c	Velocitat de la llum en el buit (299.792 km/s)
D_c	Longitud estructural cercle (m)
D_s	Longitud estructural quadrat (m)
d	Distància (m)
L_q	Càrrega lineal / Densitat lineal (kg/m)
H	Hidrogen
h	Altura (m)
I_f	Irradiància (W/m²)
m	Massa (kg)
m_(1m²)	Massa en un metre quadrat de superfície (kg)
P	Potència (W)
p	Pressió (N/m²)
Q_{pr}	Coefficient de pressió per radiació
R	Radi (m)
T	Temperatura (°C)
t	Temps (s)
t	Espessor (mm)
V	Volum (m³)
V_(1m²)	Volum en un metre quadrat de superfície (m³)
v	Velocitat (m/s)
v₀	Velocitat inicial (m/s)

Unitats

°C	Graus Celcius
µm	Micròmetre
cm³	Centímetres cúbics
GPa	Giga Pascals
g/m²	Grams per metre quadrat
g/m³	Grams per metre cúbic
K	Kelvin
M_☉	Massa solar
M_⊕	Massa terrestre
min	Minuts
N	Newton
kg	Quilogram
kg/m²	Quilogram per metre quadrat
kg/m³	Quilogram per metre cúbic
km	Quilòmetre
km/s	Quilòmetres per segon
kN	QuiloNewton
m	Metres
m/s	Metres per segon
N	Newton
R_☉	Radi solar
R_⊕	Radi terrestre
s	Segon
UA	Unitats astronòmiques (distància entre la Terra i Sol)
ly	Light year
W/m²	Watts per metre quadrat

1. 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.

El principal objectiu d'aquest treball és fer el disseny d'una sonda espacial que pugui ser capaç de realitzar un viatge interestel·lar. Per a poder fer el disseny adequat s'ha de tenir en compte quin és el destí de la sonda. 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 i no es pot estudiar tot, 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.

En aquest treball, després d'analitzar l'estat del art, es planteja focalitzar l'estudi en les característiques de la sonda així com els materials dels que hauria d'estar construïda, les seves dimensions i els mecanismes dels que hauria de disposar. L'estudi de mecànica orbital seria un estudi secundari i no es pretén entrar-hi en detall.

2. OBJECTIUS

Els objectius del projecte es basen en plantejar i estudiar els principals conceptes que s'han de tenir en compte per a realitzar el viatge interestel·lar, tenir-los en compte en la realització del disseny d'una vela solar i posteriorment veure la viabilitat de la utilització de la sonda en el viatge.

- Elaborar un anàlisi del estat del art actual.
- Estudiar els diversos mecanismes de propulsió existents i en desenvolupament i fer una comparativa analitzant els avantatges i desavantatges.
- Analitzar les sondes de veles solars utilitzades en missions reals per a tenir-les en compte en la construcció de la pròpia sonda.
- Realitzar una comparativa dels possibles destins de la sonda per tal de determinar-ne un.
- Entendre el principi de funcionament de la sonda (què és la radiació electromagnètica i com aprofitar-la per a la propulsió).
- Estudiar els possibles materials per al disseny dels reflectors i l'estructura de la sonda.
- Realitzar el disseny de la sonda tenint en compte els estudis previs realitzats i coneixements adquirits en la realització del treball.
- Comprovar la viabilitat del disseny de la sonda realitzat per a ser utilitzat en el viatge interestel·lar i extreure una conclusió final del treball.

3. INVESTIGACIÓ DEL ESTAT DE L'ART

3.1 MÈTODES DE PROPULSIÓ ESPACIAL

L'objectiu d'aquest apartat és realitzar un anàlisi de l'estat actual de la tecnologia en els diferents mètodes de propulsió, tant en els que s'utilitzen com els que estan en procés de desenvolupament. És important saber perquè s'ha apostat pel mecanisme de veles solars en aquest treball i quins avantatges presenta respecte altres que ja estan més desenvolupats.

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. (1)

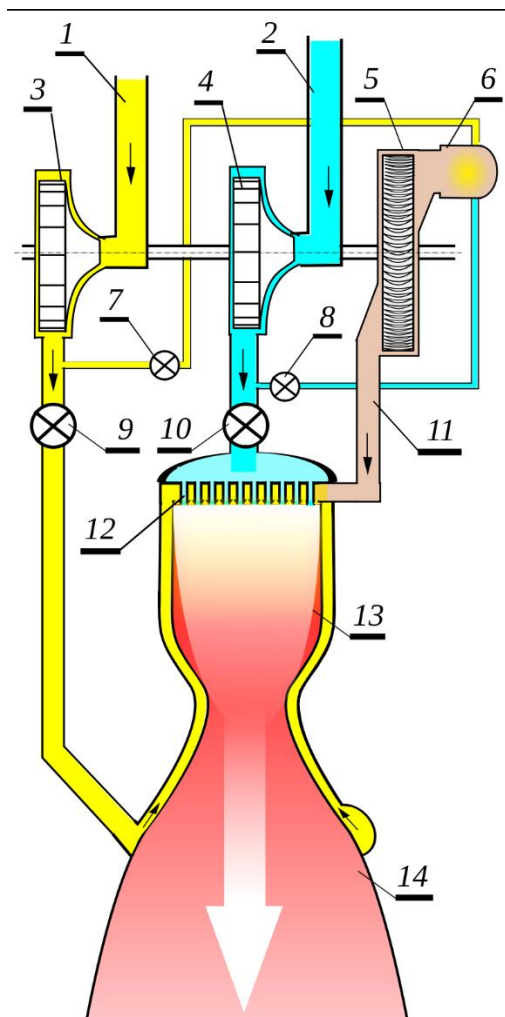
3.1.1 MOTOR QUÍMIC CONVENCIONAL

Els coets de motor químic són els més utilitzats actualment per a qualsevol tipus de missió espacial, es propulsen a partir de l'ejecció de gasos produïts per la combustió canalitzats en la direcció òptima. L'energia necessària per ejectar els gasos que propulsen el coet provenen de la combustió causada per una reacció química en el interior de la unitat. La força de reacció depèn directament de la quantitat de massa ejectada i la velocitat d'aquesta massa. És a causa d'això que el disseny dels coets es centri en aconseguir que aquest dos paràmetres siguin el més gran possible.

Els coets que utilitzen un motor químic per a propulsar-se a l'espai han de funcionar en el buit i és per això que no poden utilitzar l'oxigen que es troba a l'atmosfera per poder dur a terme la combustió. Els coets de motor químic no només han de contenir el combustible, també han de contenir l'oxidant suficient per a poder dur a terme la combustió del combustible. (2)

Els motors químics es poden dividir en diverses classes segons l'estat del combustible que utilitzen per a la propulsió:

- **Motor de combustible sòlid:** Són els motors que utilitzats en els coets més antics, utilitzen combustible en estat sòlid. El ús d'aquest tipus de coet és inusual com a propulsió principal en l'exploració espacial moderna, però si que s'utilitzen comunament en coets acceleradors. (2)
- **Motors de combustible líquid:** Utilitzen combustible en estat líquid per a la propulsió del coet, el combustible en aquest estat presenta molts avantatges perquè ofereix una gran relació en quan a pes/potència degut a la seva densitat considerablement alta. (3)



- 1 - Entrada al dipòsit de combustible
- 2 - Entrada al dipòsit d'oxidant
- 3 - Bomba de combustible
- 4 - Bomba d'oxidant
- 5 - Turbina
- 6 - Generador de gas
- 7 - Vàlvula del generador de gas (combustible)
- 8 - Vàlvula del generador de gas (oxidant)
- 9 - Vàlvula principal de combustible
- 10 - Vàlvula principal del oxidant
- 11 - Escapament de la turbina
- 12 - Injectors
- 13 - Càmera de combustió

Figura 3.1 Esquema del funcionament d'un motor de combustible líquid. Font: Martin Trolle Mikkelsen (Blog)

- **Motors híbrids:** Els motors híbrids utilitzen combustible en dues fases diferents, una sòlida i l'altre líquida o gasosa. Aquest tipus de motors eviten alguns dels desavantatges dels tipus de motors esmentats anteriorment. Els motors híbrids eviten el perill que presenta el ús de combustibles sòlids i alhora eviten els desavantatges de la complexitat dels motors de combustible líquid. (3)

Encara que en un futur es desenvolupi un mètode òptim pel viatge espacial, és possible que aquest hagi de ser posat en òrbita per iniciar la seva acceleració i per a ser posat en òrbita és possible que s'hagi d'utilitzar un mètode secundari com el motor químic utilitzat actualment.



Figura 3.2 Imatge del coet Saturn V, coet de 3 fases de combustible líquid desenvolupat per la NASA en el programa Apollo (1961 - 1975). Actualment manté el record del coet més alt, pesat i potent mai llençat (110m i 2.000 tones). Font: NASA

3.1.2 MOTOR IÒNIC

El motor iònic és un tipus de motor de propulsió elèctrica espacial. El funcionament consisteix en crear força d'empenta a partir d'accelerar ions. El mètode per a accelerar els ions pot variar depenent del disseny de motor iònic, però tots utilitzen la relació càrrega-massa dels ions per accelerar-los a velocitats molt altres utilitzant un camp elèctric. El motor iònic genera un gran impuls respecte el combustible que consumeix (major que el dels coets de combustible líquid) però els motors iònics estan limitats a acceleracions molt baixes degut a la relació potència-massa dels sistemes disponibles. (4)

On es consumeix més energia en el motor iònic és en el procés per a ionitzar els àtoms que posteriorment són accelerats, per això l'element ideal ha de ser fàcil de ionitzar i ha de tenir un alt ratio (massa) – (energia de ionització). L'element ionitzat tampoc ha de causar erosió per tal d'incrementar a el màxim la vida del motor. Molts dissenys actuals utilitzen gas xenó perquè és fàcil de ionitzar, te un número atòmic raonablement alt, és inert i causa poca erosió. (4)

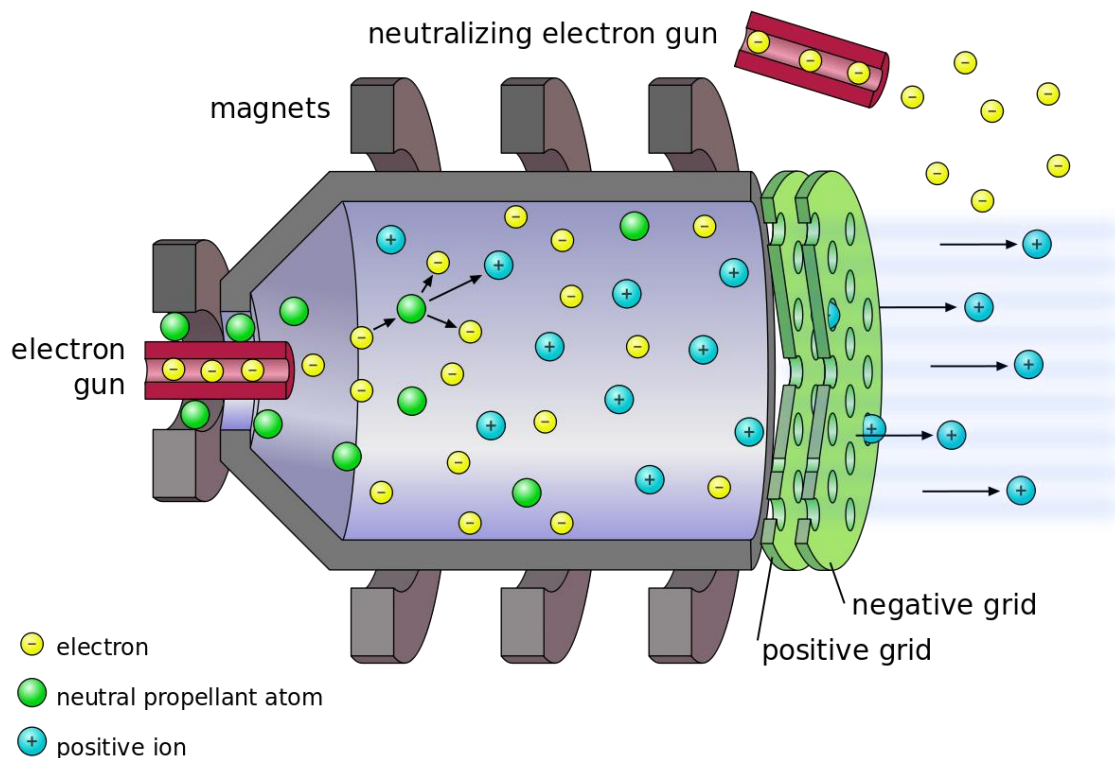


Figura 3.3 Dibuix esquemàtic del funcionament d'un motor de ions. Font: commons.wikimedia

Els motors iònics són pràcticament només útils en el buit d l'espai ja que no funcionen en presència d'altres ions en l'exterior del motor, degut a això, no poden ser operatius en l'atmosfera i no poden ser utilitzats per a situar objectes en òrbita. També s'ha de tenir en compte que la propulsió generada per el motor iònic és molt inferior en comparació amb la que genera el motor químic convencional. El principal distintiu del motor de ions és que te la gran capacitat de poder estar en funcionament durant llargs períodes de temps i que consumeix poc combustible. En el buit de l'espai, els propulsors iònics poden funcionar durant un període llarg per a permetre que la petita acceleració obtingui una velocitat útil. (4)

Actualment els motors iònics son utilitzats per a el control de satèl·lits i en canvis de posicionament de la seva òrbita. Alguns satèl·lits disposen d'una dotzena de motors de ions de baixa potència. (4)



Figura 3.4 BepiColombo, el satèl·lit construït per a la ESA y la JAXA. Ilençat el octubre del 2018. Té previst arribar a mercuri el 2025 utilitzant 4 propulsors iònics. Font: Aviaciondigital

3.1.3 RESISTOJET I ARCJET

El resistojet és un sistema de propulsió espacial electrotèrmic utilitzat en satèl·lits artificials per a petites correccions en la seva trajectòria o orientació. El seu funcionament és simple, un gas emmagatzemat en forma comprimida (sovint nitrogen) és escalfat per una resistència elèctrica que l'accelera degut a l'expansió volumètrica i surt a pressió a través d'una tovera. L'electricitat està proporcionada per panells de cèl·lules solars del satèl·lit. El sistema de propulsió resistojet és molt útil en situacions en les que es disposa de molta energia però poca massa per a consumir. (5)

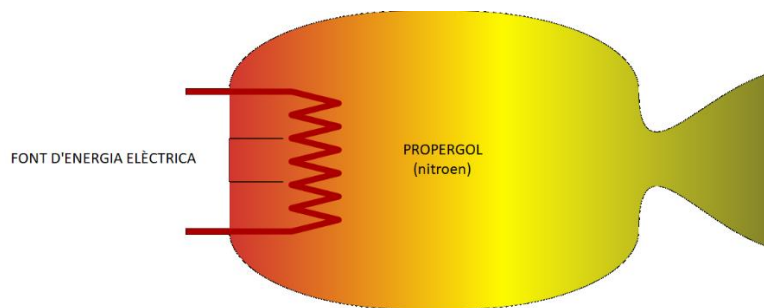


Figura 3.5. Diagrama simplificat del funcionament del resistojet. Font: Viquipèdia

El resistojet va ser el primer tipus de propulsor electrotèrmic espacial utilitzat però actualment també s'utilitza el sistema ArcJet més eficaç i d'un disseny semblant però més complex. En el sistema ArcJet, una descàrrega elèctrica (arc) és creada en el flux de propèrgol i aquesta imparteix energia addicional. Realitzant aquesta descàrrega es pot extreure encara més energia per a cada kilogram de massa a costa de consumir més energia. (5)

3.1.4 MOTOR TÈRMIC NUCLEAR (NTR)

El motor tèrmic nuclear o NTR és un mètode de propulsió proposat. A data d'avui més de 10 NTRs han estat construïts i provats en terra, i encara que hi ha satèl·lits que han utilitzat energia elèctrica nuclear per al seu funcionament, no s'ha utilitzat mai cap motor tèrmic nuclear per a una posada en òrbita. (6) (14)

El motor tèrmic nuclear o NTR és un propulsor en el que l'energia tèrmica d'una reacció nuclear reemplaça l'energia tèrmica produïda per combustió en un motor químic convencional. En un NTR, el fluid amb el que es treballa, sovint hidrogen líquid, és escalfat a altes temperatures i s'expandeix en la tovera del reactor generant propulsió. (6) (7)

Hi han dos mètodes de propulsió nuclear:

3.1.4.1 Fissió:

Consisteix en produir energia a partir de la divisió atòmica. El motor nuclear de fissió és el motor que els humans som capaços de construir que genera més energia. A més la quantitat de massa requerida per generar aquesta energia és relativament baixa, el que faria viable la utilització d'aquest mètode en viatges espacials. Per altra banda, la utilització d'aquest mètode comportaria molts riscos, un error en l'atmosfera o en la òrbita d'un coet propulsat amb aquest mètode podria resultar en el dispersament de material radioactiu en l'ambient. (7)

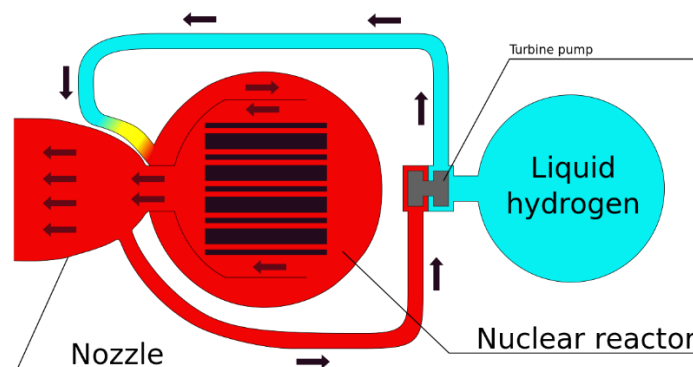


Figura 3.6 Diagrama simplificat d'un motor de fissió nuclear. Font: Sreechithra.as (blog)

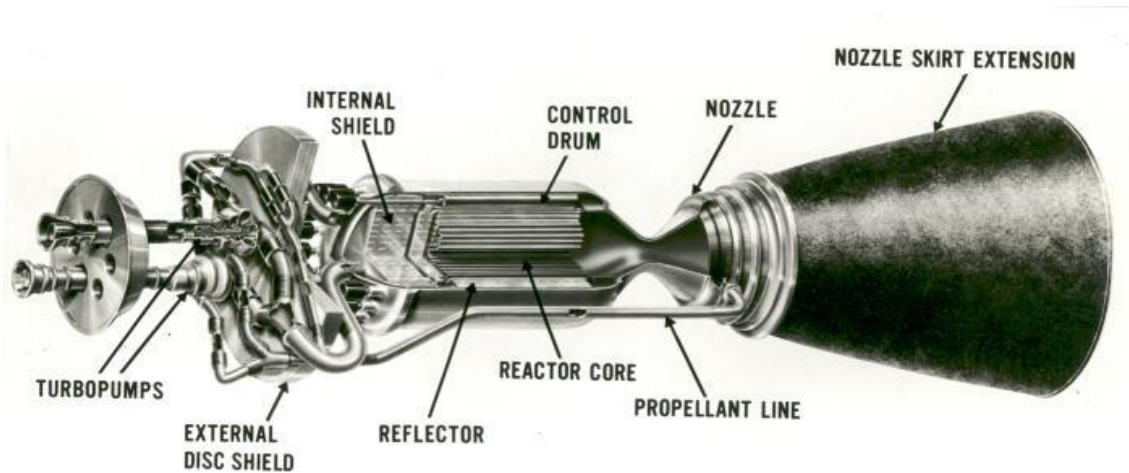


Figura 3.7 Disseny d'un NERVA (Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application) Font: NASA

3.1.4.2 Fusió:

El mètode de propulsió mitjançant la fusió nuclear és inexistent, per tant encara no se sap exactament com seria un motor que es propulsés utilitzant aquest mètode. El procés de fusió nuclear consisteix en generar energia a partir de la unió de dos isòtops d'hidrogen, o d'heli. Si fos real, generaria una energia d'una magnitud molt superior a l'energia alliberada en el motor químic. Aquesta unió produeix un altre element i molta energia. Aquest procés és el mateix que succeeix en les estrelles. La reacció nuclear que es produeix en la fusió no produeix cap residu perjudicial, per tant és una reacció neta. El principal avantatge de la propulsió espacial per fusió és que tindria un impuls específic molt gran i el gran desavantatge és que la massa del reactor seria massa gran. (8) (9)

- **Direct fussion drive (DFD):** El direct fussion drive, és un motor coet de fusió nuclear dissenyat per a produir propulsió i energia elèctrica per a naus interplanetàries. El concepte es basa en el reactor de configuració de camp revertit de Princeton. Aquest mètode pot produir propulsió sense la necessitat d'un generador elèctric intermedi. (9)

Prototip de vela solar impulsada per làser per al viatge interestel·lar
Josep Pinyol Escala

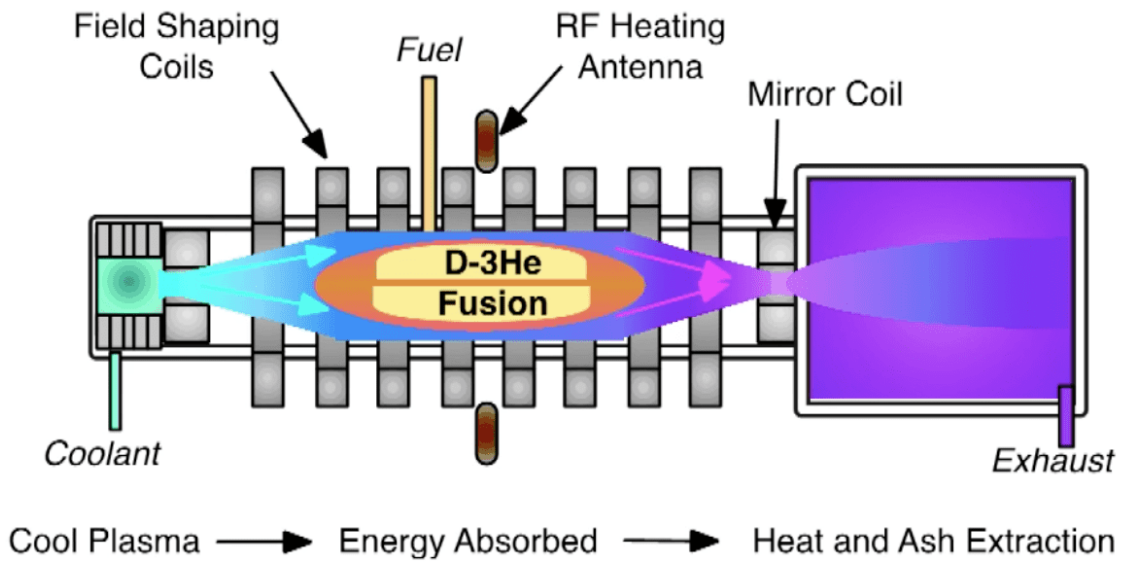


Figura 3.8 Esquema del funcionament d'un DFD, en el interior hi hauria contingut plasma de heli-3 i deuteri (tipus específic d'hydrogen que te un neutró en el nucli). Font: Universitat de Princeton

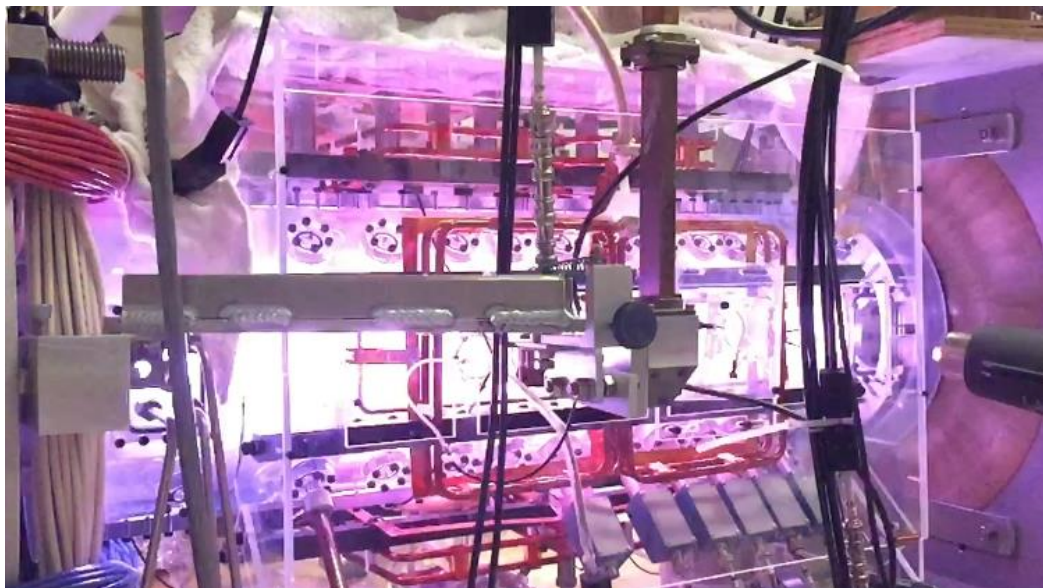


Figura 3.9 Prototip de DFD del laboratori de la universitat de Princeton. Font: Universitat de Princeton

3.1.5 MOTOR D'ANTIMATÈRIA

Un motor d'antimatèria seria un motor que utilitzaria l'energia que s'allibera del resultat de l'aniquilació (denominació utilitzada per a la reacció que es produeix quan la matèria i l'antimatèria entren en contacte) per a la propulsió. Actualment el motor d'antimatèria només es conegut en la ciència ficció, encara que s'hagin realitzat alguns dissenys propers a com serien, queden molts processos a fer abans de que sigui una realitat. Actualment, anterior a la realització del motor d'antimatèria, s'han de realitzar més investigacions en el procés de preservació i producció de l'antimatèria. (10)

Preservació de l'antimatèria: L'antimatèria no es pot preservar en un recipient de matèria ordinària perquè al reaccionar amb qualsevol partícula que toqui, s'aniquilaria a ella mateixa, per evitar això, s'ha d'utilitzar una combinació d'un camp elèctric amb un camp magnètic per a contenir-la anomenada trampa iònica. (10)

Cost de l'antimatèria: L'antimatèria és la substància més cara del món, té un preu estimat d'uns 62.500 milions de dòlars el mil·ligram. Aquest cost tant excessiu és degut a que es requereix una enorme quantitat d'energia per a la producció de l'antimatèria, el sistema d'emmagatzematge de confinament mitjançant camps magnètics també té un cost elevat. (10)

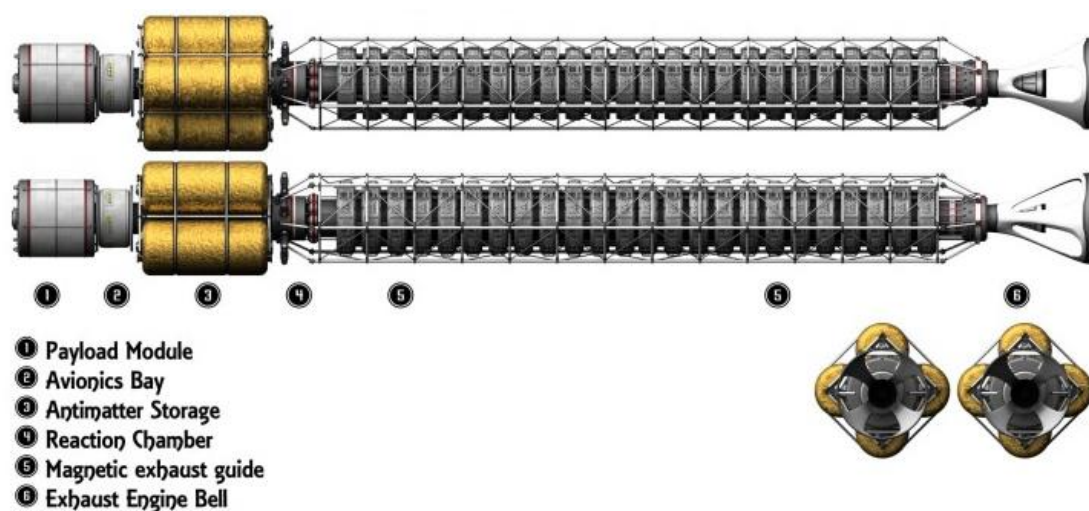


Figura 3.10 Disseny d'un coet d'antimatèria Font: Nick Stevens Graphics

3.1.6 BUSSARD RAMJET

El Bussard ramjet és un mètode teòric de propulsió proposat per el físic Robert W. Bussard. Encara que sigui un mètode de propulsió inexistent, és interessant estudiar-lo perquè al igual que en les velas solars, és un mètode que no requeriria el transport de combustible, aprofiten les característiques del entorn per a propulsar-se.

El concepte del Bussard ramjet proposa la recollida de l'hidrogen present en l'espai per generar amb ell una reacció de fusió nuclear controlada i obtenir d'aquesta manera una acceleració. En l'espai hi ha una petita concentració d'àtoms d'hidrogen. El disseny d'aquesta nau es distingeix per tenir un col·lector a la part frontal amb la que mitjançant un camp magnètic atrapa àtoms d'hidrogen de l'espai i els utilitza com a combustible. (11)

El problema d'aquest mètode és que en l'espai obert hi ha molts pocs àtoms d'hidrogen per m^3 de volum per tant el col·lector hauria de tenir unes dimensions gegants. (11)

Teòricament, una sonda que utilitza aquest mètode de propulsió podria arribar a el 10-20% de la velocitat de la llum. Òptim per a fer viatges interplanetaris de manera ràpida. Tot i així, aquest mètode segueix sent lent per a ser utilitzat en el viatge interestel·lar. (12)

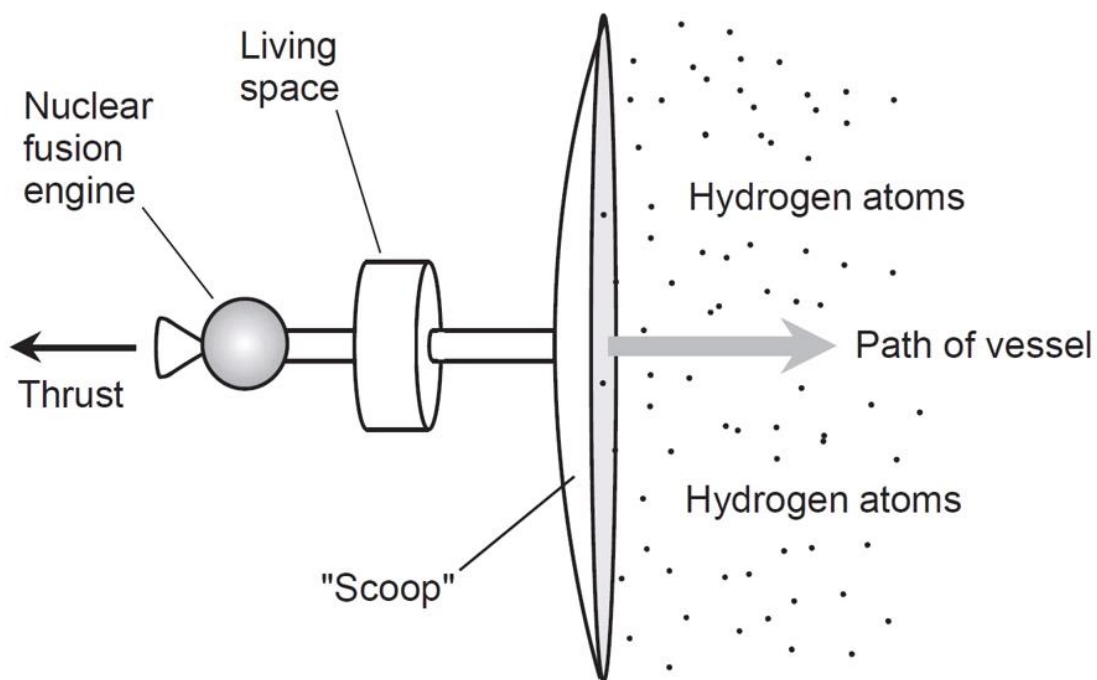


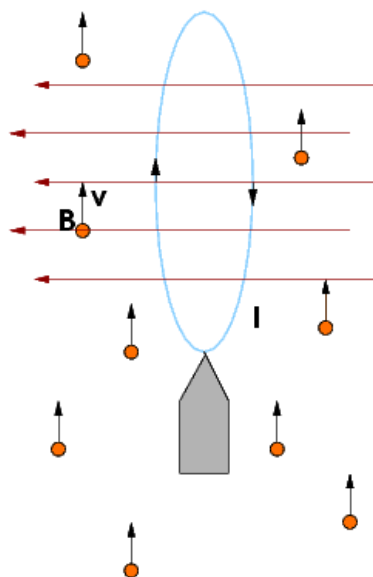
Figura 3.11 Esquema d'una sonda Bussard Ramjet. Font: Stan Giblisco

3.1.7 VELES DE PLASMA

Les veles és poden classificar en dos grups segons la font que utilitzen per impulsar-se. Les veles de plasma que consistirien en generar un camp magnètic o elèctric que desviarien partícules del vent solar obtenint així la força d'impulsió. I veles solar, que obtindrien la seva força d'impuls reflectint els fotons provenint del Sol o generats per el home utilitzant un làser.

Una vela de plasma consisteix en una gran malla extensa en que es genera un camp magnètic o elèctric que actua amb el plasma del vent solar per generar impuls. Depenent de si aquesta vela genera un camp magnètic o elèctric, és pot classificar en una vela magnètica o en una vela elèctrica.

Veles de camp magnètic: Les veles de camp magnètic crearien un camp magnètic estàtic que desviaria les partícules carregades provinents del sol impartint un moment que propulsaria la nau. Una vela magnètica també podria propulsar-se amb els camps magnètics planetaris. En un disseny de vela magnètica, el camp magnètic es genera a partir d'un bucle de cable d'un material superconductor. La vela podria ser desplegada extenent els cables conductors i aplicant-hi corrent a través. (13)



L'esquema representa el camp magnètic que genera una vela magnètica (representat en fletxes vermelles) el qual desvia partícules del vent solar (representades en taronja) cap a l'esquerra. Al desviar les partícules cap a l'esquerra, la força a la vela solar seria l'oposada i per tant l'impuls també seria en aquest sentit

Figura 3.12 Esquema del camp d'una vela magnètica en un vent de partícules carregades. Font: wikipedia

Veles de camp elèctric: Una vela de camp elèctric consisteix en un mètode de propulsió proposat que utilitza la pressió dinàmica del vent solar com a font de propulsió. El disseny d'una vela de camp elèctric consistiria en aparentment una "vela" (que en realitat serien cables) per formar un camp elèctric que desviaria els protons del vent solar obtenint una força que resultaria en propulsió.

Un canó d'electrons en la sonda mantindria un alt potencial positiu i per tant els cables de la vela quedarien carregats positivament i desviarien els protons del vent solar, extraient així el moment dels protons i obtenint la propulsió per a la vela.

Una vela de camp elèctric tindria entre 50 i 100 cables prims d'uns 20km cadascun. Comparada amb una vela fotònica que es propulsa amb la pressió del vent solar, una vela de camp elèctric podria continuar accelerant-se a més distància del Sol, encara desenvolupant propulsió tot i haver passat Neptú, el vuitè planeta i el més llunyà del sistema solar. (14) (15)

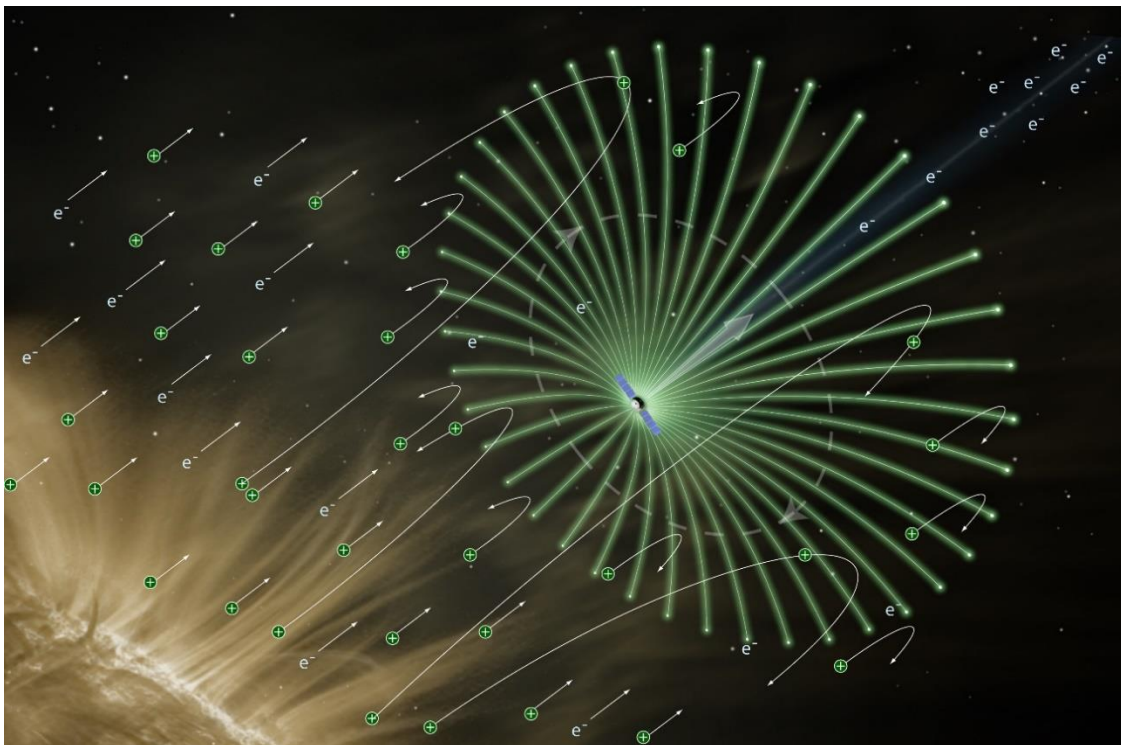


Figura 3.13 Representació d'una vela de camp elèctric. El canó d'electrons mantindria els cables de la sonda carregats positivament, desviant d'aquesta manera els protons del vent solar i obtenint moment. Font: Janhunen

3.1.8 VELES SOLARS

Les veles solars son un mètode de propulsió espacial que aprofiten propietats externes de la nau per a la propulsió, d'aquesta manera no és requerit el transport de combustible i aconseguen reduir considerablement la massa de la nau. Els avantatges de reduir la massa de la nau són molts. Alleugerint el pes de la nau s'aconsegueix reduir la dificultat de la seva posada en òrbita i també és més fàcil d'accelerar i pot aconseguir una major velocitat. Degut a que les veles presenten una baixa potència, les naus propulsades per aquest mètode haurien de ser llençades a l'espai utilitzant algun altre mètode complementari com ara un coet amb motor convencional ja que seria impossible accelerar-les directament dins de l'atmosfera. Una vegada a l'espai s'anirien accelerant lentament però a diferència dels altres mètodes de propulsió existents, l'empenta sobre una vela s'aplica constantment i de forma ininterrompuda. D'aquesta manera una sonda que utilitzi veles per a propulsar-se pot arribar a velocitats molts superiors a les que arriben els mètodes actuals i reduir considerablement el temps estimat per a un viatge interestatal. (16)

Les veles solars, també anomenades veles fotòniques, són un mètode de propulsió espacial que utilitzen la pressió del vent solar per a propulsar-se.

Una analogia a les veles solars, serien les veles dels vaixells; la llum exerceix força en els miralls d'una vela solar igual que el vent a les veles dels velers. En principi una vela solar utilitzaria la llum del sol per a propulsar-se, però alternativament també es podria utilitzar el raig d'un làser, el que exerciria més força en comparació amb la llum solar. Com que les veles solars tenen poques parts mòbils i no utilitzen combustible, poden tenir una llarga vida abans de quedar inoperatives, el que les fa aptes per a un viatge de llargues distàncies, inclús es podria considerar el viatge interestel·lar.

Les veles solars utilitzen un fenomen que ha estat provat i que ha estat mesurat en l'espai. La pressió solar afecta a qualsevol cos, sigui una estació interplanetària en òrbita, o una sonda en destí a un altre planeta. Una sonda enviada a Mart, seria desviada centenars de quilometres només a causa del vent solar, actualment els efectes de la pressió solar es tenen en compte en el càlcul de trajectòries. (16)

Prototip de vela solar impulsada per làser per al viatge interestel·lar
Josep Pinyol Escala

Mètode de propulsió	V.màx teòrica (Km/s)	Avantatges	Desavantatges
Motor químic de combustible líquid	4,4	<ul style="list-style-type: none"> - És un mètode conegut i desenvolupat - Cost baix 	<ul style="list-style-type: none"> - Velocitat massa baixa per a considerar-lo pel viatge interestel·lar - Impuls específic baix - Requereix portar el combustible
Motor Iònic	210	<ul style="list-style-type: none"> - Bon impuls específic - Capaç d'assolir velocitats altes en comparació amb el motor químic 	<ul style="list-style-type: none"> - Velocitat massa baixa per a considerar-lo per el viatge interestel·lar - Requereix portar el combustible
Resistojet / Arcjet	16	<ul style="list-style-type: none"> - És un mètode conegut i desenvolupat - Cost baix 	<ul style="list-style-type: none"> - Velocitat massa baixa per a considerar-lo pel viatge interestel·lar - Requereix portar el combustible - Propulsió considerablement menor que el motor químic
Direct Fusion Drive (DFD)	~ 1.000	<ul style="list-style-type: none"> - Alt impuls específic - Reacció pràcticament neta - Alta velocitat màxima en comparació amb els mètodes actuals 	<ul style="list-style-type: none"> - Mètode en desenvolupament i encara no aplicable - Requereix portar el combustible
Motor d'antimatèria	~ 100.000	<ul style="list-style-type: none"> - Alt impuls específic, superior al de fusió - Alta velocitat màxima - Es pot considerar per a el viatge interestel·lar 	<ul style="list-style-type: none"> - Mètode en desenvolupament i encara no aplicable - Antimatèria en fase d'estudi - Cost de producció del combustible molt elevat - Requereix portar el combustible - Cost d'emmagatzematge elevat i en desenvolupament
Bussard Ramjet	~ 20.000	<ul style="list-style-type: none"> - No requereix càrrega de combustible - Es propulsa amb hidrogen (l'element més abundant a l'univers) 	<ul style="list-style-type: none"> - Mètode teòric i no aplicable - Densitat baixa d'hidrogen a l'espai massa baix - Dimensions del col·lector d'hidrogen massa grans i poc realistes d'aconseguir
Vela de camp magnètic	750 (vent solar)	<ul style="list-style-type: none"> - No requereix càrrega de combustible - Acceleració constant - Velocitat màxima alta - Es pot considerar per a el viatge interestel·lar 	<ul style="list-style-type: none"> - Mètode en desenvolupament i encara no aplicable - Depèn del vent solar - Acceleració constant però lenta
Vela de camp elèctric	750 (vent solar)	<ul style="list-style-type: none"> - No requereix càrrega de combustible - Acceleració constant - Velocitat màxima alta - Es pot considerar per a el viatge interestel·lar 	<ul style="list-style-type: none"> - Mètode en desenvolupament i encara no aplicable - Depèn del vent solar - Acceleració constant però lenta
Vela Solar	299.792 (llum)	<ul style="list-style-type: none"> - No requereix càrrega de combustible - Acceleració constant - Possibilitat d'assolir la velocitat de la llum - Es pot considerar per a el viatge interestel·lar degut a que pot assolir velocitats considerablement altes - Massa de la sonda baixa i amb un cost relativament baix de construir 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessitat de ser gran per poder obtenir una empenta considerable - Requereix d'una font de radiació externa per a l'acceleració (làser o llum solar) - Acceleració constant però lenta i limitada per la font de fotons (només s'accelera mentre esta prop de la font de fotons)

Taula 3.1 Comparativa d'avantatges i desavantatges entre els diferents mètodes de propulsió
Font: Pròpia

3.1.8.1 PROJECTES DE VELES REALITZATS

COSMOS 1: Va ser un projecte conjunt entre Rússia i Estats Units, l'objectiu del projecte era provar el concepte de propulsió espacial per mitja de veles solars. La sonda va ser llençada al espai el 21 de juny de 2005. Un error en el cohet va impedir que assolís l'òrbita desitjada.

El disseny bàsic és un cos central amb vuit veles triangulars fetes de mylar, cadascuna de 15 m de longitud desplegant-se a partir d'un cos central. Després del desplegament de les veles aquestes es poden orientar per controlar la direcció i la quantitat d'empenta solar. Els pes total de la sonda era de 100kg i les veles totalment esteses formaven 30m de diàmetre.

Un cop col·locada al espai la missió hauria d'haver durat un mes. Encara que l'objectiu de la missió no es va complir, Cosmos 1 va obrir les portes a nous projectes de veles solars. (17) (18)

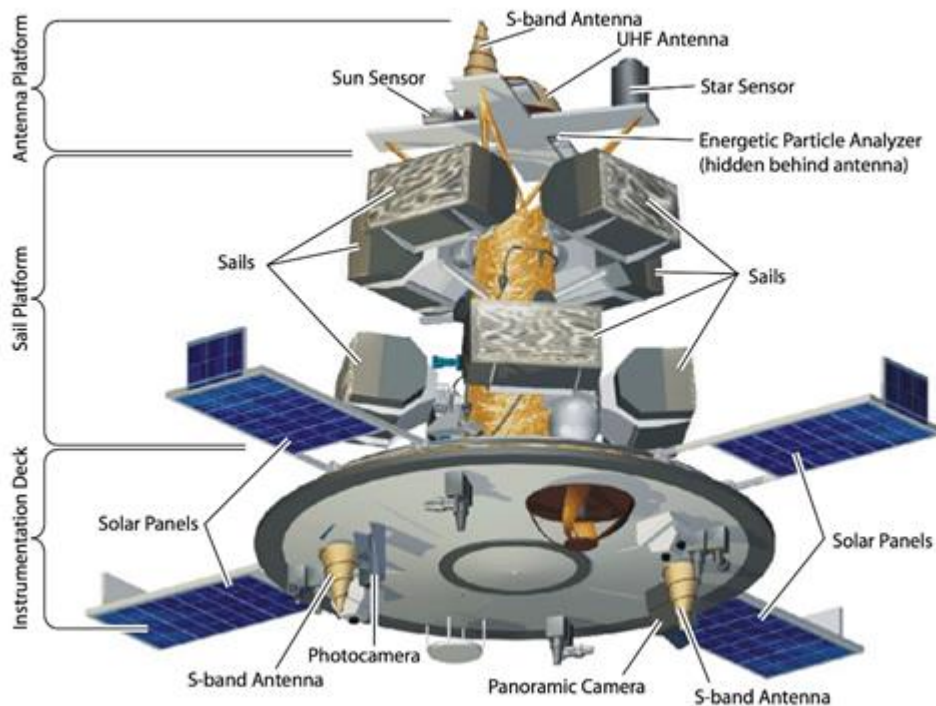


Figura 3.14 Vista general del Cosmos 1. Font: The planetary society



Figura 3.15 Desplegament d'una vela del cosmos 1. Font: The planetary society

IKAROS: IKAROS va ser una sonda espacial experimental propulsada mitjançant una vela solar, llançada per la JAXA el maig de 2010. La prova de IKAROS va ser la primera sonda espacial en utilitzar una vela solar com a propulsió espacial principal, el destí era Venus on hi va passar a 80.000 km el desembre de 2010, donant la missió per acabada i entrant en el període operatiu ampliada. El 2015 es va perdre el contacte amb la sonda. (19) (20)

Les dimensions de la vela eren de 14x14m. La membrana consistia en un tipus de polímer d'un gruix de 7,5 μm cobert amb un film d'alumini de 80 nm. El polímer de la membrana té les característiques de tenir una bona resistència tèrmica, mecànica i química mantenint una massa baixa. Rebent la llum del sol per la banda del film d'alumini, la força de propulsió podia ser generada gràcies a la bona reflexió. (20)

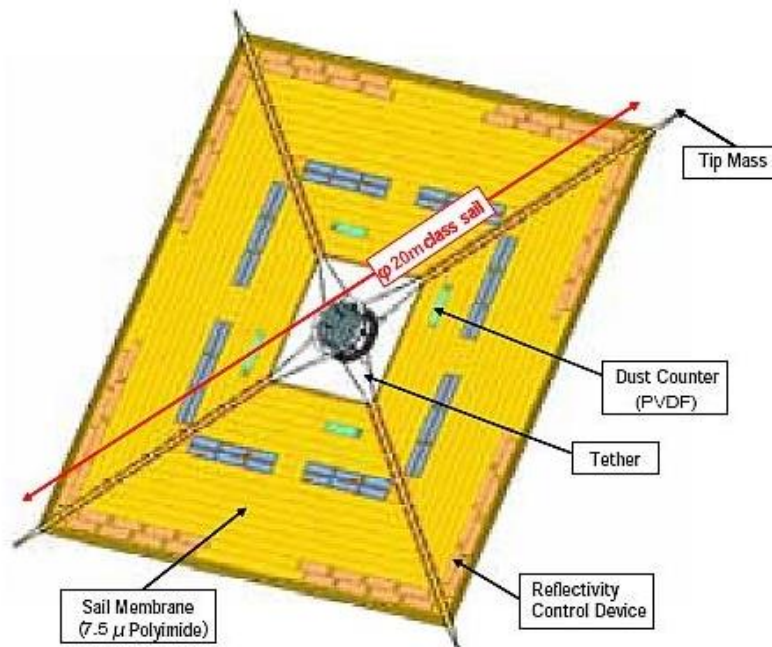


Figura 3.16 Il·lustració de la sonda IKAROS. Font: JAXA

La vela disposava de RCDs (Reflective control device) a els extrems que permetien el reflex o no de la llum. Poden canviar les propietats òptiques si estan sotmeses a el voltatge apropiat. Aquests dispositius eren utilitzats com a control opcional de la sonda. (20)

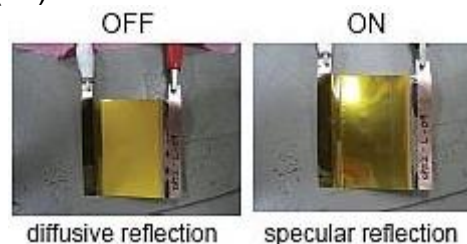


Figura 3.17 Reflexió controlable del RCD. Font: JAXA

Prototip de vela solar impulsada per làser per al viatge interestel·lar
Josep Pinyol Escala

La membrana de la vela va ser desplegada i es mantenia plana degut a la força centrípeta. Una massa estava lligada a cadascuna de les quatre puntes de la membrana per a poder realitzar el desplegament. A mesura que la vela es va desplegant, la força de gir disminueix perquè el moment d'inèrcia de la vela incrementa. (20)

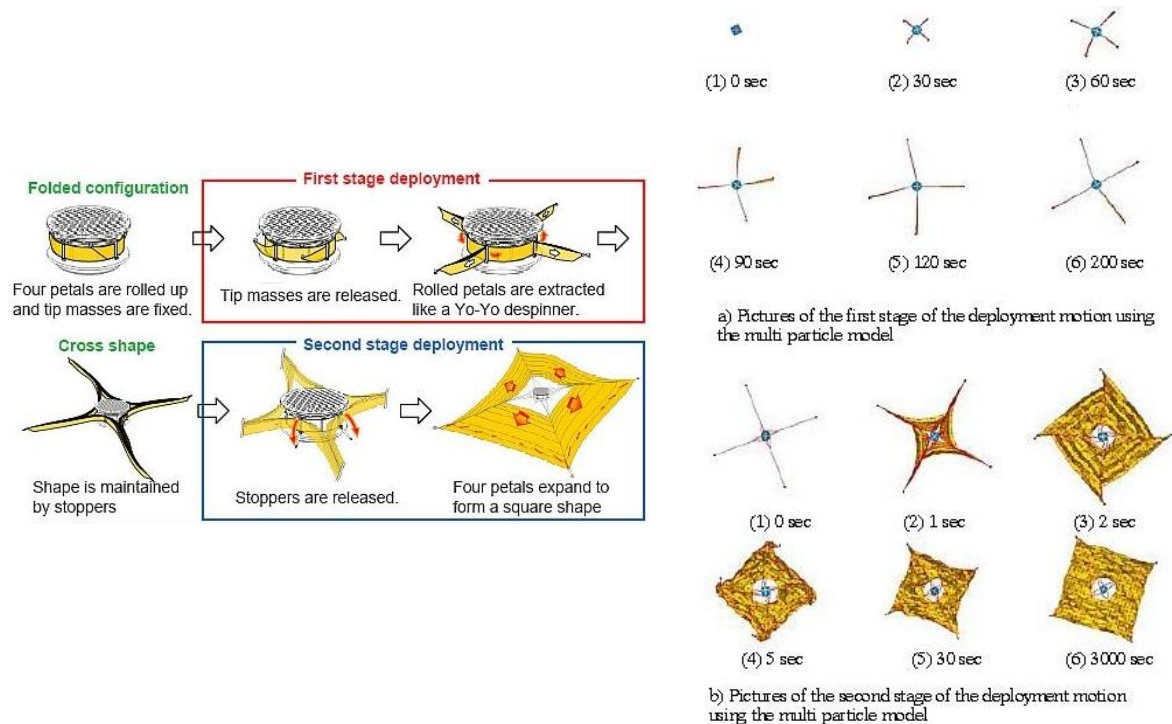


Figura 3.18 Desplegament de la vela IKAROS Font: JAXA

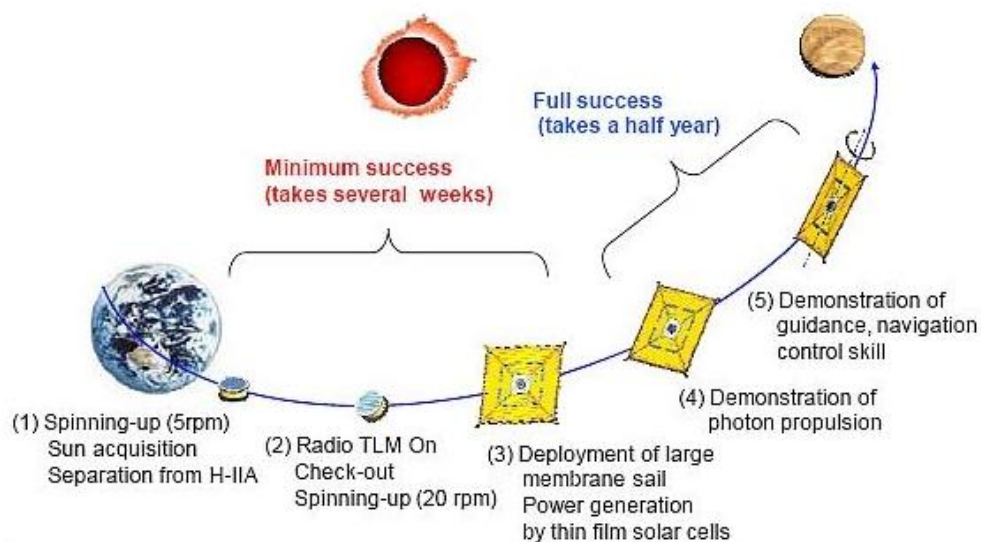


Figura 3.19 Visió general i objectius principals de la missió del IKAROS Font: JAXA

3.1.8.2 PROJECTES DE VELES EN DESENVOLUPAMENT

BREAKTROUGH STARSHOT: Breakthrough Starshot és un projecte en desenvolupament que té com a objectiu enviar una sonda que utilitzi una vela solar propulsada amb un làser des de la Terra per assolir un viatge fins al sistema estel·lar de Alpha Centauri a 4,37 anys llum de distància.

La missió es centraria en l'exoplaneta Proxima Centauri B, un dels exoplanetes tel·lúrics situat a la zona habitable de la seva estrella. A una velocitat d'entre el 15% i el 20% de la velocitat de la llum, es tardaria entre 20 i 30 anys en completar el viatge. (21)

L'objectiu de la missió és demostrar una prova conceptual de lo ràpid que es poden accelerar les nanosondes i fer un primer llançament a Alpha Centauri. També hi ha altres objectius secundaris com l'exploració fora del sistema solar i la detecció de asteroides. La sonda podria fotografiar exoplanetes tel·lúrics que existeixen en el sistema.

Calculant que la sonda de vela sola podria ser llençada al espai al voltant del any 2036, el pressupost final del projecte podria arribar a 10^{10} \$. (21) (22)

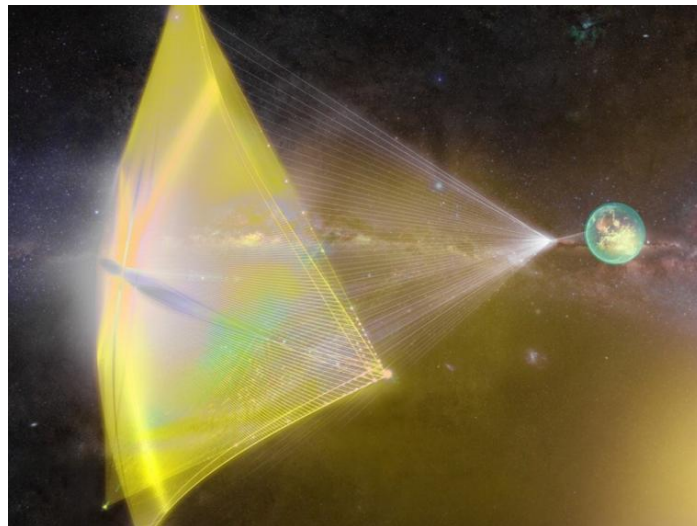


Figura 3.20 Concepte de la vela solar de Breakthrough Starshot. Font: breakthroughinitiatives

4. 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 relativament pròxim interessants per a explorar, coneixem varis exoplanetes que podrien contenir vida. En aquest apartat es tenen en compte aquests llocs i es valora els pros i contres de l'exploració de cadascun d'aquests per tal de seleccionar-ne un, veure les característiques i dificultats del viatge i tenir-les en compte per a el disseny de la sonda.

4.1. ESTUDI DE SISTEMES ESTELARS HABITABLES

La zona d'habitabilitat estel·lar (ZH), és un rang d'òrbites al voltant d'una estrella en la que si s'hi trobés un planeta orbitant podria tenir aigua en estat líquid en la superfície, donant lloc a una atmosfera amb pressió suficient. (23)

El principal factor que determina els límits de la zona habitable és la lluminositat de l'estrella. Aquest pot variar significativament en funció del tipus d'estrella i del seu cicle vital. La distància entre els límits de la zona és més ample com més lluminosa és l'estrella, però també és més variable al llarg de la seva vida.

Fora de la distància mínima a la estrella, l'entorn planetari patiria un efecte hivernacle desbocat mentre que fora de la distància màxima de l'estrella, les baixes temperatures mantindrien el planeta en una glaciació perpètua. (23) (24)

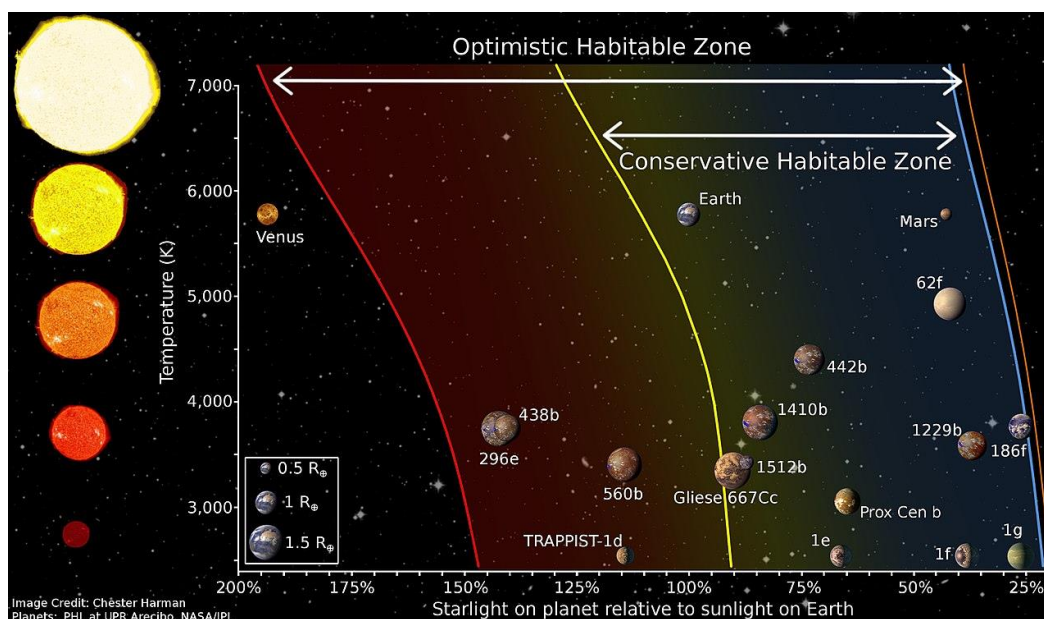


Figura 4.1 Diagrama que defineix els límits de la zona habitable, límits que són afectats segons el tipus d'estrella. Font: microsiervos

Les estrelles més fredes i petites que el sol (tipus M i K), estan molt de temps en la seva seqüència principal i la seva reduïda zona d'habitabilitat varia molt poc. Les estrelles més massives (tipus F, A, B y O) compten amb una zona d'habitabilitat més extensa però més variable al llarg del seu cycle vital relativament curt. (25)







Figura 4.2 Classificació de les estrelles en el estat de seqüència principal. Font: EcuRed

Teòricament, les estrelles de tipus G com el nostre sol, representen les característiques més òptimes per a la vida. A diferència d'altres estrelles, tenen una fase d'intensa d'activitat després de la seva formació més curta en comparació a altres estrelles (uns $500 \cdot 10^6$ d'anys en el cas del sol, i uns $2000 \cdot 10^6$ o $3000 \cdot 10^6$ anys en el cas d'una estrella tipus M). Una fase curta d'intensa activitat evita que els planetes potencialment habitables perdin les seves atmosferes durant els seus primers milers de milions d'anys d'existència. (24)(25)

A mesura que la mida d'una estrella augmenta, creix també l'emissió de radiació ultravioleta de l'estrella. Mentre que en estrelles anàlogues al sol seria impossible l'aparició de vida no aquàtica sense una capa d'ozó en l'atmosfera, en un planeta sense protecció per a una capa d'ozó situat en la zona habitable d'estrelles taronges tipus K si que seria possible. Això dona lloc a que es considera que les estrelles nanes taronja (tipus K) son més favorables per a l'habitabilitat planetària, per sobre de les anàlogues al sol i donant lloc a els hipotètics planetes anomenats superhabitables. Planetes similars a la Terra que presenten inclús condicions més adequades per a la vida que la pròpia Terra. (26)

4.1.1 ESTUDI DE PLANETES HABITABLES

Un planeta potencialment habitable, no només implica un planeta situat a la zona habitable de l'estrella, el planeta ha de tenir també unes condicions comparables a les de la terra.

Planeta	Estrella (Tipus espectral)	Limits ZH min-màx (UA)	Distància estrella (UA)	Distància a la Terra (al)	T (°C)	m (M_{\oplus})	r (R_{\oplus})	Rotació Síncrona
 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
 Gliese 667Cc	M	0,096 0,251	0,13	23,62	4	3,7	1,5	Sí
 Kepler 442b	K	0,274 0,681	0,41	1.206	-3	2,3	1,34	No

Taula 4.1 Taula d'exoplanetes potencialment habitables, Terra inclosa per comparació. Font: pròpia

En la taula [Taula 4.1](#), es mostra un breu llistat dels exoplanetes considerats els més potencialment habitables. De cada exoplaneta es mostra el tipus d'estrella a la que orbita, la distància a la que es troba el planeta a aquesta, la distància de la Terra a l'exoplaneta, la temperatura mitjana superficial, la massa i el radi.

També s'indica si el planeta es troba ancorat o no respecte a la seva estrella i per tant mancament de rotació. (23) (25)

Pròxima Centauri b: Pròxima b, Pròxima Centauri b o Alfa Centauri Cb, És un exoplaneta orbitant en la zona habitable de l'estrella nana roja Pròxima Centauri, aquesta estrella és la més propera al Sol, situada a 4,2 anys llum. També és el planeta objectiu del projecte en desenvolupament Breakthrough Starshot. Ja que aquest exoplaneta és el potencialment habitable més proper que es coneix, té sentit que la primera sonda espacial enviada fora del sistema solar s'utilitzi per explorar Pròxima b. (26)

4.2 QUÈ ENS SEPARA DE PROXIMA B?

S'anomena viatge interestel·lar a un viatge entre estrelles, les principals dificultats d'aquest viatge (tripulat o no), és l'enorme distància a recórrer en un temps raonable amb mètodes de propulsió realistes i l'exposició a perills que es puguin trobar així com radiació o micro meteorits. (29)

El medi interestel·lar no és uniforme, està compost per varis núvols de diferents densitats, temperatures, diferents forces de camps magnètics i direccions.

El Sol es troba sotmès per a una regió del medi interestel·lar anomenat núvol interestel·lar local. El vent solar empeny el límit del núvol interestel·lar local en direcció a l'exterior fins que el vent és massa dèbil per empènyer més creant una bombolla dins del medi interestel·lar anomenada heliosfera. El plasma del vent solar i del vent interestel·lar no es pot barrejar ja que està limitat per les línies del camp magnètic. El límit entre el vent solar i el vent interestel·lar s'anomena heliopausa. Els límits de cada regió es mostren en la [Figura 4.4](#). (29) (30)

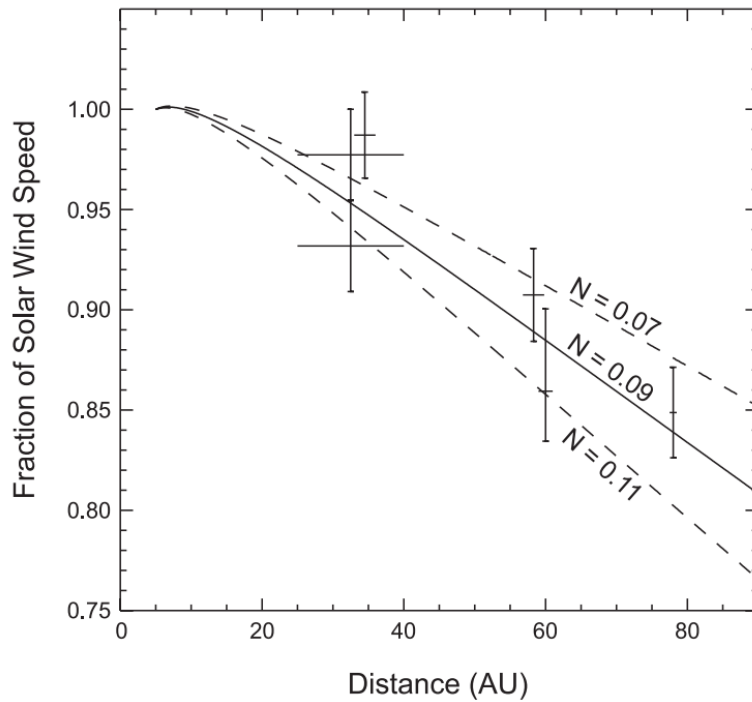


Figura 4.3 El diagrama mostra la disminució de la velocitat del vent solar causat per l'apropament a l'heliopausa. Les diferents corbes mostren la velocitat del vent per a diferents densitats de H neutre en aquesta ($0,09\text{cm}^{-3}$, $0,07\text{cm}^{-3}$ i $0,11\text{cm}^{-3}$). Font: John D. Richardson, *The Limits of Our Solar System* [2008]

Més enllà de l'heliosfera hi ha l'hipotètic Núvol de Oort, un conjunt d'objectes sòlids congelats al límit exterior del Sistema solar. Es troba a una distància d'uns 50.000 UA, aproximadament a un any llum del Sol. Això situa el Núvol de Oort gairebé a un quart de la distància a Pròxima de pròxima B. (30)

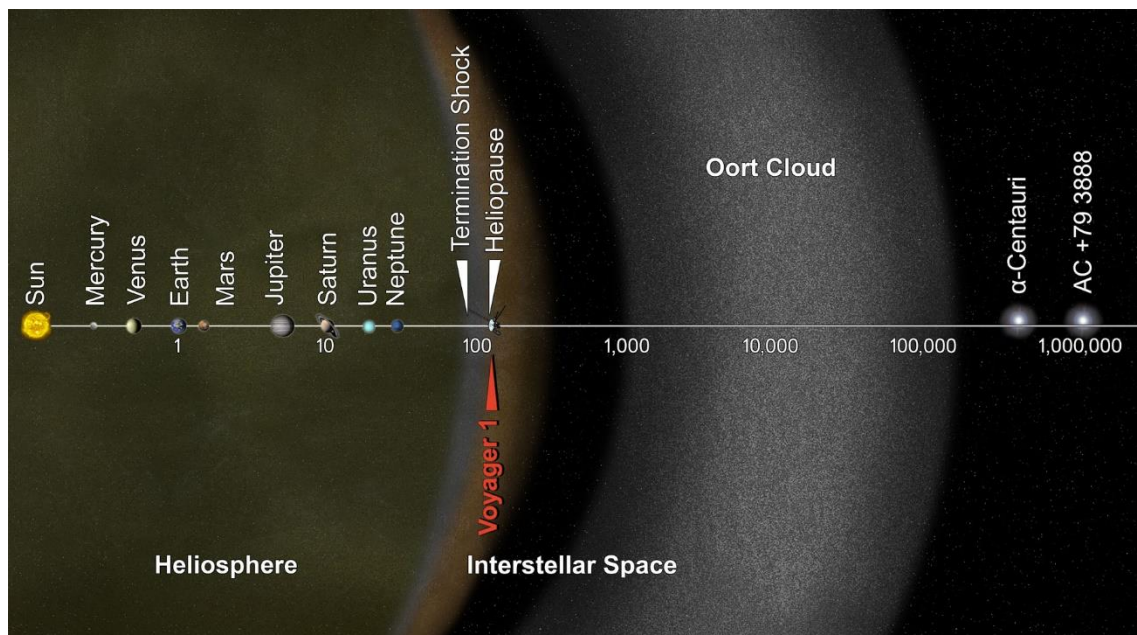


Figura 4.4 Concepte artístic de les distàncies del Sistema solar en perspectiva. La distància està en (UA) i en escala logarítmica Font: NASA

Tal i com es mostra a la figura [Figura 4.4](#), a una distància de 147.380 UA de la terra (a data de 4/11/2019) es troba el Voyager-1, l'objecte més allunyat de la Terra construït per l'home

5. SONDA

Hi han molts aspectes importants a considerar alhora de dissenyar la sonda de la vela solar, El més important en el disseny és la massa total d'aquesta. El disseny de la sonda esta enfocat en complir els requisits per al seu funcionament amb la menor massa possible.

5.1 PRINCIPI DE FUNCIONAMENT DE LA SONDA

Entendre el funcionament de la sonda i conèixer la teoria de la seva font d'impuls és molt important per a l'elecció del material que compondrà els seus reflectors. 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.

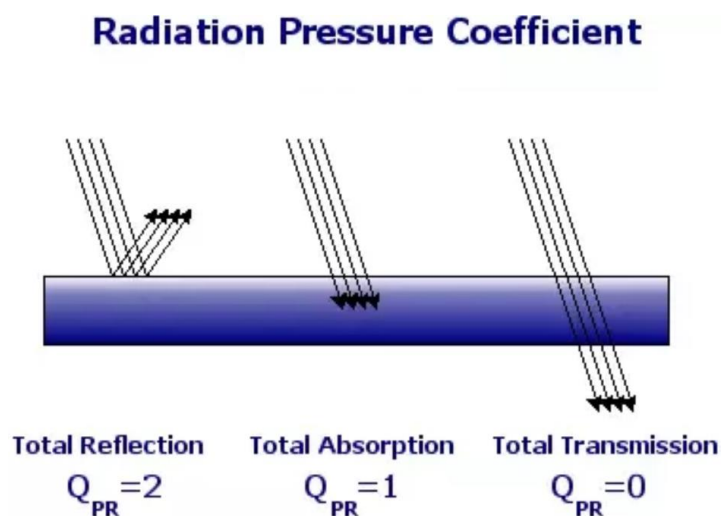


Figura 5.1 Coeficient de pressió de radiació electromagnètica per a diferents casos. Font: quora

D'acord amb la teoria de l'electromagnetisme de Maxwell, una ona electromagnètica porta un moment que serà transferit a qualsevol superfície opaca amb la que topi.

La pressió (p) no depèn de la massa de la radiació, la radiació no té massa. La pressió de la llum en una superfície és igual a la irradiància (I_f) de la llum dividida per la velocitat de la llum en el buit (c)

$$p = \frac{I_f}{c} \quad (5.1)$$

La irradiància és igual a la potència entre la superfície, i la potència depèn de l'energia, per tant ones d'alta freqüència (amb més energia) exerceixen més potència, més irradiància i més pressió en una superfície.

$$I_f = \frac{P}{A} \quad (5.2)$$

Una sonda que utilitzi veles solars, pot aprofitar els fotons d'origen solar o els d'un làser creat per l'home per a propulsar-se. En el primer cas, la irradiància que rep una sonda situada al espai ve determinada per la següent equació (3.3) on d representa la distància a el sol.

$$I_f = \frac{R_{sol}^2}{d^2} \cdot I_{f_{sol}} \quad (5.3)$$

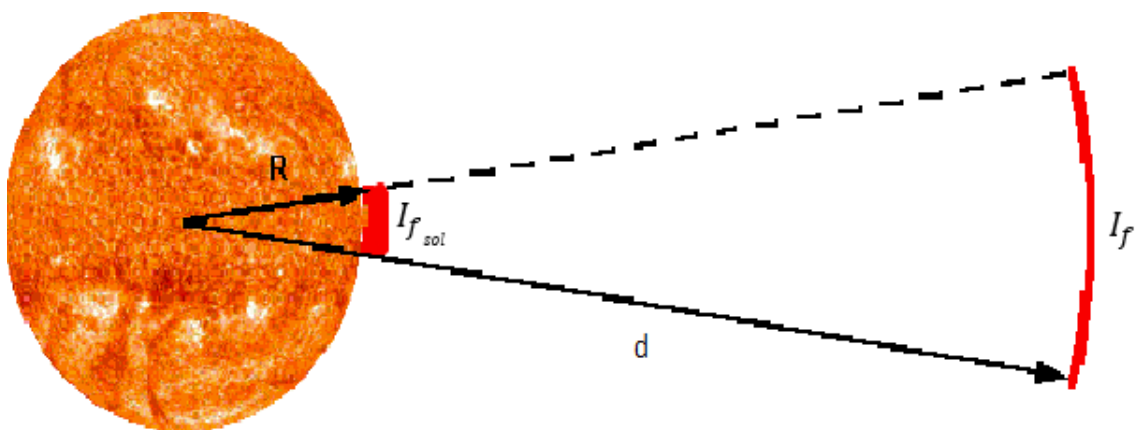


Figura 5.2 Irradiància a distància d del Sol. Font: pròpia

Tenint en compte els coeficients de reflexió de la pressió de la radiació electromagnètica de la [Figura 5.1](#), la pressió màxima s'obtindria quan hi hagi reflexió absoluta en una superfície ($Q_{pr} = 2$)

$$p = Q_{pr} \frac{I_f}{c} \quad (5.4)$$

Utilitzant les equacions (5.3) i (5.4), es pot obtenir la pressió teòrica que rebria una sonda situada a l'espai a 1 UA del Sol.

$$I_f = \frac{(695.510.000m)^2}{(149.600.000.000m)^2} \cdot 63.200.984,8548 = 1366,053 \text{ W/m}^2$$

$$p = 2 \cdot \frac{1366,052581 \text{ W/m}^2}{299.792.458 \text{ m/s}} = 9,113 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}^2$$

Els reflectors d'una sonda construïda amb un material perfecte amb el Q_{pr} de 2, proporcionarien una pressió de $9,113 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}^2$. Coneixent aquest valor i un cop fet el disseny sabent la massa de la sonda i la superfície dels seus reflectors, es pot saber quina acceleració tindria la sonda a qualsevol distància del sol. La força és el producte de la pressió per l'àrea (equació 5.5), i també és el producte de la massa per l'acceleració (5.6).

$$F = p \cdot A \quad (5.5)$$

$$F = m \cdot a \quad (5.6)$$

Per tant l'acceleració de la sonda es pot determinar per la següent equació (5.7).

$$a = \frac{p \cdot A}{m} \quad (5.7)$$

5.2 MATERIALS DE LA SONDA

Hi han varis factors a considerar a l'hora d'escollir els materials que compondran la sonda. Els materials que componen l'estructura han de ser els més lleugers possibles per afavorir l'acceleració, però suficientment resistents per suportar els esforços als que pot estar sotmesa la sonda. Per altra banda, el material de les veles també ha de ser lleuger i resistent com els de l'estructura, però a més ha de ser un bon reflector de la radiació electromagnètica.

5.2.1 REFLECTORS

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 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 cal en la cara receptora de fotons.

En la taula següent s'avaluen les propietats de diferents materials reflectors, amb l'objectiu de determinar quin és l'òptim per a la construcció dels reflectors de la vela. Es comparen els materials reflectors menys densos: alumini, magnesi i beril·li.

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

Taula 5.1. Característiques dels principals materials reflectors lleugers. Font pròpia elaborada amb dades de *The reflecting power of various metals by W. W. Coblenz [2008] (31)*

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.

Utilitzant les dades de densitat del material i gruix de la capa de la [Taula 5.1.](#) , podem conèixer la densitat superficial que tindria la capa d'alumini.

El volum d'un metre quadrat de superfície ve definit per la següent equació, on b és el costat de la superfície i h el seu gruix:

$$V_{(1m^2)} = b^2 \cdot h \quad (5.8)$$

$$V_{(1m^2)} = (100 \text{ cm})^2 \cdot (2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}) = 2 \text{ cm}^3$$

I amb les equacions de densitat volumètrica i superficial, trobem la massa que tindria la capa d'alumini dels reflectors d'aquestes dimensions i finalment la seva densitat superficial σ .

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5.9) \quad \sigma = \frac{m}{A} \quad (5.10)$$

$$m_{(1m^2)} = V_{(1m^2)} \cdot \rho_{(alumini)} = 2 \text{ cm}^3 \cdot 2,7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} = 5,4 \text{ g}$$

$$\sigma_{(1m^2)} = \frac{5,4 \text{ g}}{1m^2} = 5,4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$$

Igual que tots els materials reflectors, l'alumini té 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).

Segons el llibre *W. W. Coblentz, The reflecting power of various metals* l'alumini presenta una reflectància determinada segons les següents longituds d'ona, i te una reflectància màxima ($\approx 0,985$) en la longitud d'ona ($\approx 1,58 \mu\text{m}$). (31)

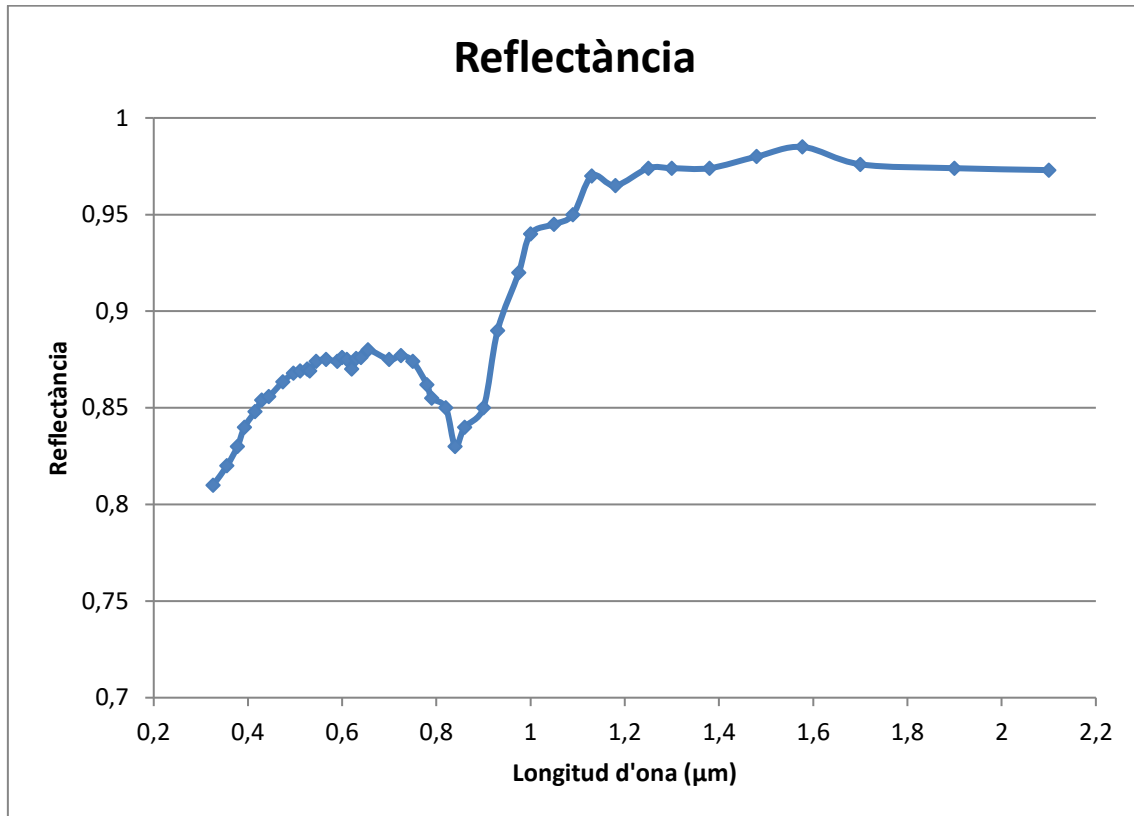


Figura 5.3 Gràfica de la reflexió de l'alumini en funció de la longitud d'ona. Font: pròpia, realitzada amb dades de *W. W. Coblentz, The reflecting power of various metals [2008] (31)*

Tal i com es mostra en l'anterior **Figura 5.3**, l'alumini ofereix la major reflexió en la longitud d'ona $1,58 \mu\text{m}$, 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 desplegable sense patir cap dany. Els materials més utilitzats per aquesta capa en les últimes sondes de veles solars són el Kapton (un polímer compost per unitats repetitives de imida amb excel·lents propietats mecàniques i elevada resistència tèrmica) i el Mylar (un polímer termoplàstic amb alta resistència al desgast i a la corrosió amb alta resistència química i tèrmica). Les propietats més importants a considerar són la densitat superficial i la temperatura de fusió del

material. A continuació es mostra una taula amb les propietats d'aquests dos materials:

	Kapton	Mylar
Gruix (μm)	25	50
Densitat sup. (g/m^2)	38,5	69
Resistència a tracció (MPa)	117	196,14
Mòdul de Young (GPa)	2,5	4,9
T. Fusió ($^{\circ}\text{C}$)	800	260
Conductivitat tèrmica (W/mk)	0,12	0,132

Taula 5.3. Característiques dels materials Kapton i Mylar. Font: Pròpia

Fent una comparació entre els dos polímers, s'opta per utilitzar Kapton per a la construcció dels reflectors. Es considera utilitzar Kapton ja que requereix una capa de menor gruix i presenta una densitat superficial inferior a la del Mylar, això implica uns reflectors amb una massa final menor.

Al final els reflectors consisteixen en un material compost per Kapton i alumini, el polímer Kapton provindria un suport mecànic a el material compost alhora que flexibilitat, la capa d'alumini situada a la cara exposada a la font de fotons, donaria la propietat de reflexió al material compost.

Un cop determinats els materials de les capes, la secció dels reflectors té un gruix total de $27 \mu\text{m}$ ($\text{gruix}_{\text{alumini}} + \text{gruix}_{\text{kapton}}$), i la densitat superficial dels reflectors és de $43,9 \text{ g}/\text{m}^2$ ($\sigma_{\text{alumini}} + \sigma_{\text{kapton}}$).

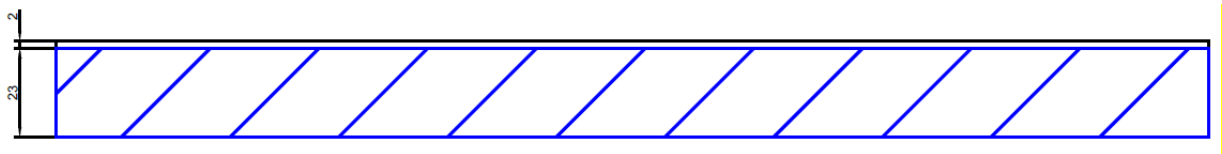


Figura 5.4. Secció del material compost dels reflectors de la vela solar, longitud en micròmetres.
Font: Pròpia

5.2.2 ESTRUCTURA

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. (32) (33)

Els 4 perfils units al cos principal són de secció tubular circular per oferir també un alt ràtio de rigidesa/massa.

	Fibra de carboni
Densitat (g/cm ³)	1,8
Mòdul de Young (GPa)	230
Resistència a tracció (GPa)	2,48
Elongació a tracció (%)	1,1

Taula 5.4 Característiques típiques de la fibra de carboni. Font: Pròpia

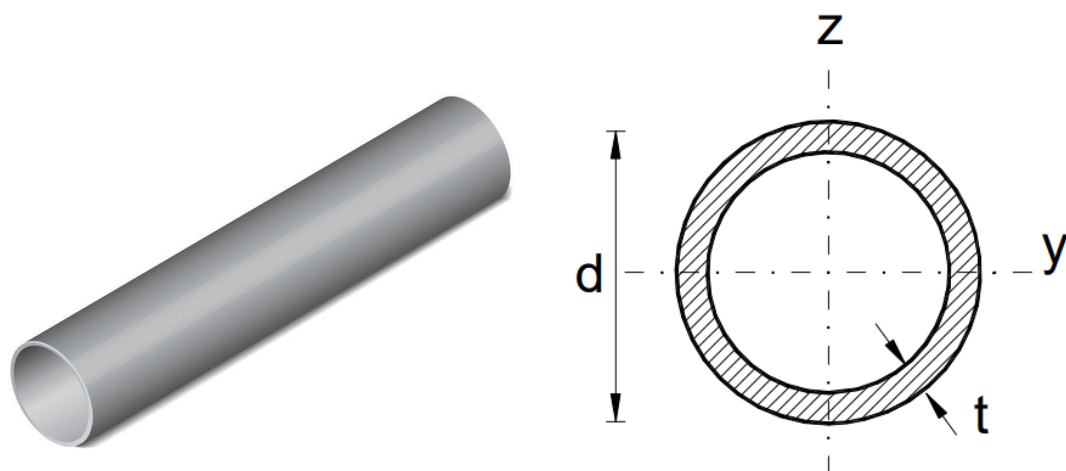


Figura 5.5 Secció del perfil tubular de l'estructura. Font: Pròpia

Prototip de vela solar impulsada per làser per al viatge interestel·lar
Josep Pinyol Escala

Utilitzant perfils de fibra de carboni de diàmetre $d = 22\text{mm}$ i espessor $t = 1\text{mm}$, el perfil presenta la següent àrea, en la que R representa el radi exterior i r el radi interior:

$$A = \pi \cdot R^2 - \pi \cdot r^2 \quad (5.8)$$

$$A = \pi \cdot (11 \text{ mm})^2 - \pi \cdot (10 \text{ mm})^2 = 65,97 \text{ mm}^2 = \mathbf{0,6597 \text{ cm}^2}$$

$$L_q = \rho \cdot A \quad (5.9)$$

$$L_q = 1,8 \text{ g/cm}^3 \cdot 0,6597 \text{ cm}^2 = \mathbf{1,1875 \text{ g/cm}}$$

El perfil presenta una densitat lineal de **1,1875 g/cm**

En l'estudi dels materials s'hauria de tenir en compte que estarien sotmesos a les condicions del Sistema solar i l'espai interestel·lar on les condicions físiques de temperatura i pressió són molt diferents als de la superfície terrestre. Tot i així, els prototips de veles existents i comentats en aquest treball ja han corroborat el funcionament d'aquest materials.

5.3 CONFIGURACIÓ DE LES VELES

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 depenent 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. (11)

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.

En el cas de la vela de perfil quadrat, la vela requereix de dues seccions estructurals perpendiculars, una en cada diagonal. Per a poder fer una comparació directa entre el perfil quadrat i el circular, es descriuen les fórmules en funció de l'àrea de la vela per saber quina de les dues configuracions ofereix una menor longitud d'estructura per a una mateixa àrea exposada a una font de fotons.

Sent L el costat de la vela i A l'àrea, la longitud d'estructura necessària per a suportar els reflectors ve determinada per a la següent equació:

$$D_s = 2L\sqrt{2} \quad (5.5)$$

Tenint en compte que $A = L^2$, s'obté la següent equació:

$$D_s = 2\sqrt{2A} \quad (5.6)$$

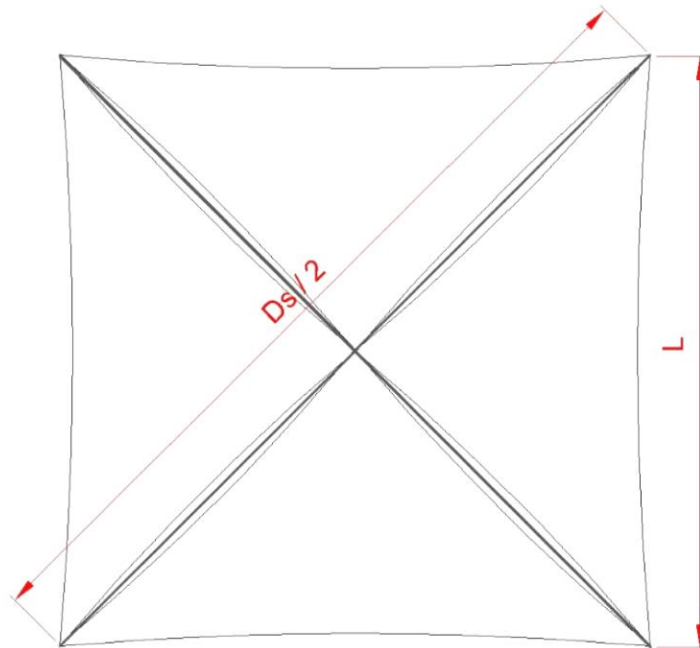


Figura 5.6 Configuració quadrada. Font: Pròpia

Per altra banda, si s'utilitzés una vela solar circular, requeriria de com a mínim una estructura que recorri tot el perímetre. Sent R el radi de la vela, el perímetre de la vela i longitud total de l'estructura, ve determinada per la següent equació:

$$D_c = 2\pi R \quad (5.7)$$

Si es te en compte que l'àrea és $A = \pi R^2$, l'equació de la longitud de l'estructura queda determinada per la següent equació:

$$D_c = 2\sqrt{\pi A} \quad (5.8)$$

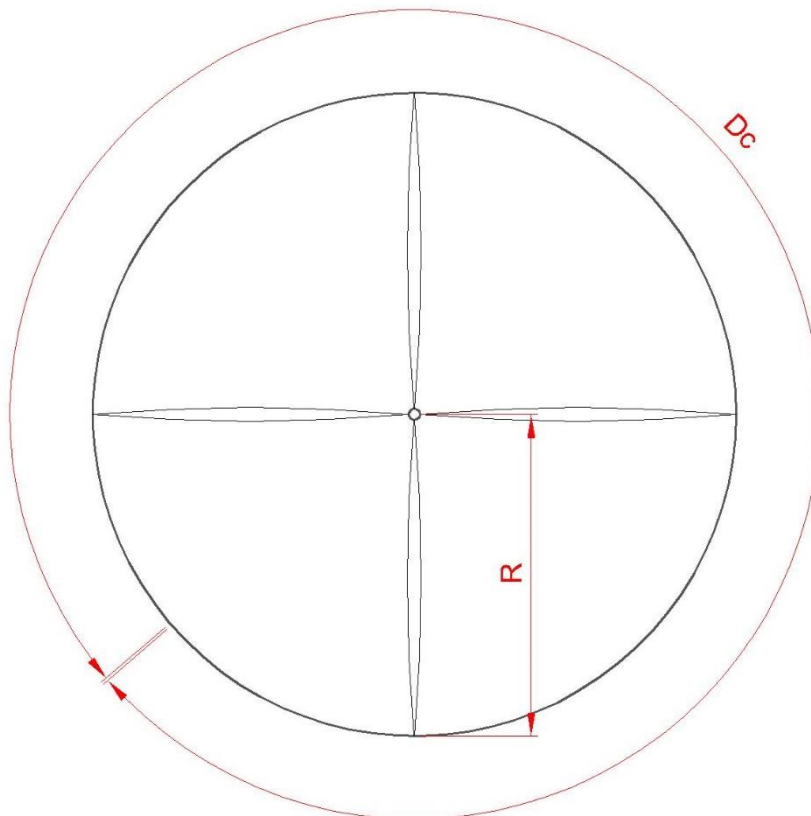


Figura 5.7 Configuració circular. Font: Pròpia

S'observa que en tots dos casos, el càlcul de la longitud de l'estructura varia 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.

$$\frac{D_s}{D_c} = \frac{2\sqrt{2A}}{2\sqrt{\pi A}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \approx 0,8$$

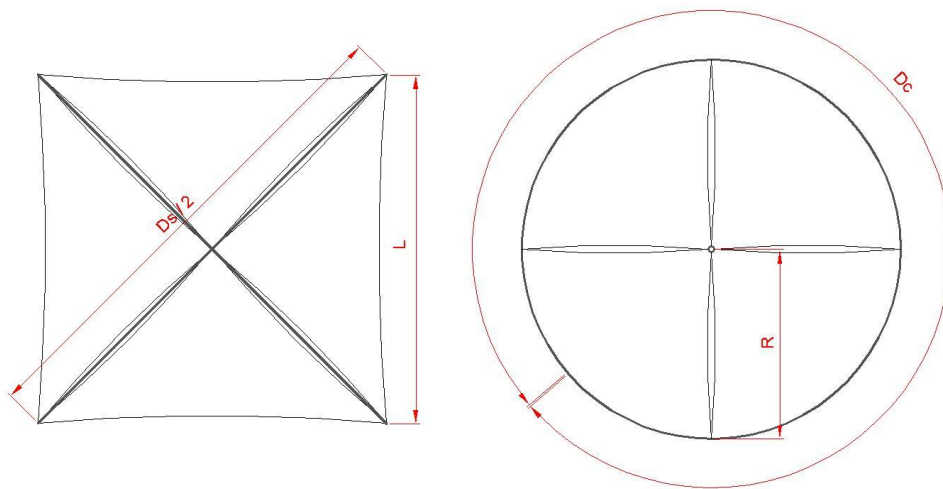


Figura 5.8 Comparació de configuracions amb la mateixa àrea Font: Pròpia

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.

5.4 MASSA I DIMENSIONS

Després de determinar els materials per a la construcció de la vela solar, (alumini i keplar per els reflectors i fibra de carboni per a l'estructura), es defineixen 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. [Veure annex 2]

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 orbita (barres de l'estructura) mesuren 30 m. [Veure plànols en annex 1]

	Perfil estructura	Reflectors	Cos	
L_q / σ (g/cm) / (g/m²)	1,1875 g/cm	43,9 g/m ²	---	
L / A	30m	450 m ²	---	
m_{1u} (Kg)	3,562	19,755	6	
Qty. (unitats)	4	4	1	
m_{total} (Kg)	14,25	79,02	6	m_{total} sonda 99,27 kg

Taula 5.5 Masses de cada part i total de la Vela Solar. Font: Pròpia

6. ANÀLISIS DE RESULTATS

Per a poder constatar la viabilitat del disseny de la vela solar 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 orbita 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 $1 \cdot 10^{-6}$ °, 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.

6.1.1 IRRADIÀNCIA

A diferència de la irradiància del Sol (calculada en l'apartat 5 utilitzant l'equació 5.3), la irradiància procedent d'un làser que rep la sonda en funció de la distància es calcula segons l'equació (6.1) 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).

$$I_f = \frac{P}{A} = \frac{P}{\pi(r)^2} = \frac{P}{\pi(d \cdot \sin \theta)^2} \quad (6.1)$$

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

$$I_f = \frac{8 \cdot 10^6 \text{ W}}{\pi(d \cdot \sin (1 \cdot 10^{-6} \text{ °}))^2}$$

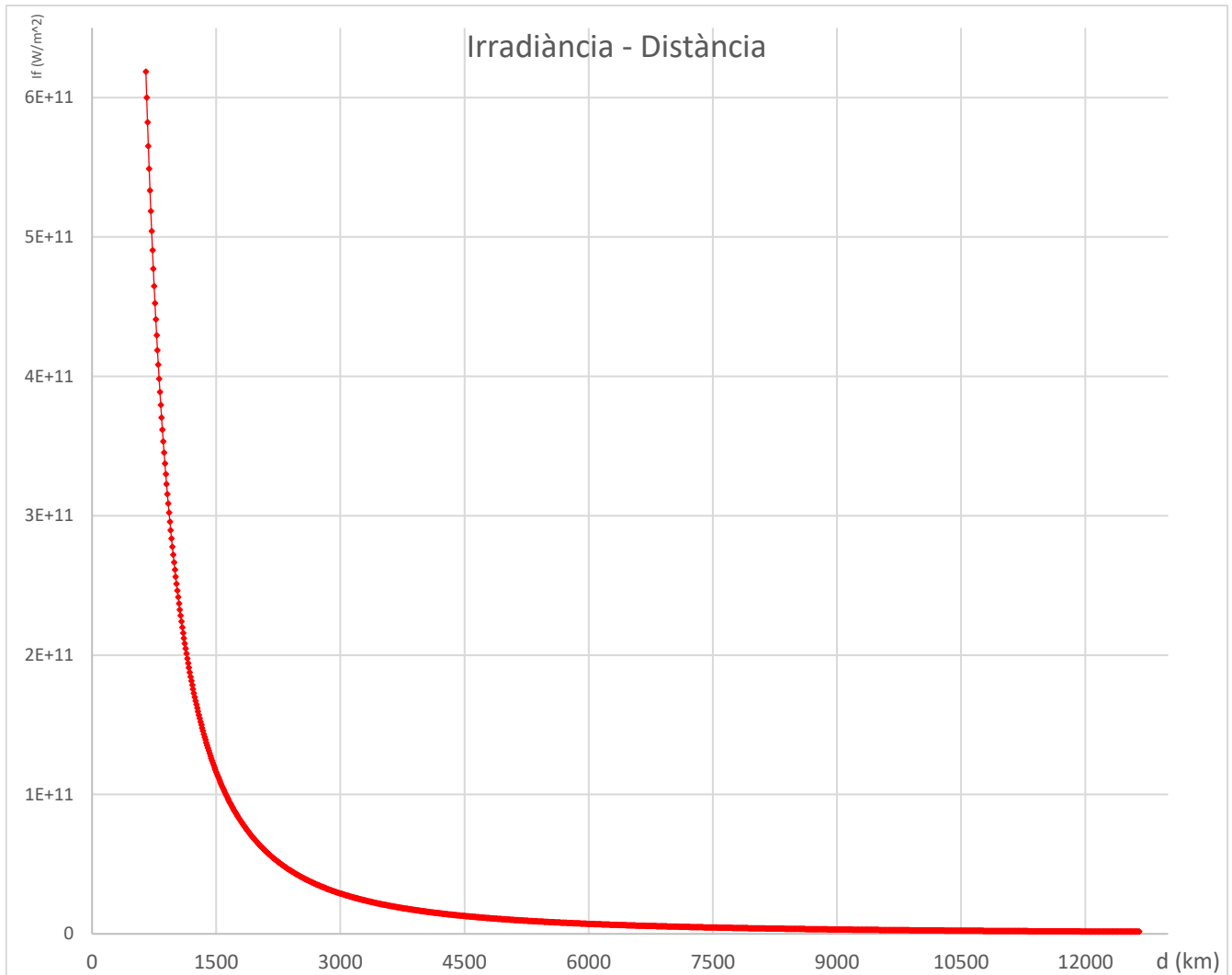


Figura 6.1 Gràfica de la irradiància que rep la sonda en funció de la distància. Font: Pròpia

En la gràfica d'irradiància respecte la distància (**Figura 6.1**) 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 al 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.

6.1.2 ACCELERACIÓ

Amb les equacions definides a l'apartat 5 (5.4 i 5.7) i sabent la irradiància que rep la vela a causa del làser a cada distància, es calcula la pressió, la força total que rep i finalment l'acceleració de la vela. On Q_{pr} és el coeficient de reflexió de radiació electromagnètica del alumini ($0,98 \cdot 2$).

$$p = Q_{pr} \frac{I_f}{c} = 1,96 \frac{I_f}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}$$

Substituint els valors d'àrea i massa per els valors de la vela, l'acceleració queda en funció de la pressió.

$$a = \frac{p \cdot A}{m} = \frac{p \cdot 1.800 \text{ m}^2}{99,27 \text{ kg}}$$

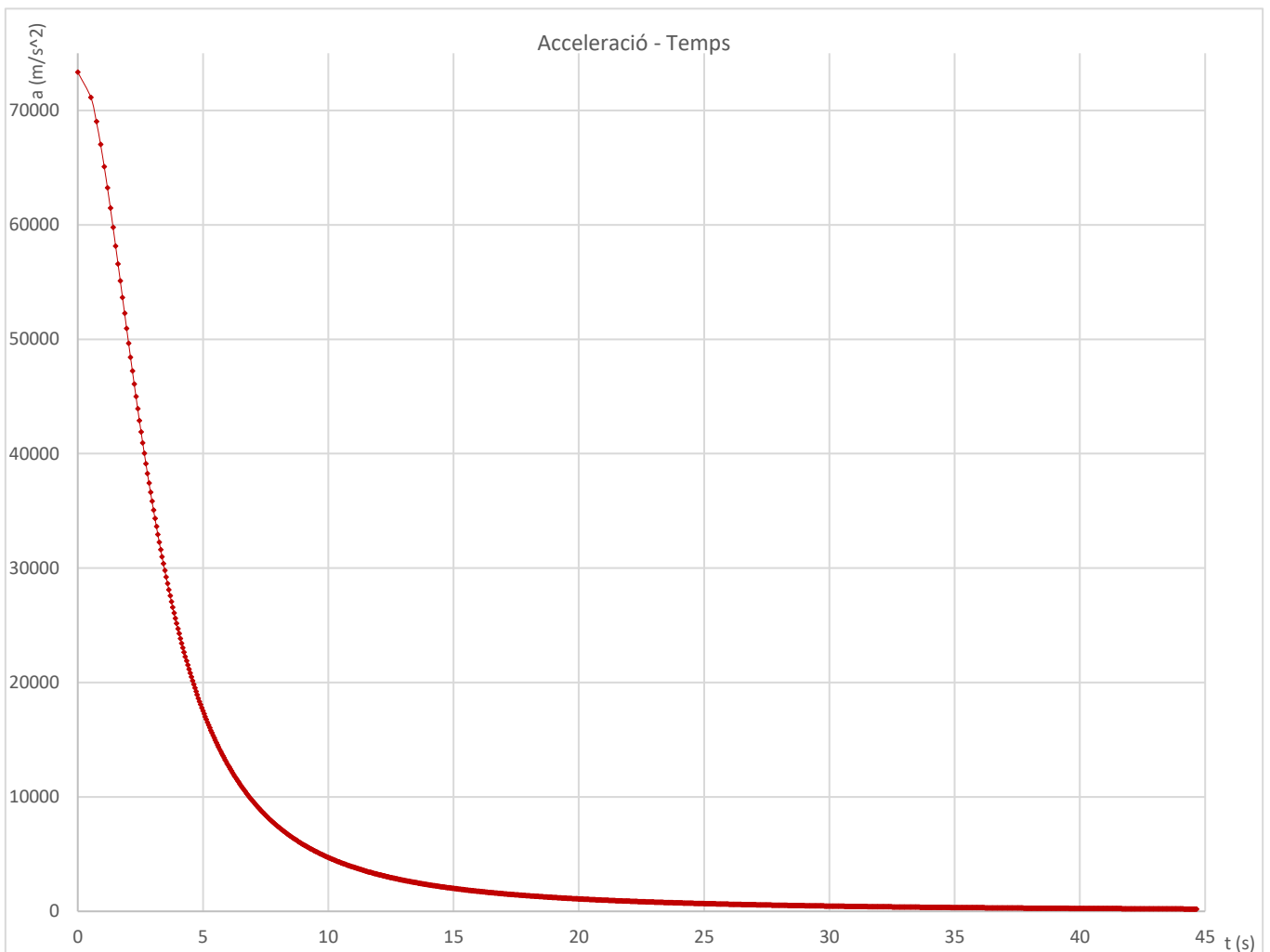


Figura 6.2 Gràfica de l'acceleració de la sonda respecte el temps Font: Pròpia

En la gràfica d'acceleració respecte el temps (Figura 6.2), també s'observa que l'acceleració màxima s'obté al inici (73.000 m/s^2) i disminueix considerablement als pocs segons a causa de que ràpidament la sonda s'ha allunyat de la font de fotons.

6.1.3 VELOCITAT

La velocitat en cada distància ve determinada per la següent equació (6.2) on v_0 i a és la velocitat i l'acceleració respectivament en el punt anterior. I Δd és l'increment de distància.

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta d} \quad (6.2)$$

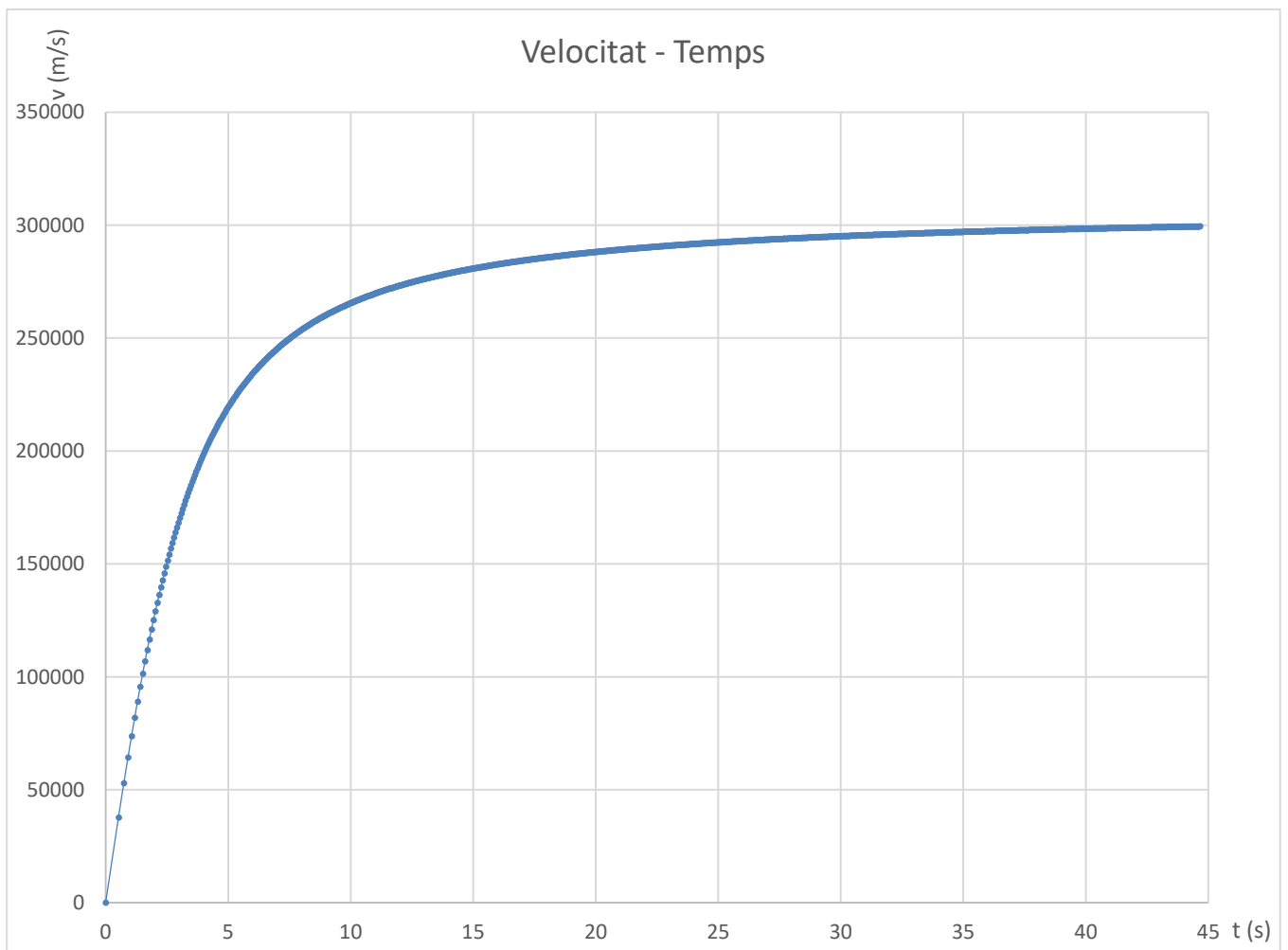


Figura 6.3 Gràfica de la velocitat respecte el temps. Font: Pròpia

En la gràfica de la velocitat respecte el temps (**Figura 6.3**), 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 mantindria la velocitat constant de 300.000 m/s.

Per conèixer el temps de viatge de la sonda, es divideix la velocitat màxima que assolirà la sonda entre la distància del viatge interestel·lar fins a Pròxima b.

$$t = \frac{d}{v} \quad (6.3)$$

$$t = \frac{4,22 \text{ al}}{300.000 \text{ m/s}} = \frac{3,99 \cdot 10^{16} \text{ m}}{300.000 \text{ m/s}} = 1,33 \cdot 10^{11} \text{ s} = 4.217 \text{ anys}$$

Utilitzant un làser de característiques idònies per a l'acceleració de la vela, el temps que tarda en realitzar el viatge interestel·lar fins a Pròxima b està molt per sobre del temps que el faria viable.

Tot i així, el temps amb el que la vela solar arriba surt del Sistema solar, a una distància de 50 UA és destacable.

$$t = \frac{7,48 \cdot 10^{12} \text{ m}}{300.000 \text{ m/s}} = 24933333 \text{ s} = 288 \text{ dies}$$

CONCLUSIONS

Realitzar un disseny de sonda espacial per a una missió requereix d'un projecte llarg i multidisciplinari en el que varis equips de persones qualificades col·laboren en el desenvolupament d'aquesta. En aquesta memòria s'han tingut en compte molts aspectes generals i poc concrets però tot i així aquesta memòria és útil per a realitzar una primera fase teòrica de com seria realment el prototip. En la realització d'aquest treball, s'han fet varis estudis i deduccions que es poden tenir en compte en la realització d'un futur disseny de vela solar d'aplicació real.

En primer lloc, realitzant aquest treball 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 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. 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 en el 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.

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 per a el seu temps dedicat a la revisió d'aquest treball aportant-hi 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.

BIBLIOGRAFIA

1. Khan Academy. *Conservacion del momento* [en línia] [consultat el: 5/10/2019]
<https://es.khanacademy.org/science/physics/linear-momentum/momentum-tutorial/a/what-is-conservation-of-momentum>
2. Thoughtco. *How rocket engines work* [en línia] [consultat el: 5/10/2019]
<https://science.howstuffworks.com/rocket4.ht>
3. Wikipedia, *Liquid-propellant rocket* [en línia] [consultat el: 7/10/2019]
https://en.wikipedia.org/wiki/Liquid-propellant_rocket
4. Wikipedia. NEXT (ion thruster). [En línia] [consultat el: 20/12/2019]
[https://en.wikipedia.org/wiki/NEXT_\(ion_thruster\)](https://en.wikipedia.org/wiki/NEXT_(ion_thruster)).
5. Wikipedia. Resistojet. [En línia] [consultat el: 20/12/2019]
<https://ca.wikipedia.org/wiki/Resistojet#/media/Fitxer:Resistojet.svg>
6. NASA. Nuclear Thermal Propulsion: Game Changing Technology for Deep Space Exploration [En línia] [consultat el: 19/12/2019]
https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/game_changing_development/Nuclear_Thermal_Propulsion_Deep_Space_Exploration
7. Wikipedia. Nuclear Thermal Rocket [En línia] [consultat el: 19/12/2019]
https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_thermal_rocket
8. Wikipedia. Direct fusion drive [En línia] [consultat el: 19/12/2019]
https://en.wikipedia.org/wiki/Direct_Fusion_Drive
9. Semantic Scholar. Direct Fusion Drive For Advanced Space Missions [En línia] [consultat el: 19/12/2019]
<https://www.semanticscholar.org/paper/Direct-Fusion-Drive-For-Advanced-Space>
10. SolutionsOk, Beam core antimater rocket [en línia][consultat el: 11/10/2019]
<https://solutionsok.com/category/antimatter/>
11. 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., juny de 2016

12. Wikipedia, Bussard Ramjet [en línia] [consultat el: 23/11/2019]
https://es.wikipedia.org/wiki/Bussard_ramjet
13. D. G. Andrews and R. Zubrin. Magnetic Sails and Interstellar Travel [Document]
[consultat el: 25/11/2019]
14. JANHUNEN, Electric Sail for Producing Spacecraft Propulsion [Document]
[consultat el: 27/11/2019]
15. Georgevic, R. M. (1973) The Solar Radiation Pressure Forces and Torques Model [Document] [consultat el: 28/11/2019]
16. Wikipedia, Solar Sails. [En línia] [consultat el: 28/11/2019]
https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_sail
17. Wikipedia, Cosmos 1 [en línia] [7/10/2019] [consultat el: 7/10/2019]
https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmos_1
18. Babakin Space Center, COSMOS ONE: THE FIRST SOLAR SAIL a project of The Planetary Society with Cosmos. [en línia] [consultat el: 10/10/2019]
<https://slideplayer.com/slide/4565754/>
19. WebCite IKAROS [en línia][consultat el: 10/10/2019]
<https://www.webcitation.org/679y31zeE?url=http://www.jspec.jaxa.jp/e/activity/ikaros.html>
20. EO Sharing Earth Observation Resources, IKAROS (interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun) [en línia][consultat el: 10/10/2019]
<https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/i/ikaros#CsePC13a9Herb>
21. Breakthroughinitiatives, Starshot, [En línia] [consultat el: 25/10/2019]
<https://breakthroughinitiatives.org/initiative/3>
22. Wikipedia, Breakthrough Starshot, [En línia] [consultat el: 25/10/2019]
https://en.wikipedia.org/wiki/Breakthrough_Starshot#cite_note-BR-20160412about-8
23. Wikipedia, Zona d'habitabilitat, [En línia] [consultat el: 25/10/2019]
https://ca.wikipedia.org/wiki/Zona_d%27habitabilitat
24. E-education, The Habitable Zone, [En línia] [consultat el: 25/10/2019]
https://www.e-education.psu.edu/astro801/content/l12_p4.html
25. Astrobitàcora, Classificació estel·lar [En línia] [consultat el: 25/10/2019]

- <https://www.astrobitacora.com/la-clasificacion-estelar/>
26. Wikipedia, Planeta Superhabitable [En línia] [consultat el: 25/10/2019]
https://ca.wikipedia.org/wiki/Planeta_superhabitable
27. Gizmodo, Pròxima b, [En línia] [consultat el: 25/10/2019]
<https://es.gizmodo.com/proxima-b-el-exoplaneta-mas-cercano-a-la-tierra-podria-1829131146>
28. Wikipedia, Interstellar travel, [En línia] [consultat el: 03/11/2019]
https://en.wikipedia.org/wiki/Interstellar_travel
29. Astronomia, Sistema Solar, [En línia] [consultat el: 03/11/2019]
<https://www.astromia.com/solar/sistema.htm>
30. Astronomia, Heliopasfera y Heliopausa. [En línia] [consultat el: 03/11/2019]
<https://www.astromia.com/glosario/heliopausa.htm>
31. W. W. Coblentz, The reflecting power of various metals, [2008]
32. NASA, Materials and Manufacturing. [En línia] [consultat el: 01/01/2020]
https://www.nasa.gov/centers/johnson/pdf/584729main_Wings-ch4c-pgs200-225.pdf
33. Sciencedirect, graphite fiber. [En línia] [consultat el: 01/01/2020]
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/graphite-fiber>

INFOGRAFIA

Figura 3.1 Esquema del funcionament d'un motor de combustible líquid. Font: Martin Trolle Mikkelsen (Blog). Extret de:

https://es.wikipedia.org/wiki/Propulsor_de_combustible_l%C3%ADquido#/media/Archivo:Rocket_liquid_fuel_engine.svg

Figura 3.2 Imatge del coet Saturn V, coet de 3 fases de combustible líquid desenvolupat per la NASA en el programa Apollo. Font: NASA. Extret de:

https://en.wikipedia.org/wiki/Saturn_V#/media/File:Apollo_11_Launch_-_GPN-2000-000630.jpg

Figura 3.3 Dibuix esquemàtic del funcionament d'un motor de ions. Font: commons.wikimedia. Extret de:

https://es.wikipedia.org/wiki/Propulsor_i%C3%B3nico

Figura 3.4 BepiColombo, el satèl·lit construït per a la ESA y la JAXA. llençat el octubre del 2018. Té previst arribar a mercuri el 2025 utilitzant 4 propulsors iònics. Font: Aviaciondigital. Extret de:

<https://aviaciondigital.com/bepicolombo-inicia-su-larga-trayectoria-de-frenado-hasta-mercurio/>

Figura 3.5. Diagrama simplificat del funcionament del resistojet. Font: Viquipèdia. Extret de:

<https://ca.wikipedia.org/wiki/Resistojet#/media/Fitxer:Resistojet.svg>

Figura 3.6 Diagrama simplificat d'un motor de fissió nuclear. Font: Sreechithra.as (blog). Extret de:

<https://www.slideshare.net/sreechithra1/nuclear-rockets-thermal>

Figura 3.7 Disseny d'un NERVA (Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application) Font: NASA. Extret de:

https://www.researchgate.net/profile/Glen_Wurden/publication/281110305/figure/fig4/AS:358785035063299@1462552426981/Credit-Atomic-Energy-Commission-The-NERVA-rocket-engine-a-nuclear-thermal-third-stage.png

Figura 3.8 Esquema del funcionament d'un DFD, en el interior hi hauria contingut plasma de heli-3 i deuteri (un tipus específic d'hydrogen que té un neutró en el nucli). Extret de:

<http://princetonfusionsystems.com/?author=1>

Figura 3.9 Prototip de DFD del laboratori de la universitat de Princeton. Font: Universitat de Princeton. Extret de:

https://en.wikipedia.org/wiki/Direct_Fusion_Drive#/media/File:PFRC_2_pulse.jpg

Prototip de vela solar impulsada per làser per al viatge interestel·lar
Josep Pinyol Escala

Figura 3.10 Disseny d'un coet d'antimatèria Font: Nick Stevens Graphics

<https://nick-stevens.com/wp-content/uploads/2018/11/beam-core-am-rocket-plansx-1024x562.jpg>

Figura 3.11 Esquema d'una sonda Bussard Ramjet. Font: Stan Giblisco. Extret de:

<https://i.ytimg.com/vi/RQjq5E8RWkg/maxresdefault.jpg>

Figura 3.12 Esquema del camp d'una vela magnètica en un vent de partícules carregades. Font: wikipedia. Extret de:

https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_sail#/media/File:Magsail-particle-wind.png

Figura 3.13 Representació d'una vela de camp elèctric. El canó d'electrons mantindria els cables de la sonda carregats positivament, desviant d'aquesta manera els protons del vent solar i obtenint moment. Font: Janhunen. Extret de:

<http://electric-sailing.fi/pics/AlexandreSzames.jpg>

Figura 3.14 Vista general del Cosmos 1. Font: The planetary society. Extret de:

<https://www.planetary.org/multimedia/space-images/spacecraft/cosmos-1-spacecraft.html>

Figura 3.15 Desplegament d'una vela del cosmos 1. Font: The planetary society. Extret de:

<https://www.planetary.org/multimedia/space-images/spacecraft/cosmos-1-spacecraft.html>

Figura 3.16 Il·lustració de la sonda IKAROS. Font: JAXA. Extret de:

<https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/i/ikaros>

Figura 3.17 Reflexió controlable del RCD. Font: JAXA. Extret de:

https://earth.esa.int/documents/163813/181607/Ikaros_Auto25

Figura 3.18 Desplegament de la vela IKAROS Font: JAXA. Extret de:

<https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/i/ikaros>

Figura 3.19 Visió general i objectius principals de la missió del IKAROS Font: JAXA. Extret de:

<https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/i/ikaros>

Figura 3.20 Concepte de la vela solar de Breakthrough Starshot. Font: breakthroughinitiatives. Extret de:

<https://breakthroughinitiatives.org/initiative/3>

Figura 4.1 Diagrama que defineix els límits de la zona habitable, límits que son afectats segons el tipus d'estrella. Font: microsiervos. Extret de:

<https://www.microsiervos.com/archivo/ciencia/kepler-localiza-planeta-extrasolar-tamano-tierra-zona-habitable-su-estrella.html>

Prototip de vela solar impulsada per làser per al viatge interestel·lar
Josep Pinyol Escala

Figura 4.2 Classificació de les estrelles en el estat de seqüència principal. Font: EcuRed. Extret de:
<https://i.pinimg.com/originals/da/56/63/da566346dae47d877f9fff83b5d246f0.jpg>

Figura 4.4 Concepte artístic de les distàncies del sistema solar en perspectiva. La distància esta en unitats astronòmiques i en escala logarítmica Font: NASA. Extret de:
<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA17046>

Figura 5.1 Coeficient de pressió per radiació electromagnètica per a diferents casos. Font: quora. Extret de:
<https://www.quora.com/What-are-the-physics-behind-radiation-pressure>

ANNEX 1 - PLANOLS

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

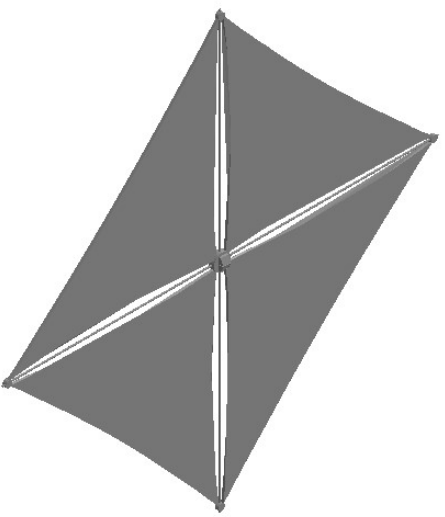
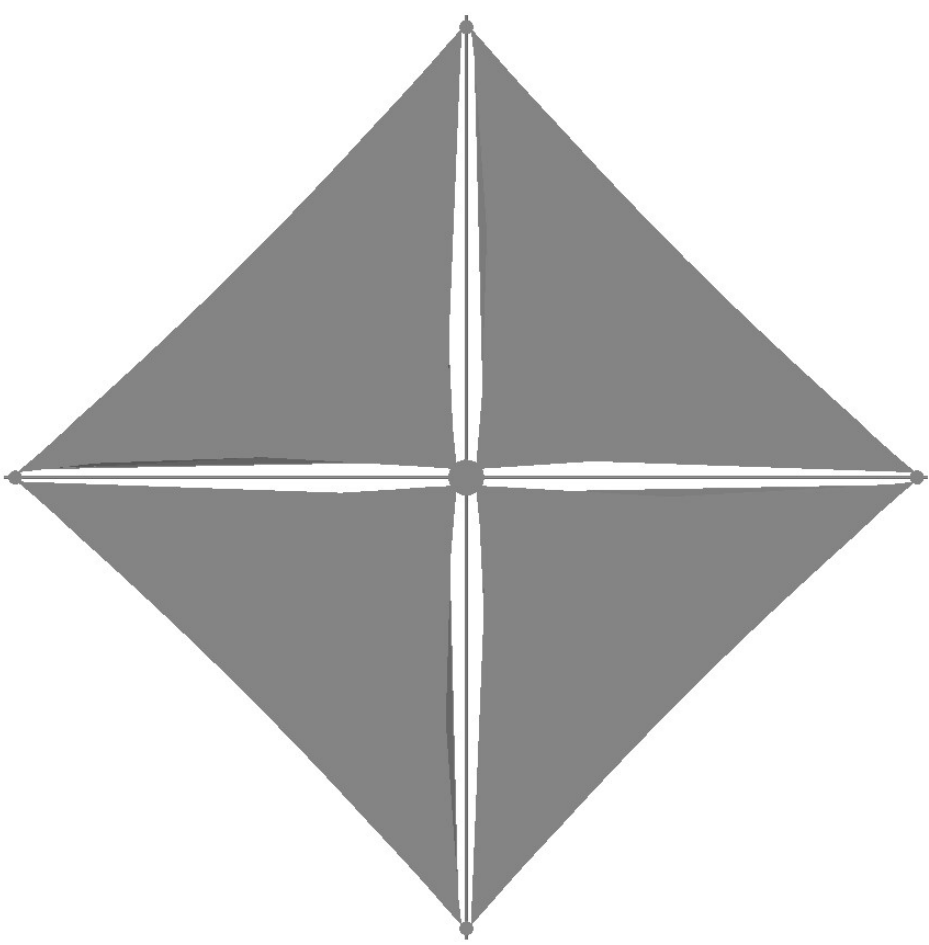
C

B

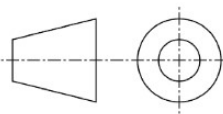

B

A

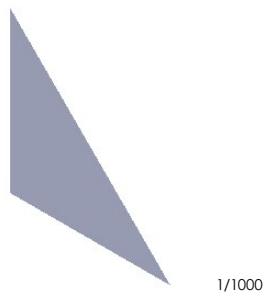
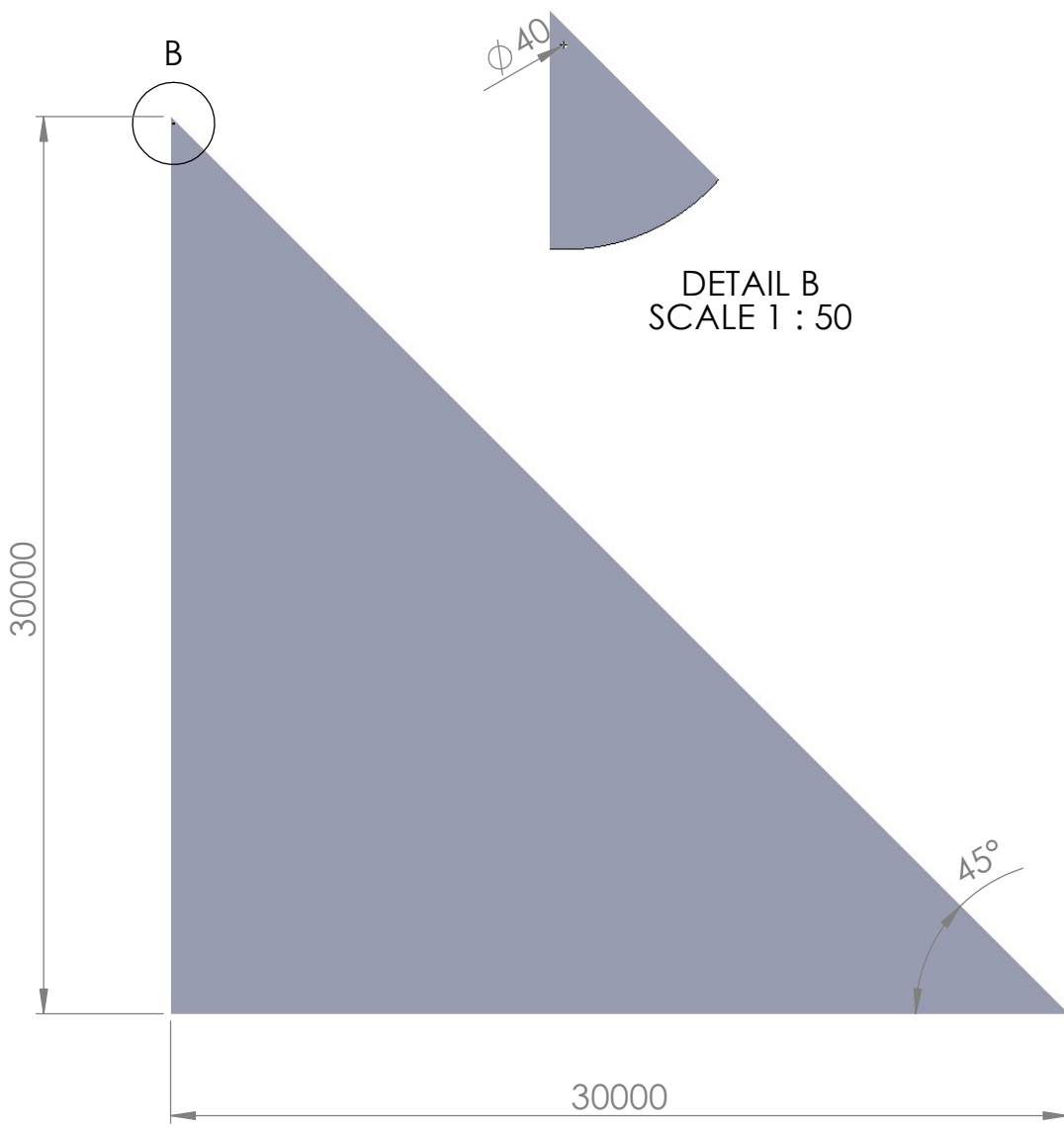
A



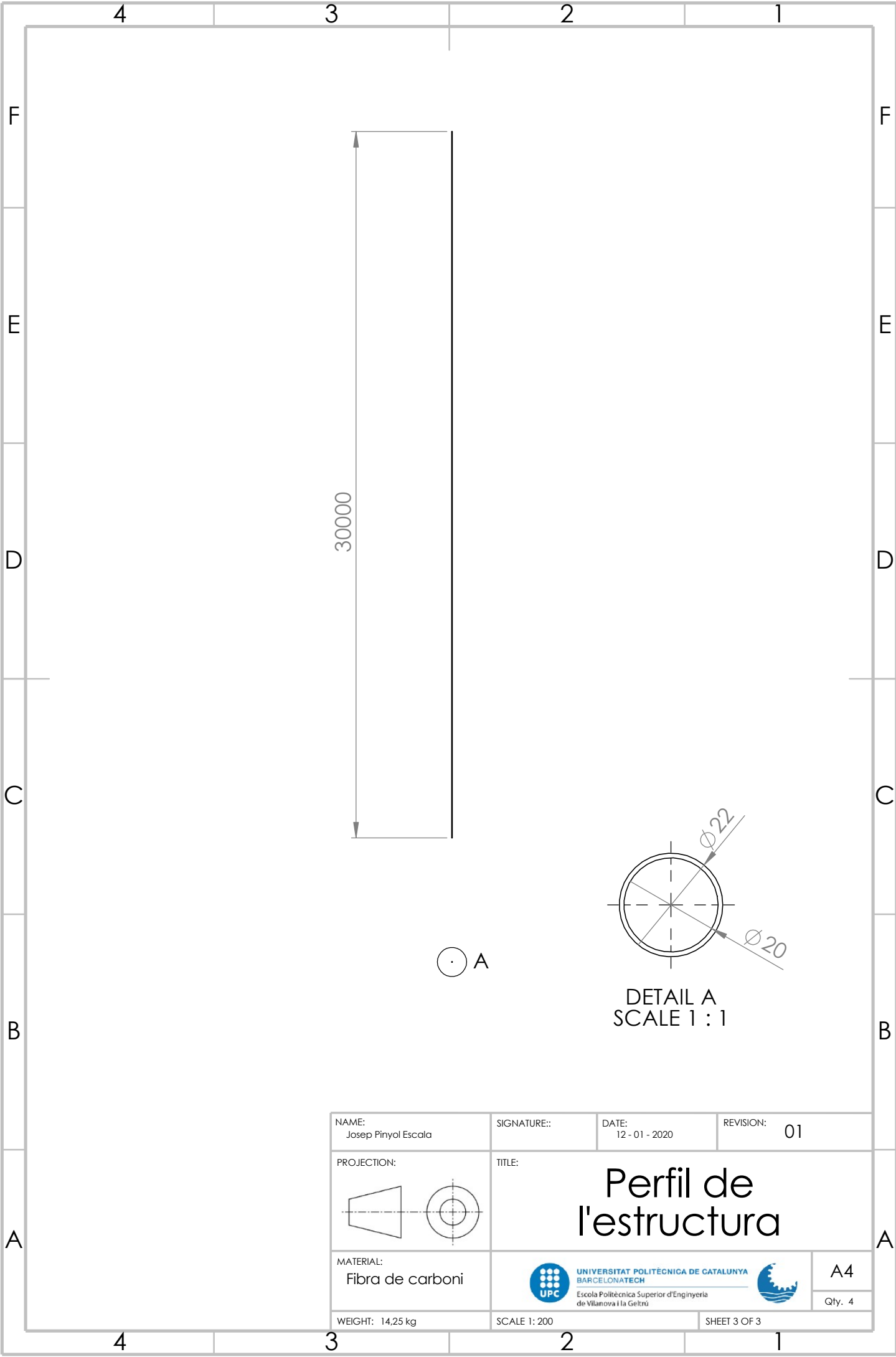
1/750

NAME: Josep Pinyol Escala	SIGNATURE:	DATE: 12 - 01 - 2020	REVISION: 01
PROJECTION: 	TITLE: <h1>Conjunt Vela Solar</h1>		
MATERIAL: Varis	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú		A4
WEIGHT: 99.27 kg	SCALE: 1:500	SHEET 1 OF 3	

4 3 2 1

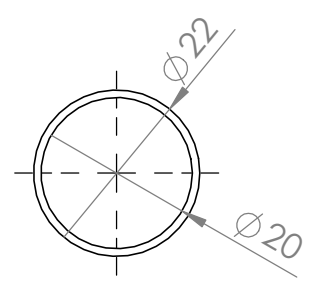


NAME: Josep Pinyol Escala	SIGNATURE:	DATE: 12 - 01 - 2020	REVISION: 01
PROJECTION: 	TITLE: <h1>Reflector</h1>		
MATERIAL: Kapton Aluminitzat	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú		A4 Qty. 4
WEIGHT: 19.755 kg	SCALE 1: 250	SHEET 2 OF 3	

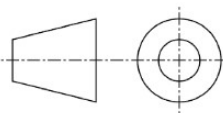



30000

○ A



DETAIL A
SCALE 1 : 1

NAME: Josep Pinyol Escala	SIGNATURE::	DATE: 12 - 01 - 2020	REVISION: 01
PROJECTION: 	TITLE: <h1>Perfil de l'estructura</h1>		
MATERIAL: Fibra de carboni	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú		 A4 Qty. 4
WEIGHT: 14.25 kg	SCALE 1: 200	SHEET 3 OF 3	

ANNEX 2 – SEMBLANÇA I TEORIA DE MODELS

Capítol 35 Semblança i teoria de models

La tècnica d'assajos en model es pot aplicar a qualsevol sistema físic que necessiti la realització d'experiències per resoldre problemes específics.

Per sistema físic s'entén un conjunt de components tecnològics i/o parts del món físic natural que responen individualment, o en la seva totalitat, als senyals d'entrada, i els converteixen en senyals de sortida, o respostes (per exemple, una turbina hidràulica). El comportament d'aquests sistemes es pot investigar per tècniques experimentals; és a dir, es sotmet el sistema a assaig sota condicions planificades i s'observa, o mesura, la seva resposta. Per als sistemes de grandària i naturalesa complexa, els assajos experimentals es realitzen preferentment sobre una rèplica del sistema, anomenat model, de grandària més petita. Aquest és el cas en el disseny i desenvolupament d'avions, estructures de gran alçària, petrolers, grans preses, ports i ponts, i molts altres sistemes tecnològicament avançats per als quals les prestacions i el comportament s'han de predir amb una gran precisió i amb alt nivell de confiança. Alhora, la grandària del sistema original, anomenat prototipus, pot ser en alguns casos massa petita perquè s'hi puguin realitzar experiències i assajos fiables; en aquest cas, pot ser convenient fer servir models ampliat. Aquesta variabilitat de la grandària física és un dels trets més importants de la tècnica d'utilització de models.

Per analogia amb la grandària física cal preguntar-se pel temps. Els assajos en el model, cal que s'allarguin tant com durin els processos implicats en el prototipus? És clar que la resposta és no. Hem de pensar que l'aterrament de ports o l'erosió de la vorera dels rius pot necessitar molts anys. La tècnica d'utilització de models permet extrapolar les escales de temps dels processos que s'han assajat en model, tal com es fa amb les escales de grandària. Així, els anys es poden veure reduïts a dies o hores d'experimentació per aconseguir la informació desitjada.

Una condició necessària base de la teoria de models i de l'experimentació amb ells és que el model i el prototipus del sistema han d'acomplir les mateixes lleis físiques. A més, el model s'ha de construir de manera que compregui totes les característiques i les parts rellevants del prototipus. Si aquestes condicions són satisfactòries, cal esperar que hi hagi una interrelació única entre prototipus i model. Per tant, els resultats de les experiències

portades a terme en el sistema model poden ser directament relacionades amb el sistema prototipus, i aporten així la solució buscada del problema que es refereix al prototipus.

La relació única entre el prototipus i el model s'anomena, en termes generals, semblança. La tècnica que tracta de les relacions entre el prototipus i el model s'anomena *experimentació amb models*, i els seus principis bàsics es desenvolupen a la *teoria de models*. L'experimentació amb models és, en el sentit més estricte, una tècnica experimental, i la seva aplicació es fonamenta essencialment en consideracions dimensionals.

S'ha de remarcar, una vegada més, que els resultats dels assajos en model són únicament resultats empírics que no revelen necessàriament les lleis físiques. Com és ben sabut, és pràctica comuna generalitzar els resultats de la investigació experimental representant gràficament els resultats experimentals, en primer lloc, per després traçar la corba que millor els ajusti. Es considera que la corba representa una equació analítica que relaciona les variables del problema, on les constants vénen determinades per les tècniques habituals de minimització d'alguna funció seleccionada dels errors, o bé, simplement, fent ús d'una mesura de la bondat de l'ajust. L'elecció de l'equació és totalment arbitrària i l'equació no expressa, en molts casos, una llei física general.

35.1 La utilització de models en l'experimentació

El comportament i la resposta de sistemes tecnològics de gran dimensió i complexitat poden ser freqüentment predits, amb un grau de precisió predeterminat, a partir d'experiències realitzades sobre rèpliques del sistema a petita escala, els models, que poden ser construïts ràpidament i econòmicament. No és absolutament necessari que aquests models siguin rèpliques exactes a menor (o major) escala del sistema original, o prototipus.

Un dels avantatges destacats de l'experimentació amb models és que només s'hi han de reproduir aquelles característiques, o trets, del prototipus que són essencials en l'estudi d'aquells aspectes de la resposta del sistema que són objecte d'experimentació. És necessari, malgrat tot, que aquestes característiques del sistema prototipus siguin reproduïdes en el model de manera que, segons les finalitats proposades, aportin una relació única entre el prototipus i el model. Això s'aconsegueix establint entre el prototipus i el model una relació de semblança.

Malgrat tot, els models no sempre es comporten com caldria esperar de l'anàlisi teòrica del sistema. Fins i tot models que són construïts respectant la semblança de totes les característiques del sistema, llevat de la grandària, poden exhibir petites (i ocasionalment no tan petites) diferències de comportament que afectaran en alguna mesura els resultats d'assaig i la seva interpretació; aquestes diferències, anomenades efectes d'escala, requereixen una atenció particular.

- (iv) El tipus d'entrada i de sortida d'energia.
- (v) El temps, la freqüència, etc.
- (vi) El flux de fluid i les seves característiques.

Aquestes característiques són anomenades col·lectivament variables del problema (x_1, x_2, \dots, x_n). Per a cada problema en particular, les variables estan relacionades entre si, dins de cada sistema, per una funció de la forma

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1)$$

Ja que al prototipus i al model s'apliquen les mateixes lleis físiques, ambdós sistemes han de satisfer la mateixa relació funcional. A més, la naturalesa física i, per tant, les dimensions de les respectives variables han de ser idèntiques, prenent relacions constants en ambdós sistemes, la qual cosa implica linealitat en la relació prototipus-model.

En general es fan servir bàsicament dues relacions de semblança. La primera, que imposa estrictament condicions ben definides per a la realització del model, aporta l'anomenat *model completament semblant*. La segona, que es deriva de la primera per la relaxació de certes condicions en el projecte de model, dóna lloc al *model distorsionat*.

35.3 Semblança completa

Siguin x_1, x_2, \dots, x_n les variables significatives d'un fenomen que s'esdevé en el sistema prototipus i que es desitja reproduir a escala mitjançant un model a fi d'analitzar-lo experimentalment amb major detall. Sigui r el rang de la matriu dimensional d'aquelles magnituds en una base donada, N , de magnituds primàries. El nombre de grups adimensionals que poden formar-se amb aquestes magnituds és, $n - r$. Com sigui que el prototipus i el model han d'estar definits per les mateixes variables, i aquestes han de satisfer idèntiques lleis físiques, els grups adimensionals

$$\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-r}$$

han de tenir els mateixos valors en el prototipus i el model. Aquesta és la condició de semblança completa. Si denotem pel subíndex p els grups adimensionals del prototipus, i pel subíndex m els del model, s'ha de verificar:

$$(\Pi_i)_p = (\Pi_i)_m; \quad (i = 1, 2, \dots, n-r) \quad (2)$$

A partir d'aquesta condició, les respostes del prototipus i del model en alguna manifestació particular del fenomen quedaran definides per una relació de la forma

$$\{\Pi_1 = \Phi(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-r})\}_m = \{\Pi_1 = \Phi(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-r})\}_p \quad (3)$$

on A_j representa el *paràmetre d'assaig del model* que conté la variable la magnitud de la qual ha de ser trobada a partir dels assajos en model, mentre que els altres grups A són anomenats *paràmetres de disseny del model*.