Disseny d'un captador solar d'alta temperatura, amb motor Stirling i disc parabòlic

Memòria, Annexes i Pressupost

ETSEIAT – Escola Tècnica Superior d'Enginyeries Industrial i Aeronàutica de Terrassa

UPC – Universitat Politècnica de Catalunya

Titulació:	Enginyeria Industrial
PFC realitzat per:	Jordi Gual Esteve
PFC dirigit per:	Dr. Ramon Carreras
Convocatòria:	2009/2010, Q1

"No podem solucionar problemes fent ús del mateix tipus de pensament que el que varem usar quant els vam crear"

Albert Einstein, 1879 - 1955

Índex

1 - Introducció 6
2 - Objectius i abast 7
3- Antecedents 8
4 - Introducció a l'Energia Solar 9
5 - Instal·lacions Solars d'alta Temperatura 13
6 - Disc Parabòlic 15
7 - Motor Stirling 18
7.1 - Historia del Motor Stirling 18
7.2 - Funcionament del Motor Stirling 19
7.3 - Tipus de Motors Stirling 20
7.4 - Regenerador 21
7.5 - Gas, concentrador i refrigerador 23
7.6 - Cicle Stirling teòric 23
8 - Posició Solar 26
9 - Sistema de Seguiment Solar 28
10 - Estructura del Captador 31
10.1 - Disseny del pilar, la sabata, la placa d'ancoratge i els perns 31
10.2 - Disseny del sistema giratori 32
10.3 - Disseny del sistema d'inclinació 33
10.4 - Disseny de l'estructura del disc parabòlic 34
11 - Reflectors 38
12 - Generador elèctric i connexió a la red elèctrica 41
13 - Producció d'energia elèctrica 46
14 - Anàlisi de Viabilitat 49
14.1 - Subvencions 49
14.2 - Temps de vida 49

14.3 - Amortització 50
14.4 - Projectes en desenvolupament i estimacions de creixement 50
15 - Estudi d'impacte ambiental 53
16 - Conclusions 55
Bibliografia, Webgrafia i Programari 57
Agraïments 59
Annexes 60
Pressupost 140

Memòria

1 - Introducció

El Projecte esta enfocat al desenvolupament de tot el dispositiu de generació d'energia elèctrica, dins el camp d'energies renovables, dissenyant el sistema de seguiment solar, el captador d'energia i l'estructura que aguanta a aquest , fent també un primer disseny del motor Stirling.

Com s'anirà veient al llarg de la memòria i la resta de documents, es busca el disseny mes senzill, barat i eficient, per realitzar cada una de les parts que inclou el captador. Aquestes s'aniran dissenyant peça a peça, definint-ne tots el materials i argumentant l'elecció escollida.

2 - Objectius i abast

Els objectius del projecte entren dins de diversos camps de l'enginyeria, els principals són la mecànica, construcció, termodinàmica, electricitat,... a continuació es mostra la llista d'objectius establerts per a la realització del projecte.

- Realitzar el disseny d'un Captador Solar d'Alta Temperatura amb motor Stirling
- Disseny òptim de la parabòlica
- Dissenyar el sistema de seguiment solar
- Plantejar els dispositius elèctrics necessaris i la seva programació
- Fer un disseny inicial del motor Stirling per a una posterior millora
- Fer un estudi dels possibles emplaçaments on obtindríem un alt rendiment

Com es pot observar a dalt, aquest projecte pretén fer el disseny d'un primer captador solar, un prototip, amb el qual es podrien realitzar les primeres proves de forma empírica, aquestes ens permetrien guanyar experiència i optimitzar el sistema per poder fer-lo del tot rentable al mercat. Aquesta experiència és clau per a la construcció del dispositiu final, ja que a diferencia d'altres sistemes o altres motors, aquest encara te una producció molt baixa i el secretisme de les empreses que ho fan és absolut.

3- Antecedents

Els antecedents existents sobre aquestes instal·lacions són escassos, respon a un mecanisme innovador i en vies de desenvolupament, com veurem més endavant els sistemes implantats d'aquest dispositiu al mon són mínims.

Tot i això hi ha dues empreses que en fabriquen, de les quals, es pot utilitzar part de la informació que proporcionen per contrastar-la amb el nostre disc parabòlic. Tenint en compte però, el secretisme que tenen dites empreses en aquest tema.

4 - Introducció a l'Energia Solar

Actualment el sol juntament amb la lluna i el calor intern de la terra, són les úniques fonts d'energia que és consideren renovables. La lluna en el cas de l'aprofitament de l'energia de les marees, el sol, pel que fa a escala humana, en el cassos de l'energia hidràulica, eòlica, biomassa i insolació i el calor intern en el cas de les geotèrmiques.

El món en el que vivim, cada vegada més, esta dominat per les energies, les quals s'estan convertint en un recurs estratègic importantissim. Aquest no és el principal problema, una població amb gairebé set mil milions d'habitants, en vies de continuar creixent, estan consumint cada vegada més energia, i aquesta no es regenera prou ràpid. Tal i com va dir Rússia, gran exportador energètic (sobretot de gas), l'any 2009, "*S'ha acabat l'època de les Energies barates*".

Això ens ha de fer reflexionar i investigar més en energies renovables, des del punt de vista d'esgotament de recursos fòssils, de l'independència energètica i econòmic, encara que actualment, les centrals renovables entrin al límit dins la rendibilitat o inclús amb subvencions dels estats.

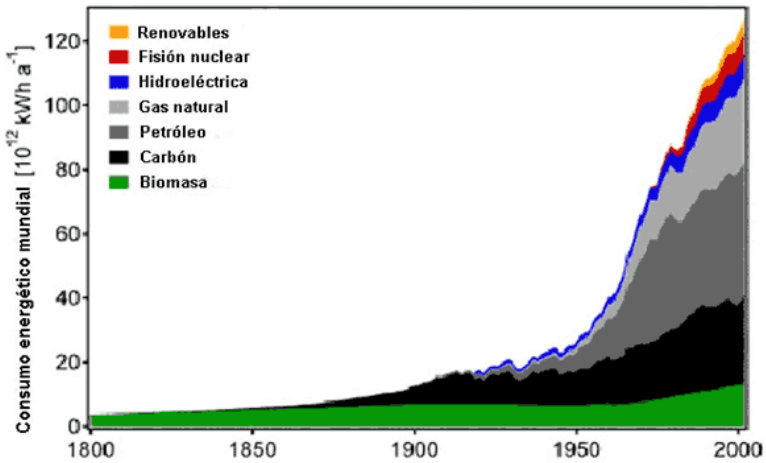


Fig.4.1. Evolució del consum energètic de l'humanitat.

Hi ha molts experts que consideren que l'energia del futur és la fusió nuclear, o inclús les centrals nuclears de quarta generació (amb una eficiència molt elevada, lluny del 4% d'aprofitament d'urani de les actuals), centrals amb contaminacions a l'atmosfera nul·les i generacions d'energia elevadíssimes. D'altra banda podríem dir que són de combustibles gairebé il·limitats, sobretot les de fusió. Però aquets termes encara es

veuen massa lluny, per un tipus es parla del 2050 i l'altre del 2030. Cal tenir en compte que no és la primera vegada que se'n endarrereix la data del descobriment. Això ens porta ha estudiar e implantar les energies renovables conegudes actualment.

Pel que fa a les energies renovables, el camp encara en vies d'expansió, és el de l'energia solar, amb diversos fronts oberts, plaques fotovoltaiques (amb o sense seguiment solar), centrals de concentració d'energia, xemeneies solars, concentradors lineals, concentradors parabòlics, ... el punt de més interès està en les energies d'alta temperatura, o concentradors solars, és on s'estan posant més esforços en les investigacions i el tema d'aquest projecte.

Per estudiar aquest tipus de centrals, abans hem d'aprofundir en l'energia prové del sol, com es produeix, quanta n'arriba, com ho fa, etc. Tot seguit donem resposta a aquestes preguntes:

L'energia solar es produeix a partir de la fusió nuclear, reacció que podem veure a la figura 4.2.

$$[F.4.1] \quad 4\,{}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + 2e^{+}$$

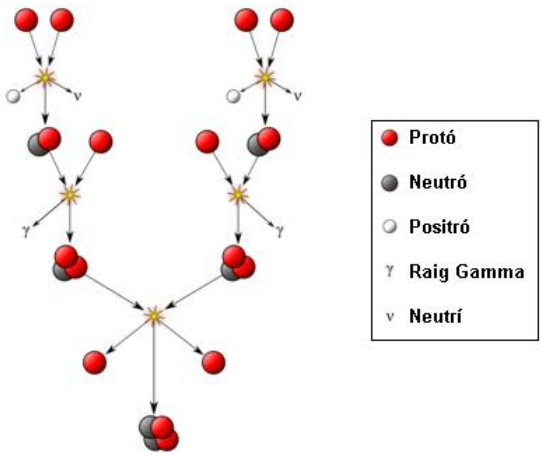


Fig.4.2. Procés de Fusió Nuclear, produïda al Sol

En ella quatre protons es fusionen per formar dos àtoms d'hidrogen, dos positrons i dos neutrins, els àtoms d'hidrogen guanyaran un protó i passaran a ser hidrogen pesat alliberant raig gamma, aquests finalment formaran un àtom d'heli, alliberaran dos protons, en cada una d'aquestes fusions s'ocasiona una pèrdua de massa. Tal i com va formular Einstein aquesta pèrdua de massa es converteix en energia de la següent manera:

$$[F.4.2] \quad \Delta m = -0{,}0287g$$

$$[F.4.3] \quad E = mc^2 = -2{,}579 \cdot 10^{15} J$$

Tal i com hem esmentat, els científics estan investigant com produir a la terra aquesta fusió nuclear de forma controlada, utilitzem el terme controlada perquè la bomba d'hidrogen consisteix en la fusió nuclear, però de manera descontrolada.

Tornant al sol pròpiament dit, veiem que a la terra, a l'exterior de l'atmosfera hi arriba una radiació solar incident de:

$$[F.4.4] \quad I_{cs} = 1366{,}1 \pm 0{,}6 \frac{W}{m^2}$$

Dada calculada a partir d'instruments embarcats en satèl·lits artificials. Les sigles "cs" volen dir *constant solar*, tot i que actualment s'ha demostrat que ja no és una constant, d'aquesta manera l'anomenarem radiació solar incident.

Tot i això la terra no està sempre a la mateixa distancia de sol, per tant l'energia incident no serà sempre la mateixa. La distancia que tenim amb el sol és 1 UA (Unitat astronòmica, o distància mitja de la terra al sol), però aquesta te un mínim en 1,0172 UA (4 Juliol) i un màxim en 0,9832 UA (3 Gener). Aquesta dada ens fa variar la radiació solar incident de la següent manera:

$$[F.4.5] \quad I_{min} = 1366{,}1 \cdot \frac{1}{1{,}0172} = 1343 \frac{W}{m^2}$$

$$[F.4.6] \quad I_{max} = 1366{,}1 \cdot \frac{1}{0{,}9832} = 1389{,}44 \frac{W}{m^2}$$

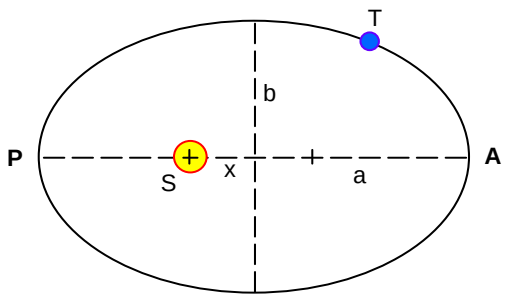


Fig.4.3. Posició de la terra respecte al sol en tota la seva orbita

Però no tota aquesta energia que ens arriba es aprofitable a nivell del mar, ja que pel camí atmosfera-mar part d'aquesta es perd, un 26% és reflectida per l'atmosfera, un

19% absorbida per aquesta i els núvols, només el 55% arriba a la superfície terrestre. Per tant ens quedem amb una radiació de 764,96 W/m^2. Evidentment aquesta dada es una mitjana mundial, així doncs pot distar molt de països propers al equador a països més propers als pols.

Aquesta radiació no sempre és la mateixa, ja que està composta per radiació directa i difusa, aquesta última és la radiació que absorbeixen els núvols tot i que és projectada cap a terra. Aquesta depèn del índex de claredat. La radiació difusa ja es coneixia l'any 1942 quan es va formular el model de Hottel i Woertz. El model més actual per poder mesurar la radiació directe i difusa fou plantejat el 1990, i sigué anomenat "Model HDKR".

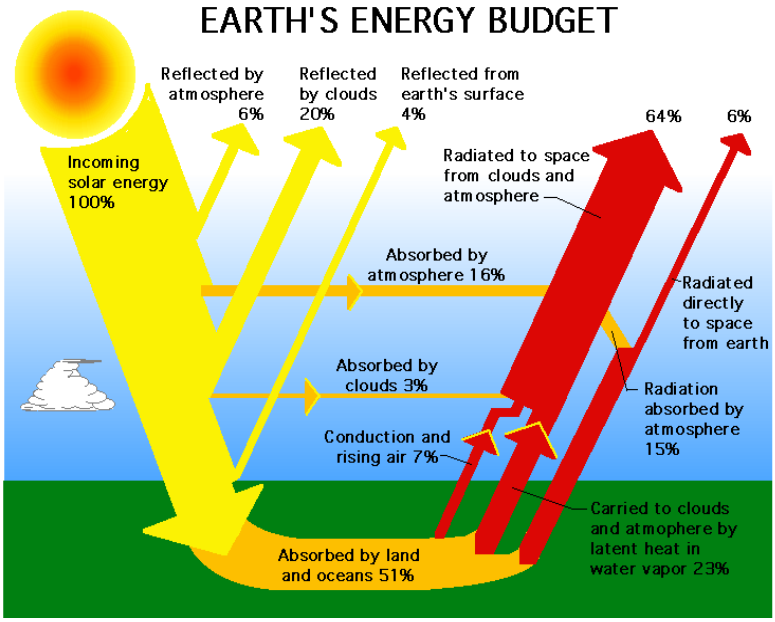


Fig.4.4. Balanç d'energia Solar

Tal i com podem observar, la mitjana mundial de 764,96 W/m^2, arribats a nivell de mar, podem tenir grans diferències en dies nuvolats. Aquesta dada s'ha de tenir molt present en el disseny del sistema de seguiment solar, ja que aquest podria arribar a consumir energia en comptes de generar-la.

5 - Instal·lacions Solars d'alta Temperatura

En les instal·lacions solars d'alta temperatura prenen gran importància els concentradors d'energia solar, en aquest, tal i com el seu nom indica, concentren l'energia d'una determinada superfície a una altre de tamany molt menor. Així doncs aconseguim gran potència en un espai reduït. Hi ha diversos tipus de concentradors que s'estan desenvolupant en l'actualitat, els lineals, les torres i els stirling. El projecte parla exclusivament dels Stirling, ja que són els que estan agafant mes força.

Img.5.1. Tipus de Concentradors Solars. Lineal, Torre i Stirling (A, B i C respectivament)

Per tal de concentrar l'energia solar, aquest sistema fa servir una paràbola formada per miralls d'alta reflexió. És un element important la distribució d'aquests miralls per tal d'obtenir un bon rendiment, tan energètic com mecànic.

Fent una primera ullada a alguns tipus de superfícies de captació que podem utilitzar, ens trobem amb tres casos, imatge 5.2, observant-les, descartem en primer lloc la imatge C, formada per cercles, aquesta te molta superfície desaprofitada i perd molta eficiència tenint en compte l'espai que ocupa.

Img.5.2. Tipus de Concentradors Solars Stirling (A, B i C respectivament)

Centrem-nos en els dos altres tipus, A i B, el tipus B sembla el més eficient de tots, ja que tot l'espai està destinat a la captació d'energia, a part és completament circular el

que fa millorar l'aprofitament de superfície. Tot i això en un primer moment es plantegen dos problemes respecte al sistema A.

El primer problema és econòmic, el cost de crear uns miralls d'aquestes dimensions i precisió, tot i que està seccionat, és molt alt, a part de la seva difícil manipulació i muntatge, problema que el tipus A no tindria, ja que els miralls són de menor dimensió, per tant amb un cost inferior i de més fàcil manipulació.

Pel que fa a la segon dificultat, aquesta ve donada pel vent, el segon tipus de captador a part del centre no te cap escapatòria pel vent, el qual ens obliga a fer una estructura més reforçada, en canvi l'altre en detriment de l'àrea de captació incorpora unes ranures que permeten l'escapatòria del vent.

Img.5.3. Detall dels miralls i les seves ranures

No ha de ser blanc o negre, es podria dissenyar un sistema entremig de A i B, ja que cadascun te els seus avantatges i inconvenients. Aquest tema es tractarà mes endavant, en els temes de reflectors, o miralls i en el tema estructural.

El que queda clar en aquest punt, es que els dos sistemes imiten una superfície parabòlica, el següent apartat se centra en definir les característiques d'una paràbola.

6 - Disc Parabòlic

El punt de més interès i pel qual es fa servir una paràbola i no una superfície plana és l'anomena't focus, en aquest punt es reuneixen totes les rectes, en el nostre cas rajos solars, que entren a la paràbola perpendiculars, a la recta tangent al vèrtex. Per tant aquesta propietat ens permet concentrar l'energia en un sol punt.

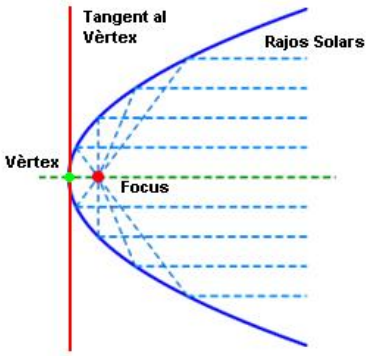


Fig.6.1. Focus d'una Paràbola

Per determinar l'obertura de la paràbola farem ús de les següents formules, les quals manipularem per adaptar-les al nostre cas.

$$[F.6.1]\ \ y = ax^2 + bx + c$$

La formula 6.1 és la equació elemental per a totes les paràboles, el coeficient *a* ens marca l'obertura, quan més baix és el valor més oberta està, els coeficients *b* i *c* són coeficients de posicionament dintre de l'eix de coordenades (x,y), per tant els podem despreciar y partir del punt (0,0) per a fer els càlculs.

$$[F.6.2]\ \ y = ax^2$$

El focus que es trobarà en l'eix de coordenades en el punt (F, 0), es calcula de la següent manera:

$$[F.6.3]\ \ F = \frac{1}{4a}$$

Tot i això, el captador d'energia no és un punt, te una superfície, per tant, el focus no ens serveix de punt per fixar-lo, s'ha de determinar a la distancia del focus "d_f" que ha d'estar el captador de diàmetre "D_c", per tal de que aquest rebi tots els rajos reflectits

en la paràbola, tal i com mostra la imatge 6.2. La fórmula per poder calcular "*df*" és la següent i queda demostrada en l'annex 1.

$$[F.6.3]\ \ d_f = \left(\frac{1}{4a} - h\right) \cdot \frac{D_c}{D_p}$$

On:

Dp és el diàmetre de la paràbola

h és l'altura de la paràbola

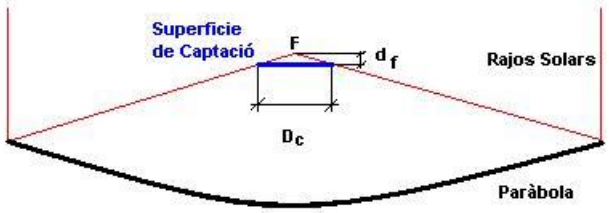


Fig.6.2. Posicionament del captador

També s'ha de tenir en compte, que el sol està en moviment en tot moment, per tan cal determinar que, per una desviació de l'angle dels rajos solars respecte la recta perpendicular a la tangent de la paràbola en el vèrtex, quina proporció de superfície de captació es desaprofita?. Ja que el nostre focus ha variat.

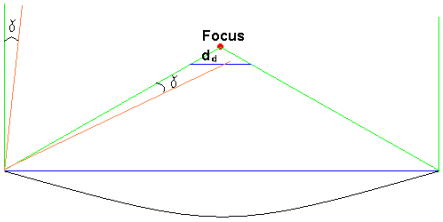


Fig.6.3. Desviament del raig solar

L'espai que s'ha mogut el determinem amb la següent formula, demostrada també en l'annex 1.

$$[F.6.4]\quad dd = \frac{D_p}{2} - \frac{D_c}{2} - \left(F - \left(F - \frac{1}{4F}\cdot\frac{Dp^2}{4}\right)\cdot\frac{D_c}{D_p}\right) \cdot tg\left(90 - tg^{-1}\left(\frac{F - \left(F - \frac{1}{4F}\cdot\frac{Dp^2}{4}\right)\cdot\frac{D_c}{D_p}}{D_p/2 - D_c/2}\right) - \gamma\right)$$

On:

γ es l'angle que s'ha mogut el sol

D_p *es el Diametre de la Parabola*

Veiem doncs, que el rendiment de la superfície de captació, quan el sol s'ha mogut un cert angle, el trobarem aplicant:

$$[F.6.5]\quad \eta_{sc} = \frac{A_{Concordança}}{A_C}\cdot 100$$

Per petites variacions podem fer l'aproximació que el reflex del sol, no alineat amb la paràbola, descriu un cercle i no una el·lipse, tenim que el rendiment el triem de la concordança de l'àrea projectada pel sol, un cop s'ha mogut, i l'àrea del captador.

Aquest concepte agafa sentit degut a que el sistema de seguiment del sol, no pot funcionar cada instant de temps, seria massa car, i per tant, ha de moure el captador cada cert temps.

En un apartat posterior es determina cada quans graus de desviament del sol s'ha de moure el nostre sistema, per tal de tenir unes pèrdues mínimes per una mala alineació amb el sol.

7 - Motor Stirling

7.1 - Historia del Motor Stirling

El motor Stirling fou patentat l'any 1816, per Robert Stirling, escocès nascut el 1790. El motor des de la seva creació va passar per tot una època de desús, només tenia un interès teòric. Va ser a partir de la dècada del 1950 quan es va voler potenciar el seu ús, aquesta idea prové dels seus múltiples avantatges, com la baixa emissió, el funcionament silenciós, la fiabilitat, el baix manteniment i la llarga vida, a part, també es pot fer servir per refredar invertint-ne el seu cicle, fins arribar a temperatures inferiors als -200ºC. No tot es positiu però, s'ha de tenir en compte que treballa a alta pressió i a temperatures elevades, el pistó es difícil de lubricar, això pot ocasionar problemes d'obstrucció.

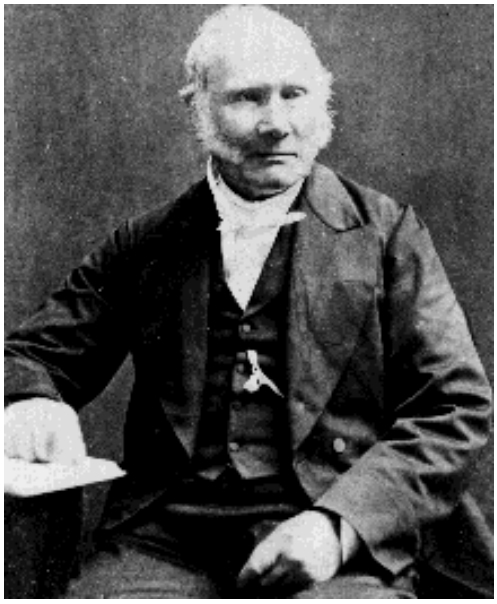


Fig.7.1. Dr. Robert Stirling, (1790-1878)

El motor Stirling és un motor de combustió externa, en el qual el fluid de treball segueix un cicle tancat, per tant ens permet seleccionar un fluid òptim termodinamicament, ja que les pèrdues pràcticament són nul·les.

7.2 - Funcionament del Motor Stirling

El rendiment del motor correspon al de Carnot, tal i com podem observar en la formula 7.1, aquest és més gran quan més gradient de temperatures tenim, possem com exemple un gradient de 800ºC respecte a temperatura ambient, tindríem un rendiment màxim del 73%.

$$[F.7.1]\ \eta = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Veiem doncs que necessitem un alt gradient de temperatures, aquest és el motiu pel qual hem de disposar d'un concentrador d'energia, ja que l'energia solar te una potència baixa.

El motor Stirling bàsic està format per dues cambres d'aire comunicades entre si, on hi circula aire o gas. Una de les cavitats, la més gran, és el focus calent, i l'altre el fred.

Per explicar el cicle utilitzarem un motor Stirling Cinemàtic (figura 7.2), compost per dos pistons i un cigonyal. Aquest consta de quatre cicles, en el primer punt el pistó blau està en la seva part més alta i el vermell a la meitat, l'expansió comença a una temperatura constant, arribem al punt 2, gràcies al desviament del cigonyal de 90º el pistó calent es troba en el seu punt més baix, però el fred no, això provoca que quan comença a pujar el pistó calent el fred encara baixi i el gas passi de la cambra calenta a la freda, on en ella, es va produint el procés de refrigeració fins arribar al seu punt més baix. Un cop hem arribat al punt 3 el gas es troba fred, per aquest motiu el seu volum disminueix i això fa anar els pistons amunt contraient les dues cambres i arribant al punt 4, per passar del punt 4 al punt 1 es en el moment que entra en joc el calor solar, aquest escalfa l'aire que hi ha en la cambra calenta i fa anar el pistó calent avall, el blau que encara no havia acabat de donar la volta, va fins d'alt de tot i fa que el volum sigui constant. El calor del sol fa agafar l'inèrcia per passar del punt 1 al 2. Desprès ja es cosa de la refrigeració que fa agafar inèrcia per a la posterior contracció.

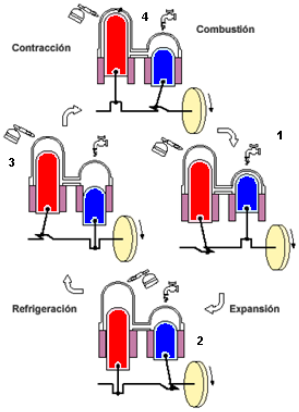


Fig.7.2. Cicle Stirling

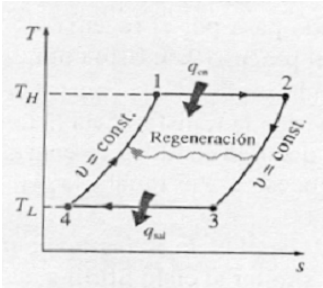


Fig.7.3. Stirling, Gràfic T/s

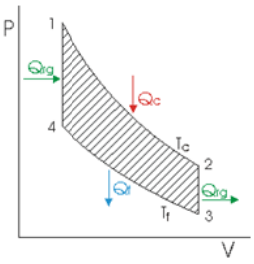


Fig.7.4. Stirling, Gràfic P/V

7.3 - Tipus de Motors Stirling

Quan parlem de motor Stirling, ens referim a qualsevol dels dos principals tipus que hi ha, el cinemàtic i el de pistó lliure.

Tal i com podem observar, la imatge inferior esquerra correspon al pistó lliure, com el seu nom indica, no està agafat a cap eix, el que fa difícil extrauren el treball, i la imatge de la dreta, ens mostra el motor cinemàtic, agafat a un cigonyal per mitjà de dues bieles.

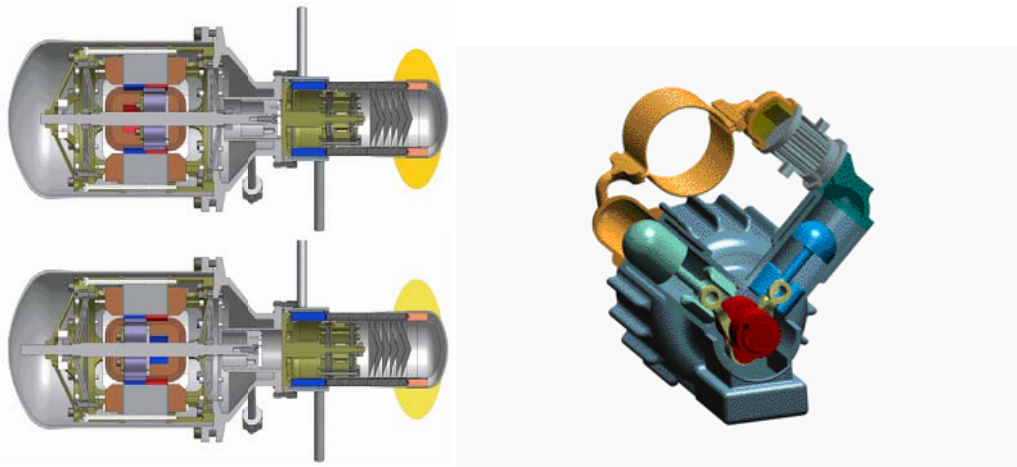


Fig.7.5 Tipus de Motor Stirling, de pistó lliure i cinemàtic, respectivament

Per un perfecte funcionament del cicle Stirling, necessitem que el moviment dels pistons sigui tal i com es mostra en la figura 7.6, amb les etapes ben diferenciades, aquest moviment el podem assolir amb els pistons lliures, com a mínim una bona aproximació,

en canvi, el sistema cinemàtic no pot tenir aquesta forma, per tant es busca un moviment sinusoïdal similar, tal i com es mostra en la figura 7.7, l'aconseguint-lo amb un desfàs en el cigonyal de 90º.

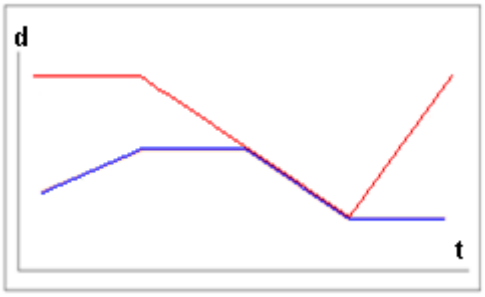


Fig. 7.6 Moviment ideal els pistons

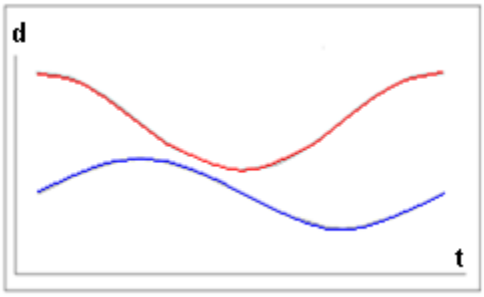


Fig. 7.7 Moviment cinemàtic dels pistons

Una altre diferència és com extreure l'energia dels pistons, en el mètode cinemàtic, tenim els dos pistons connectats al cigonyal, i aquest a un alternador, tot i això l'altre sistema és més complex, el pistó lliure que funciona sospès per dues membranes, i de retorn amb molles o amb gas, no te cap eix sortint per poder extreure'n moviment lineal, per tant el que es fa es col·locar imans i generar corrent elèctric amb bobines.

Una avantatge del pistó lliure respecte el cinemàtic és la seva estanquitat, més fàcil de realitzar, en el cinemàtic però es realitza un pressuritzat per evitar el problema.

Si observem els dos sistemes, notem una complicitat del sistema més gran en el de pistó lliure, d'aquesta manera encara que el pistó cinemàtic no segueixi 100% el cicle ideal Stirling, en concepte de costos de fabricació, tindrà un cost mes reduït degut a la seva senzillesa, ja que les peces que els diferencien són notablement favorables al cinemàtic, a part d'una eficiència força similar. D'aquesta forma el disseny de motor que durem a terme es el de motor Stirling Cinemàtic, fixant-nos amb aquests punts i amb els antecedents que hi ha en el mercat.

7.4 - Regenerador

Una de les parts més importants dins el motor stirling és el regenerador, podríem dir que és la peça clau dins d'aquest motor, ens permet passar del punt 4 al 1 (Fig. 7.3) sense necessitar energia exterior, que faria baixar molt el rendiment del cicle, per fer-ho agafem el calor que anteriorment hem emmagatzemat en el punt 1-2 (Fig. 7.3).

Per explicar-ho amb més claredat direm que el regenerador es troba enmig dels dos pistons, en el tub que els comunica, per tant actuarà en les transferències de gas d'un pistó a l'altre. En el punt 2-3 (Fig. 7.3) que és quan es produeix la refrigeració passa gas del focus calent al focus fred, com és evident aquest gas estarà calent, de tal forma que emmagatzemarem l'energia en el regenerador, i ajudarem de pas a refredar-lo, què és la nostra idea en aquest punt. A partir d'aquí passarem al punt 4-1 (Fig. 7.3) que és la combustió o l'escalfament, en ell el gas fa a l'inrevés, del focus fred al calent, en aquest pas agafar el calor emmagatzemat anteriorment per escalfar-se i d'aquesta manera no necessitar una aportació externa.

Tot i això veiem un problema, el regenerador no té una eficiència del 100%, es a dir que tota l'energia que absorbeix no la cedirà posteriorment, aquest és un dels problemes pel qual el motor no arribarà al rendiment teòric de Carnot.

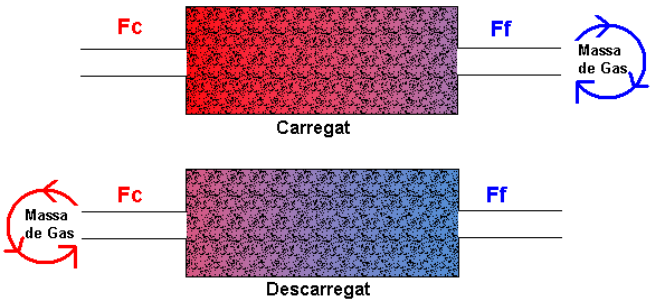


Fig.7.8. Regenerador, gradient tèrmic

Entrant dins el regenerador tenim establert en ell un gradient de temperatures, el costat corresponent al focus calent el tenim a temperatura elevada i en el focus fred a baixa temperatura, a part, dins, tenim un material porós per on circularà gas i hi cedirà l'energia, aquest es pot comparar amb l'acumulador de calor amb pedres d'una placa solar tèrmica. Per entendre millor aquest punt observarem la figura 7.8, on queda representat el regenerador en els seus dos punts. Observem com en el moment que entra el gas calent (Descarregat), a mesura que avança, va trobant la temperatura cada vegada mes baixa, de forma que va cedint calor fins arribar a la temperatura de sortida del regenerador, direm en aquest punt que el regenerador està carregat, ja que hi hem cedit calor. En el procés invers passa el mateix, el gas fred comença a passar pel costat mes fred i va agafant calor (Carregat), emportant-se la que havíem cedit abans, fins arribar al final amb la màxima temperatura que teníem dins el regenerador. Direm doncs que aquest torna a estar descarregat.

Tal i com podem veure en la figura 7.8, el moment carregat, corresponent a quan l'aire calent ja a passat a la cambra freda i quan l'aire fred està a punt de sortir de la cambra freda, a l'inrevés passa quan està descarregat.

7.5 - Gas, concentrador i refrigerador

Aquest motor sol treballar amb tres gasos, hidrogen, heli i aire. L'aire com a gas més barat, gratuït podríem dir, te l'inconvenient de la baixa conductivitat tèrmica, per tant per a un motor superior a 1 KW, queda totalment descartat.

Pel que fa a l'heli i l'hidrogen, les característiques tèrmiques, i econòmiques, són molt més favorables a l'hidrogen, però te un gran problema, en atmosferes on la pressió és elevada aquest pot arribar a explosionar si hi ha un escapament i entra en contacte amb l'oxigen, per tant en quant a seguretat, terme que sempre ha d'estar al davant, l'element usat serà l'heli.

Altres elements de gran importància en el motor Stirling, són el concentrador solar o escalfador i el refrigerador, aquests són composats per diversos tubs per tal de tenir l'àrea suficient per realitzar la transferència de calor, seran dimensionats en l'annex 7.

7.6 - Cicle Stirling teòric

En primer lloc definim les variables.

Massa del gas	m (kg)
Densitat del gas en CN	δ (kg/m^3)
Calor específic a volum constant	C_v (kJ/kg·K)
Constant dels gasos ideals	R (kJ/Kg·K)
Temperatura Màxima	T_{max} (K)
Temperatura Mínima	T_{min} (K)
Volum màxim	V_{max} (m^3)
Volum mínim	V_{min} (m^3)

Relació de Compressió	r (V_{max}/V_{min}, adimensional)
Rendiment del Regenerador	e (adimensional)
Quantitat de calor	Q_i (kJ)
Quantitat de Treball	W_i (kJ)

Expansió isotèrmica, el treball efectuat igual al calor aportat es:

$$[F.7.2]\quad Q_e = W_e = m \cdot R \cdot T_{max} \cdot \ln r$$

En el refredament a volum constant, el calor extret del gas, o absorbit pel regenerador val:

$$[F.7.3]\quad Q_{r1} = -m \cdot C_v \cdot \Delta T$$

Compressió isotèrmica, el treball requerit és igual al calor extret:

$$[F.7.4]\quad Q_c = W_c = -m \cdot R \cdot T_{min} \cdot \ln r$$

En l'escalfament a volum constant el calor disponible és:

$$[F.7.5]\quad Q_{r2} = Q_{r1} \cdot e$$

La diferencia entre el calor disponible i el requerit per tornar a T_{max} és:

$$[F.7.6]\quad \Delta Q_r = Q_{r2} - Q_{r1} = Q_{r1} \cdot e - Q_{r1} = (e-1) \cdot Q_{r1} = (1-e) \cdot m \cdot C_v \cdot \Delta T$$

Aquest haurà de ser aportat per la font abans de l'expansió, per tal de tornar a les condicions inicials.

El calor útil, o treball útil, serà la resta entre la formula (7.2) i la (7.4):

$$[F.7.7]\quad Q_u = W_u = m \cdot R \cdot \Delta T \cdot \ln r$$

El calor total ha aportar en el sistema, serà la suma de les formules (7.2) i (7.6):

$$[F.7.8]\quad Q_a = W_a = m \cdot R \cdot T_{max} \cdot \ln r + (1-e) \cdot m \cdot C_v \cdot \Delta T$$

Per tant veiem que el rendiment màxim del motor serà:

$$[F.7.9]\quad \eta = \frac{Q_u}{Q_a} = \frac{m \cdot R \cdot \Delta T \cdot \ln r}{m \cdot R \cdot T_{max} \cdot \ln r + (1-e) \cdot m \cdot C_v \cdot \Delta T} = \frac{R \cdot \Delta T \cdot \ln r}{R \cdot T_{max} \cdot \ln r + (1-e) \cdot C_v \cdot \Delta T}$$

Fixem-nos que per e =1, el que vol dir que tindríem un regenerador ideal, el rendiment que obtenim es el de Carnot, a part, aquí també s'hi hauran d'afegir altres pèrdues explicades posteriorment, com limitacions mecàniques o elèctriques.

Altres consideracions les tenim en fer el càlcul de Pressió del gas i de la força dels pistons, segons la fisonomia del nostre motor.

Partirem d'un Volum màxim i d'un mínim depenent del nostre motor, per tant el pes del gas vindrà donat per la formula dels gasos ideals:

$$[F.7.10]\ \ P \cdot V = m \cdot R \cdot T \rightarrow m = \frac{P_{min} \cdot V_{max}}{R \cdot T_{min}}$$

On m es una constant

Per tal d'obtenir les pressions aplicarem el següent:

$$[F.7.11]\ \ P_{max} = \frac{m \cdot R \cdot T_{max}}{V_{min}}$$

$$[F.7.12]\ \ P_{min} = \frac{m \cdot R \cdot T_{min}}{V_{max}}$$

El muntatge del motor, quan s'injecta el gas, es realitza amb els pistons situats en la posició que permet un volum màxim. De tal manera que és pot determinar la Pressió mínima.

La força amb la que baixa el pistó calent està relacionada amb la màxima pressió:

$$[F.7.13]\ \ F_{pc} = S_{pc} \cdot (P_{max} - P_{amb})$$

La força amb la que puja el pistó fred està relacionada amb la mínima pressió:

$$[F.7.14]\ \ F_{pf} = S_{pf} \cdot (P_{amb} - P_{min})$$

8 - Posició Solar

En un concentrador solar es basic que la paràbola estigui orientada al sol en tot moment, pels motius explicats anteriorment. Això ens fa analitzar la forma de calcular la posició del sol, en una certa latitud i longitud, en un moment determinat. Per fer els càlculs començarem determinant la interacció Sol-Terra.

La terra gira al voltant del sol de forma el·líptica, tot i que pràcticament circular, però l'eix de rotació de la terra o eix polar, te certa inclinació sobre el pla de la el·lipse, dita inclinació es de 23,45º. Aquest fenomen fa que l'angle que formen el pla del equador i el pla de l'el·lipse no sigui constant durant l'any, aquest angle s'anomena "declinació solar" i es representa (δ).

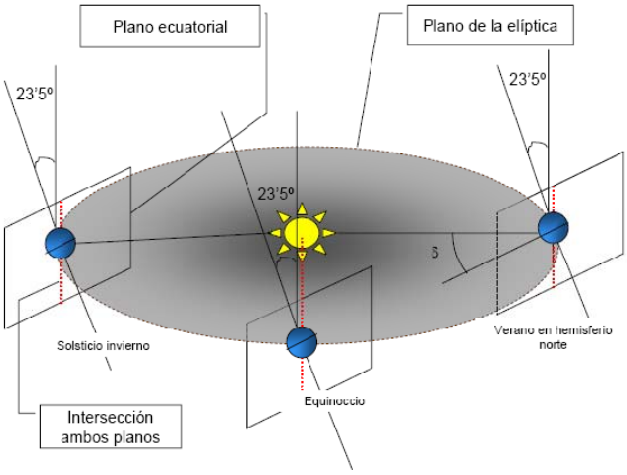


Fig.8.1. Declinació solar

La declinació solar te el seu màxim en 23,5º (Solstici d'estiu) i el mínim en -23,5º (Solstici d'hivern). La expressió de la qual disposem per poder determinar aquest angle en qualsevol dia de l'any es mostrarà en l'annex 4.

Fent ús de les formules, les variacions d'angle (declinació solar) que tenim en un dia són de l'ordre de 0,128º, tal i com es demostrarà més endavant no és un angle tan petit com per no tenir-lo en compte.

El següent a tenir en consideració es la posició del sol segons un observador terrestre, la posició la podem determinar a partir de dues coordenades, la primera l'extraurem de la posició del observador a la terra i la segona del moviment del planeta.

En primer lloc per determinar la posició d'un observador a la terra es fa servir la seva vertical, anomenada "zenit" i la seva direcció oposada "nadir", la distancia angular que va des del zenit fins al pla del equador, s'anomena latitud (Φ) sent positiu cap el pol nord i negatiu cap al pol sud.

Explicat això l'angle a definir es l'angle zenital (θ_z), aquest angle el forma la recta que uneix l'observador amb el sol i el zenit d'aquest. A sortida i posta del sol aquest angle es de 90º. El complementari d'aquest angle s'anomena angle d'elevació solar (γ_s) i es el que realment ens interessa.

Pel que fa a la segona coordenada que hem de definir, aquesta ve determinada per la projecció de la trajectòria solar en el pla horitzontal de l'observador, tenint inici en el punt de sortida del sol i final en el punt on es pont. Aquest s'anomena azimut (Ψ).

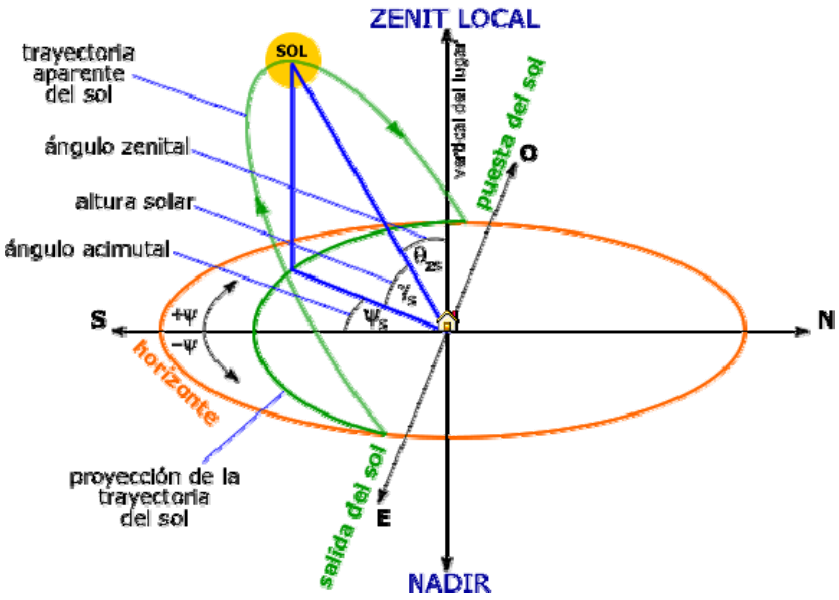


Fig.8.2 Posició solar respecte d'un observador terrestre

Per ajustar-nos mes a la realitat també s'introdueix el concepte de "angle solar" (ω), el qual es 0 al migdia, negatiu al matí i positiu a la tarda, aquest te relació amb el temps oficial del lloc on tindrem la nostra instal·lació.

Resumint, tenim que per determinar la posició del sol, vista per un observador terrestre, necessitem saber l'altura solar, i l'angle azimutal, en l'annex 4 es mostren totes les formules, ja desenvolupades, sobre la posició solar.

9 - Sistema de Seguiment Solar

El sistema de seguiment solar ens permet tenir el dispositiu ben orientat en tot moment, variant el seu funcionament segons el dia de l'any.

Quan parlem d'aquests sistemes observem dues possibilitats:

- Seguiment dissenyat a partir de tres sensors, podrien ser petites plaques fotovoltaiques o sensors d'intensitat llumínica, situades de forma equidistant en els extrems de la parabòlica. Quan aquesta està ben orientada els sensors donen la mateixa captació solar, però quan no ho està, les dades de captació són diferents, i la parabòlica va a buscar lo posició correcte tenint en compte les dades dels sensors i el triangle que formen entre ells.

- El segon sistema, més evolucionat, consisteix en la formulació de la posició solar introduïda dins un microcontrolador, per tant la parabòlica es va orientant al sol a mida que passa el temps. L'anomenarem sistema de "Formulació".

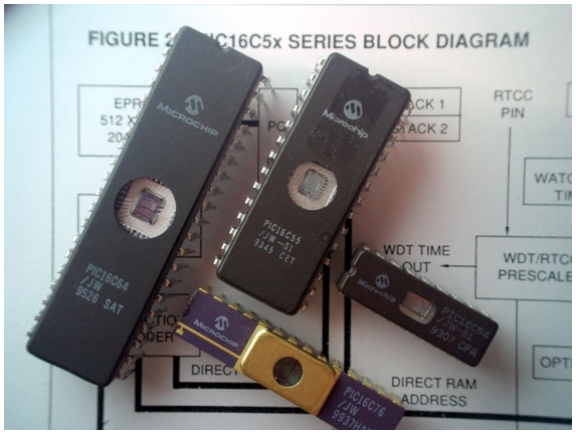
El Sistema de sensors té un gran problema, tal i com ha quedat demostrat en varies proves, inclòs en sistemes ja implantats, quan algun dels tres sensors queda a l'ombra, per exemple tapat per un núvol, el sistema gira bruscament buscant l'equilibri dels sensors, normalment no l'aconsegueix trobar, i el sistema s'atura, fins que al dia següent torna a la posició original. Això és útil en el cas que el cel es tapés completament, ja que el sistema deixa de gastar energia seguint el sol indefinidament, aquest sistema però és poc eficient quan hi ha una mínima ombra.

Img.9.1 Parc Solar amb diversos captadors desorientats

En canvi en el sistema de formulació, d'igual forma que el sistema de sensors, podem parar-lo automàticament, ho farem a partir de la generació d'energia, si aquesta cau de forma important durant un llarg període de temps, podem indicar al microcontrolador que deixi de seguir el sol. Tot i això es podria ordenar al controlador que al cap d'una estona torni a mirar quina captació d'energia tenim, per poder continuar amb la generació d'energia si aquesta es correcte, i aprofitar de forma eficient les hores de sol.

Un cop plantejats els dos sistemes possibles, farem ús del sistema amb microcontrolador o micro, de més eficiència i menys cost.

El micro utilitzat en el sistema es de tipus PIC (Peripheral Interface Controller, o be, controlador d'interfície perifèric), a l'imatge següent veiem una família de controladors dissenyats per l'empresa *"Microchip Technology Inc.".*



Img.9.2 Tipus de Controladors PIC

Dins el micro, s'incorporen les equacions citades en l'apartat 8 i en l'annex 4.1, sobre la posició solar vista des d'un observador terrestre. La programació en C del sistema ens la proporciona la NREL (National Renewable Energy Laboratory), en el programa anomenat "SOLPOS 2.0". Aquest programa té un funcionament vàlid fins al 2050, amb lo qual s'hauria de fer una revisió o una nova versió d'aquest.

El sistema està compost d'un teclat amb quatre polsadors, una pantalla LCD de 2x16, un microcontrolador PIC18f2550 i un rellotge DS1307, que envia la informació de l'hora al PIC, i aquest la transforma en graus solars a traves de les fórmules.

La pantalla LCD ens mostra el menú del sistema, el qual només s'ha de fer servir en el moment de la instal·lació del sistema i per fer comprovacions d'aquest tipus.

Una dada no introduïda en el menú és la del temps d'actualització, aquesta fa referència al moment de donar les ordres als motors perquè es moguin, aquesta dada de gran importància esta introduïda dins el PIC, en l'annex 4.3 es calcula aquest temps.

Un cop hem exposat tot el sistema cal determinar el motor necessari, pel que fa referència al sistema cal un motor que no tingui un moviment continu, i que el seu consum al engegar i parar sigui mínim. Aquest s'anomena motor "pas a pas", cada impuls elèctric que se li dona gira un cert angle, per tant podem controlar amb molta exactitud el posicionament de la parabòlica.

Img.9.3 Motors pas a pas

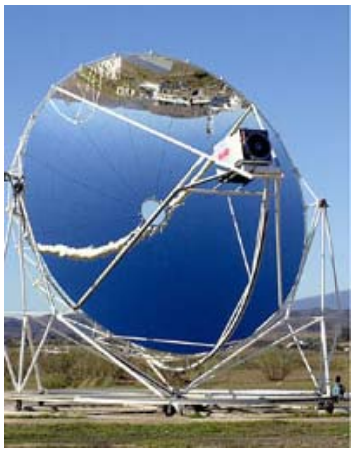
Aquests però, tenen poc par-motor, tant mateix s'hi ha d'acoblar una caixa de canvis. En l'annex 4.4 es calcula el par-motor necessari pel nostre sistema i s'escull el model adient.

Com a resum, una vegada s'ha analitzat tot el que fa falta per posicionar la paràbola, direm que aquest sistema ens ha de proporcionar el següent:

- Hora i dia de l'any ens que ens trobem, de forma autònoma
- Formulació necessària per posicionar la paràbola
- Enviament d'informació als motors, per separat, quan s'han de moure i en quina mesura
- Posicionament del captador en l'engegada
- Regulació d'inexactituds acumulades dels motors

10 - Estructura del Captador

L'estructura que sosté el motor i la paràbola ha de ser una estructura sòlida, simple, econòmica i si és possible amb una bona presència, d'altra banda ha de garantir un bon moviment de la paràbola en el seu seguiment solar.



Img.10.1 Tipus de paràboles

Fixem-nos en els disc plantejats anteriorment, el sistema més pràctic d'implantar, pel que fa als eventuals problemes del terreny, el seu baix manteniment i la seva senzillesa de disseny, seria el d'un pilar amb perfil tubular, ancorat a una sabata i en l'altre extrem implementats els dispositius de rotació i sustentació de la paràbola i del motor.

10.1 - Disseny del pilar, la sabata, la placa d'ancoratge i els perns

El pilar, es calcula perquè sigui capaç d'aguantar el captador per a les següents hipòtesis:

- Pes propi (Paràbola, motor i estructura adicional), tenint en compte que es un dispositiu en moviment i pot generar diferents moments.
- Vent (segons el lloc d'implantació)
- Neu (segons el lloc d'implantació)

Segons aquestes hipòtesis s'ha dimensionat el pilar i la seva sabata corresponent.

Els càlculs del pilar, la sabata, la placa d'ancoratge i els perns s'han fet segons el CTE i les normes EHE.

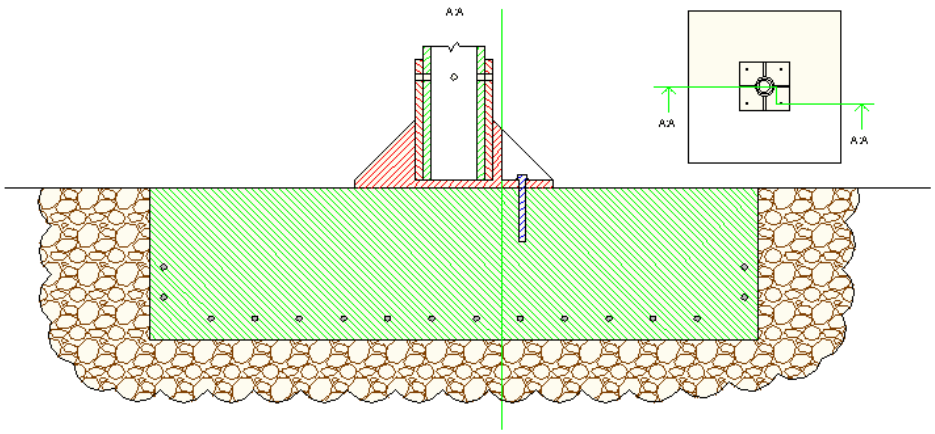
Tenint en compte aquesta normativa, hem dissenyat un pilar amb un perfil circular de 203 mm de diàmetre i una paret de 25,4 mm.

Una sabata de 2x2x0,5 m, amb un entramat d'acer de rodons corrugats de diàmetre 20 mm, tenen la funció de suportar les forces de tracció, ja que el formigó només suporta les de compressió.

La placa d'ancoratge, és quadrada, amb els costats de 650 mm, a aquesta, fora dels càlculs, se li han afegit escaires per reforçar-la encara més. De la placa en surt un tub on hi va encastat el pilar i subjectat per cargols.

Per últim tenim uns perns corrugats per unir la placa i els fonaments de 20 mm de diàmetre i 200 mm de llarg.

A continuació observem el muntatge de tot el sistema d'enclavament a terra.



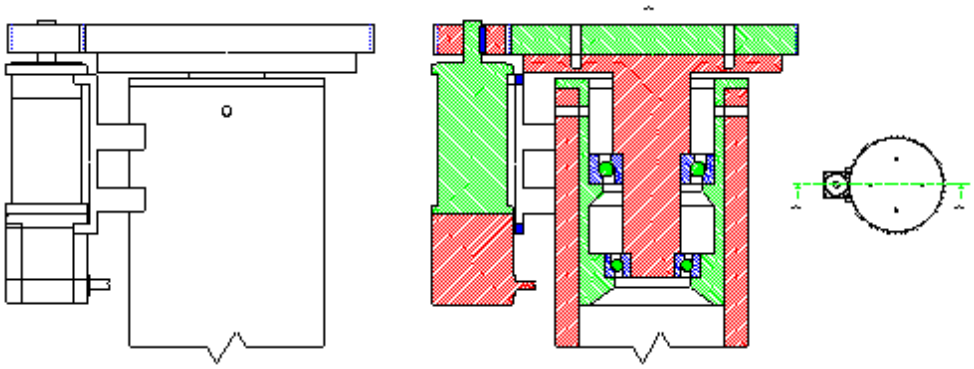
Img.10.2. Secció del pilar, la sabata, la placa d'ancoratge i els perns

10.2 - Disseny del sistema giratori

En la part superior del pilar hi tenim muntat el sistema giratori i el sistema d'inclinació. Per dissenyar les peces necessàries ja no ens fixem amb el codi tècnic. Pels càlculs s'ha fet servir l'Ansys, programa que ens permet carregar la peça en 3D, aplicar-hi les condicions de contorn i les forces, moments, pressions, etc, a la que està sotmesa la peça.

Tot i això, encara que no haguem aplicat el codi tècnic, si s'ha tingut en compte els coeficients de majoració de càrregues i els coeficients de minoració dels materials. Per tal de complir uns marges de seguretat.

El sistema que fa girar la paràbola en el pla consta de dos rodaments que aguanten les forces verticals de tot el dispositiu, inclosos la neu i les laterals provocades pel vent, a part de deixar girar l'eix, que ho aconseguim amb dos rodaments de boles de contacte angular, la vida d'aquests rodaments serà prolongada, ja que el gir que tenen es molt baix i estan pensats per funcionar a grans revolucions.



Img.10.3. Vista i secció del sistema giratori

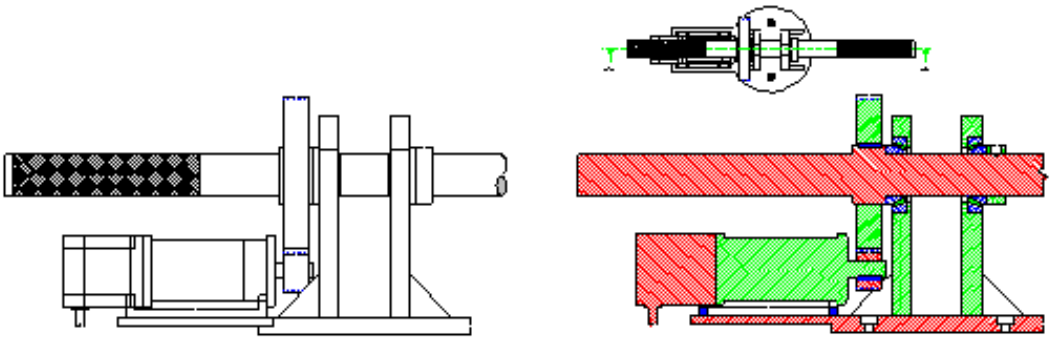
Aquests rodaments van muntats sobre una peça circular, que consta dels enclavaments per sustentar-los, aquesta peça va cargolada al pilar i sustentada a la part superior.

Els rodaments aguanten un eix en el qual, en la part superior s'obre per fixar-se amb l'engranatge principal que fa moure el sistema, aquest engranatge és de 100 dents i mòdul 3. Aquest, engrana amb el de l'eix motor, de 25 dents. El motor-reductor, pas a pas, va acoblat a una peça la qual va fixada al pilar.

Tal i com podem observar en la imatge 10.3 el sistema queda robust i compacte, s'ha tendit més aviat a dimensionar les peces per tal de que no hi hagi problemes d'esforços ni de fatiga, i la seva vida sigui llarga.

10.3 - Disseny del sistema d'inclinació

Pel que fa al sistema inclinatori, té un funcionament similar al sistema giratori, aquest va acoblat sobre l'engranatge de sistema anterior a traves de cargols.



Img.10.4. Vista i secció del sistema d'inclinació

Consisteix en una peça principal que fa tant de suport pel motor-reductor com per l'eix, en aquesta peça s'hi situen dos rodaments cònics de contacte angular, els dos són capaços d'aguantar les forces verticals, en canvi les forces axials d'un sentit se les emporta un d'ells i les de sentit contrari l'altre.

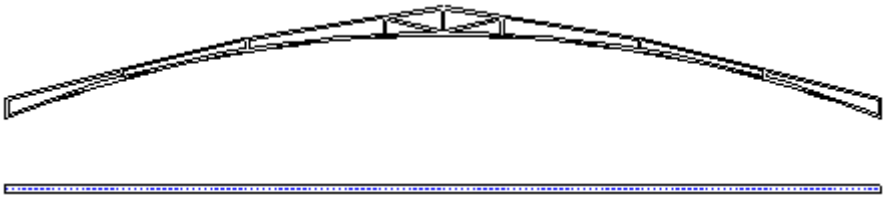
Sobre aquest rodaments està muntat l'eix que agafa la paràbola i el motor stirling, la subjecció es fa per pressió a traves de cargols, a més per donar encara mes consistència s'ha creat un grafilat. Aquest eix porta acoblat un engranatge de 60 dents, el qual engrana amb un de 15 dents acoblat al eix motor. De la mateixa manera que abans el motor-reductor va muntat sobre una peça que el fixa en el suport.

El sistema d'inclinació s'ha dissenyat amb les mateixes condicions que el sistema giratori. Sense tenir en compte el CTE, però si els coeficients de minoració i majoració de carregues, per tal de tenir uns coeficients de seguretat.

10.4 - Disseny de l'estructura del disc parabòlic

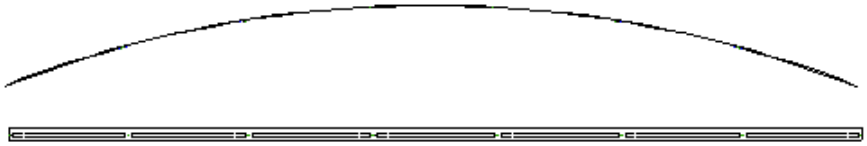
El sistema consta bàsicament de quatre tipus de peces, l'estructura forma un entramat, amb peces verticals i horitzontals.

Les peces o bigues verticals són les que aguanten més esforç, per aquest motiu s'han fet més consistents, aquestes en la seva part interna tenen la curvatura que ha de tenir la paràbola, en elles s'hi solden les peces horitzontals, estan soldades per tal de crear una estructura hiperestàtica que treballa com una sola peça.



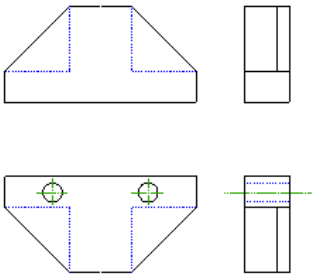
Img.10.5. Biga vertical del disc parabòlic

Les peces horitzontals també tenen la curvatura que ha de tenir la paràbola, per tal d'orientar els miralls cap al focus, només aposentant-los a l'estructura. Observem que aquesta peça te unes ranures entre mig, aquestes ens serveixen per deixar passar l'aire entre els miralls tal i com s'ha comentat en apartats anteriors, per tal de reduir la força del vent.



Img.10.6. Biga horitzontal del disc parabòlic

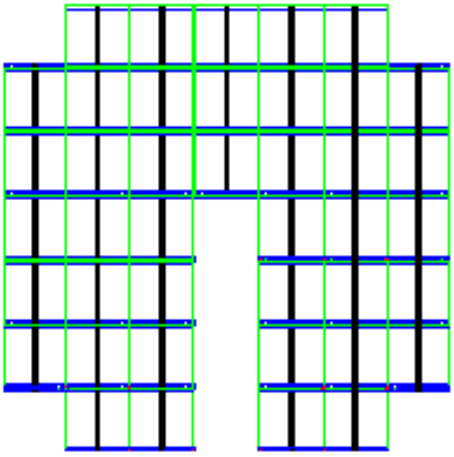
En aquestes peces horitzontals hi van col·locades dues peces que aguanten els mirall, treient-hi la mínima superfície possible. D'aquestes peces hi ha dos tipus: la inferior, que va soldada i la superior, que va cargolada. Aquestes permeten muntar els miralls amb facilitat.



Img.10.7. Subjectors dels vidres reflectants del disc parabòlic

En el disseny s'ha tingut en compte que, com que les biguetes han de tenir una superfície esfèrica, lo qual es car de fer, s'hi apliquen les toleràncies necessàries només en aquells trams on realment fa falta. Aconseguirem un estalvi molt important, podem estar parlant d'un 65% de la superfície.

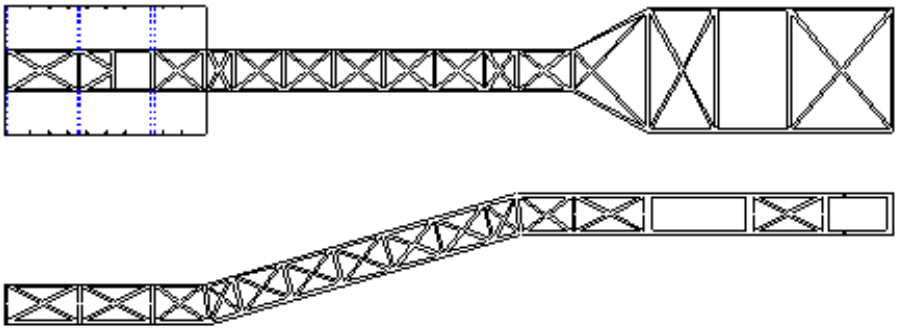
A continuació es mostra com queda l'estructura final del disc, amb els miralls muntats, hi observem que, les bigues, tan verticals com horitzontals, tenen dimensions diferents.



Img.10.8.Vista final de l'estructura del disc parabòlic

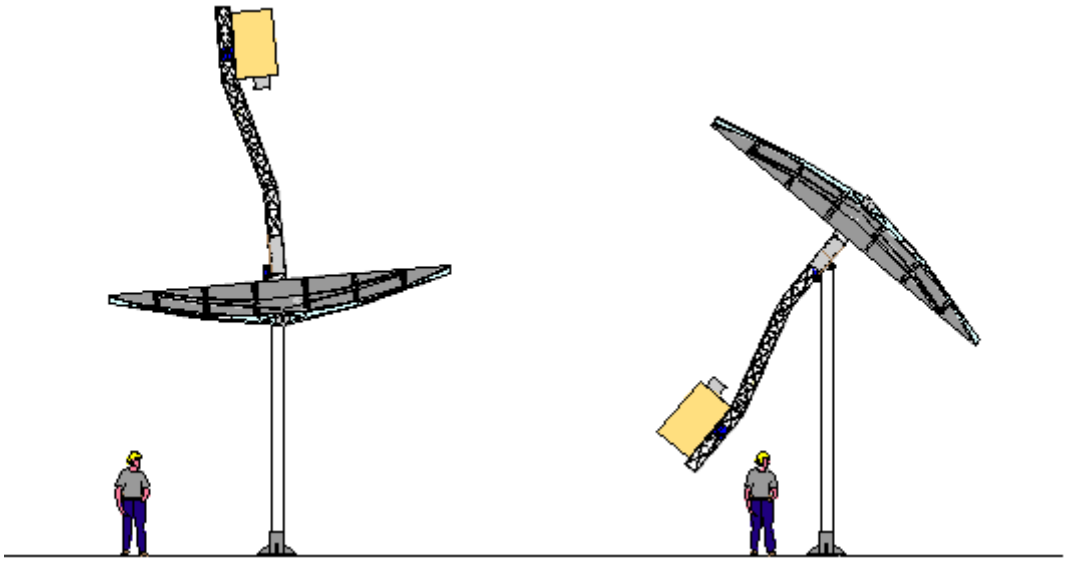
Observem dos detalls, des de la part central fins la inferior, hi falten quatre miralls, aquests han estat moguts a la part superior per poder inclinar la paràbola, sinó aquesta toparia amb el pilar i els sistemes de gir i inclinació. A part si hi hagués un mirall central, aquest quedaria tapat per l'ombra del motor stirling, ja que sempre esta orientat al centre.

Com a última peça estructural, tenim el braç de palanca, aquest s'ha dissenyat tenint en compte la compensació de forces entre el motor i el disc. El pes del motor Stirling és de 195 kg, i el disc parabòlic té un pes de 625 kg, per tant al tenir una llargària de 5,6 metres de braç, la palanca la realitzem a 4,27 metres de l'extrem esquerre. Contrapesar la peça, ens proporciona l'anulació de moments flectors constants sobre el pilar.



Img.10.9.Vista superior i lateral del braç de palanca

Observem també, que en l'extrem dret del braç de palanca, l'amplada augmenta considerablement, la qual cosa, ens proporciona superar els amples del sistema d'inclinació i giratori, i d'aquesta manera, ser capaços d'inclinar la paràbola gairebé 90º. Pel que fa al gir de la paràbola, orientant-la a terra, podem arribar als 45º, suficient per no suportar l'inclemència de temporals, i reduir la brutícia que s'acumula als miralls quan aquests no han de treballar. Les inclinacions límit queden plasmades a la figura 10.10., aquesta també ens proporciona una visió global del sistema i un punt de referència per fer-nos una idea de les dimensions.



Img.10.10. Posicions límit del captador Solar

11 - Reflectors

Quan parlem de reflectors en referim als miralls reflectants, que projecten la llum del sol en direcció al concentrador solar.

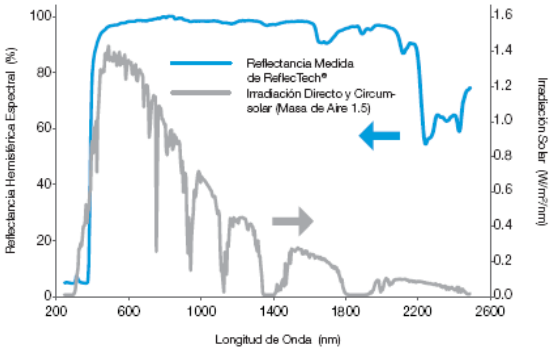
Aquests tenen una curvatura biaxial, corresponent a la paràbola descrita anteriorment, calculada en l'annex 1. Tal i com podem veure en la figura 12.1, aquest tenen una disposició quadrada amb unes mides de 867x867 mm inscrit sobre el pla, la separació entre ells és aproximadament d'1 cm, que com ja hem explicat anteriorment permet rebaixar de forma molt considerable la resistència al vent.

Img.11.1. Miralls reflectants

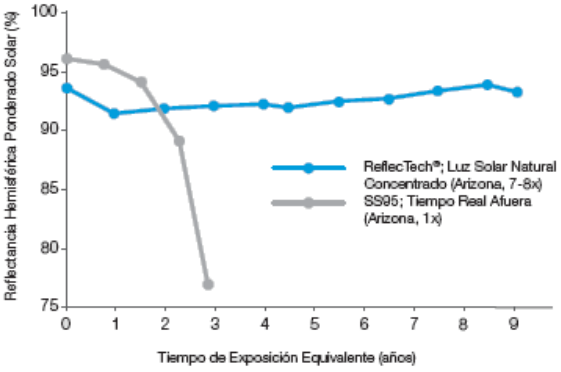
En el mercat hi ha moltes gammes de miralls, alguns arriben a reflectir el 99,9% de la llum. Tot i això aquests miralls són més aviat experimentals, ja que el seu preu és molt elevat, són de més utilitat uns econòmics amb menys reflectivitat i col·locar una mica més de superfície per contrarestar-ne l'efecte.

Els miralls seleccionats els muntarem a partir d'un vidre corbat de l'empresa *"Cricursa",* el quals ens dona una superfície d'alta qualitat, i uns films reflectants proporcionats per l'empresa *"ReflecTech®",* aquests es munten a la part externa del vidre.

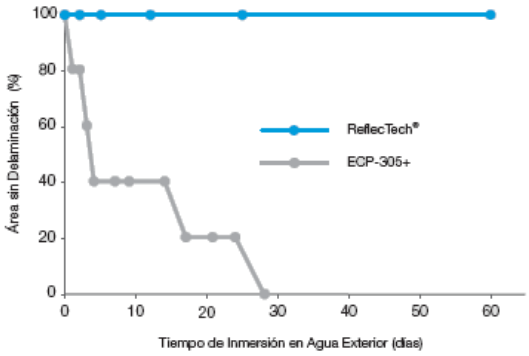
Els films tenen un gruix de 0.1mm, aguanten temperatures de fins a 60ºC (cal recordar que les altes temperatures estan al concentrador i no als miralls reflectants) i tenen una reflectivitat del 94%. A continuació es mostren els gràfics de reflectivitat segons la longitud d'ona, la durabilitat i la resistència a la delaminació induïda per la humitat.



Img.11.2. Reflectivitat segons longitud d'ona



Img.11.3. Reflectivitat al pas del temps



Img.11.4. Resistència a la delaminació induïda per la humitat

Tal i com hem esmentat anteriorment és compara la diferencia entre tenir un mirall amb una eficiència del 99'9% i el seleccionat d'un 94%.

Si tenim una superfície de 28 m^2, amb una reflectivitat del 99'9% necessitarem una superfície de 28,29 m^2 per obtenir l'energia que es reflectiria si el rendiment fos del 100%, en canvi amb el 94% necessitarem una superfície de 29,79 m^2. En aquest cas per

1'5 m^2 més de miralls aconseguim la mateixa energia, per tant és pot veure que el cost es redueix en gran mesura.

En el nostre cas disposem de 41 miralls, amb una superfície total de 30,82 m^2 per parabòlica. El preu esta entre 16,18 €/m^2 i 12,56 €/m^2 segons la quantitat comprada. Per tant el cost del film en una paràbola està entre 500€ i 387€.

S'ha de tenir en compte que els miralls venen en rotllo, pensats per curvatures parabòliques i no esfèriques, tot i això, al tenir un radi de curvatura tan gran, superior a 8m, no hi hauran problemes d'arrugues, ja que es pot jugar mínimament, amb la flexibilitat del film, i acomodar-lo a la superfície.

Img.11.5. Films Reflectants

Respecte al vidre, aquest es realitza de la següent manera: Partim d'un vidre pla, lleugerament superior a les dimensions que tenim, aquest es col·locarà sobre un motllo amb les dimensions desitjades, i s'escalfarà fins que comenci a fluir, sense arribar a fondre's completament, mica en mica i mantenint el gruix s'anirà adaptant al motllo, la superfície que tindrà contacte amb el motllo serà la de major qualitat, en la qual hi enganxarem el film, finalment es poleixen els extrems. Aquest resulta un procés força econòmic.

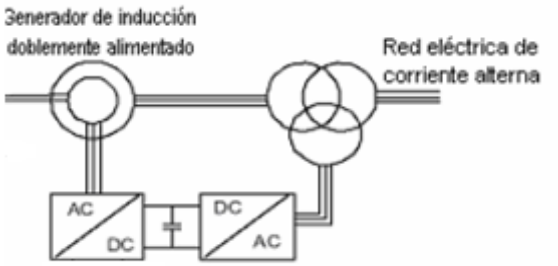
Finalment el reflectant es munta sobre l'estructura metàl·lica dissenyada anteriorment, la qual ja té la curvatura idònia perquè aquests quedin orientats. A les quatre cantoneres del reflectant hi ha unes pestanyes, les inferiors fixes i les superiors extraïbles per poder-lo sostenir. Perquè el contacte, en cas de vent o alguna altra força externa no danyi el reflectant, aquest portarà unes capes molt fines de goma per tal de recolzar correctament i no tenir fregament amb el metall.

12 - Generador elèctric i connexió a la red elèctrica

El motor Stirling ens proporciona una potència mecànica mínimament inferior a 7,5 kW, aquesta l'hem de transformar a potència elèctrica, per això farem ús d'un generador. Aquest, ha de ser capaç d'absorbir variacions de velocitat, ja que a menys producció d'energia solar, més lent gira el motor Stirling.

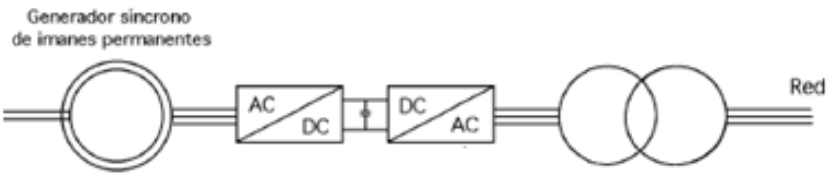
Quan parlem de variacions superiors al 10%, com es el nostre cas, s'han de buscar generadors de velocitat variable. Tenim dues opcions: generadors asíncrons doblement alimentats o generadors síncrons d'imants permanents connectats directament a red.

El primer cas, correspon al generador asíncron. Aquest, utilitza un conversor per a part de la potència, les variacions de velocitat del rotor de la turbina es compensen ajustant les corrents del rotor, la presència del conversor permet controlar la potència activa i reactiva, que proporciona un millor comportament de cara a la red i permet fer una arrancada suau del generador.



Img.12.1. Generador d'inducció doblement alimentat, conversor per al rotor bobinat, caixa multiplicadora i compensador de reactiva.

El segon cas consisteix en un generador síncron d'imants permanents, el qual inclou un conversor, aquest incorpora també un variador de freqüència que absorbeix tota la potència del generador, el qual desacobla totalment el generador de la red elèctrica.



Img.12.2. Generador de síncron d'imants permanents

El sistema seleccionat serà el segon, ja que necessita aparells menys complexos i està absent de caixa de canvis entre el motor Stirling i el motor elèctric. El sistema que analitzant la ona consistiria en el següent:

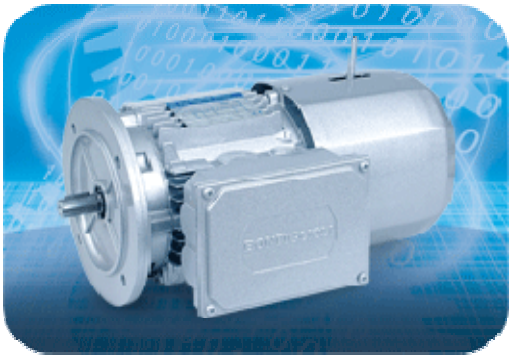
Motor Síncron	Ona a freqüència Variable	Inversor ULX AC/DC	Corrent Continua	Inversor Aurora DC/AC	Corrent alterna a freqüència de red

Taula.12.3. Evolució de l'ona

El motor seleccionat és de la casa "Sales", síncron d'imants permanents. A continuació es mostren les característiques mes rellevants.

Model	kW	Par (Nm)	RPM	HZ	N (pp)	V out (V)	Pes (kg)	η	$Cos\varphi$
BN-132S-4-230/400-50-B5	7,5	900	750	50	4	230/400	6,19	0,98	0,96

Taula.12.4. Característiques del motor elèctric d'imants permanents



Img.12.5. Motor elèctric d'imants permanents

A continuació es mostra l'inversor de la casa *"Danfoss"*, model ULX-7000, transforma corrent alterna en corrent continua, amb una potència màxima de 7,8 kW, i una eficiència del 94,3%.

Img.12.6. Inversor de AC a DC

L'element mes important per fer la connexió a la red, és l'inversor de corrent continua a corrent alterna, de la casa *"Power-One",* model Aurora PVI-7500-OUT-ES, amb una eficiència del 97%. L'inversor subministra a la red a un voltatge de 230/400 V, i una freqüència de 50 Hz. A part incorpora un filtre per acabar de suavitzar l'ona i un sistema de condensadors per apropar el màxim possible el factor de potència a 1.

A part ens permeten programar les parades del motor, en cas de tenir un baix consum i engegar-lo passat un cert temps, deixant-lo en mode Stand-By.

El punt més important de l'inversor, es que ens permet subministrar energia al generador per fer l'arrencada del motor Stirling, que tal i com s'ha esmentat anteriorment no engega sol.

Aurora compleix amb la directiva europea de baixa tensió 2006/95/CE i amb el real decret RD 1663/200 de l'estat espanyol, pel que fa a connexions de plaques fotovoltaiques a la red.

S'ha de dir que encara no hi ha cap Real Decret sobre la connexió de captadors solars Stirling a la red, tot i això, a mitjans de 2009 s'ha implantat el primer captador solar connectat a la xarxa a la Universitat de Sevilla.

Img.12.7. Inversor de DC a AC

El rendiment total del sistema és del 89%, amb una potència màxima de sortida del motor Stirling de 7,1 kW, ens trobaríem amb una generació màxima d'energia de 6,3 kW. Força més alta de la prevista inicialment de 5 kW.

El rendiment global del sistema passaria a ser del 24%. Tenint en compte que les plaques solars proporcionen un rendiment d'entre el 13% i el 18%, a part de portar materials molt contaminants, és una dada molt significativa.

Altres dispositius a implementar en el sistema elèctric són:

- Un filtre entre els dos inversos, per tal d'estabilitzar la tensió de corrent continu entre pistonada i pistonada, tal i com faria un volant d'inèrcia en un motor tèrmic.

- Un comptador, seleccionat segons la tarifa elèctrica a la qual ens volguéssim acollir.

- Un interruptor automàtic magnetotèrmic, per estar segurs davant sobrecarregues i curtcircuits.

- Un interruptor diferencial, per estar protegits de les derivacions a terra.

Fent un breu resum, el dispositiu elèctric ha de ser capaç de:

- Fer una engegada del motor, passant de generador a motor elèctric durant un instant de temps.

- Subministrar corrent a la red, segons les normatives corresponents.

- Ser capaç de suportar les variacions de velocitat del motor Stirling.
- Disposar de protecció contra curtcircuits i pujades de tensió.
- Entrar en mode Stand-By, en cas que la captació d'energia baixi bruscament durant un cert temps.
- Arrencar el motor Stirling, passat un cert temps posterior a l'aturada.
- Programar les hores de sortida i posta de sol, no la seva posició.

13 - Producció d'energia elèctrica

Per comptabilitzar la producció d'energia elèctrica del disc parabòlic, primer s'hauria de buscar una ubicació. En el nostre territori hi ha grans diferencies d'energia solar incident, podem veure en la figura 13.1 que els valors de captació de Galicia són pràcticament la meitat que els d'Andalusia. Per tant, a primera vista, la instal·lació l'ubicaríem quan més als sud millor.

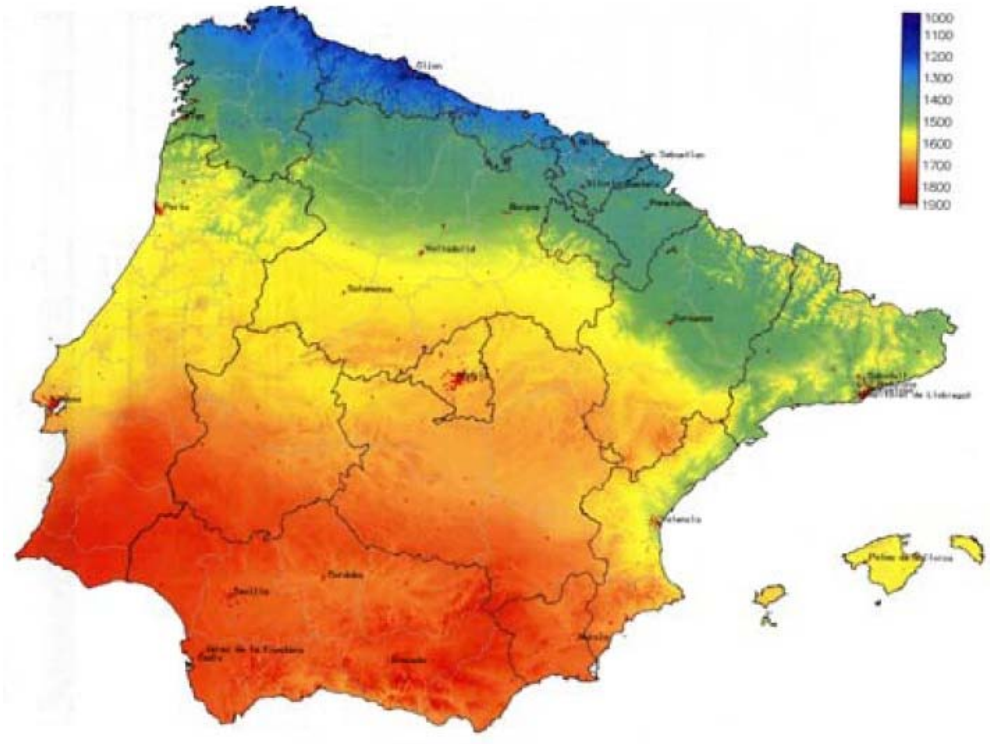


Fig. 13.1. Energia solar incident a Espanya, dades en kWh/m^2/any

Un altre aspecte a tenir en compte, és el màxim nombre d'hores solars a Espanya, aquest es situa entorn a les 7 diàries, contant amb la diferencia d'hores d'estiu a hivern i la climatologia. Aquesta dada ens situa amb una mitja d'energia solar incident sobre la superfície, de 1600 kWh/m2/any. En les taules de l'annex 6, podem observar les hores de sol per comunitat de l'any 2004 fins al 2008.

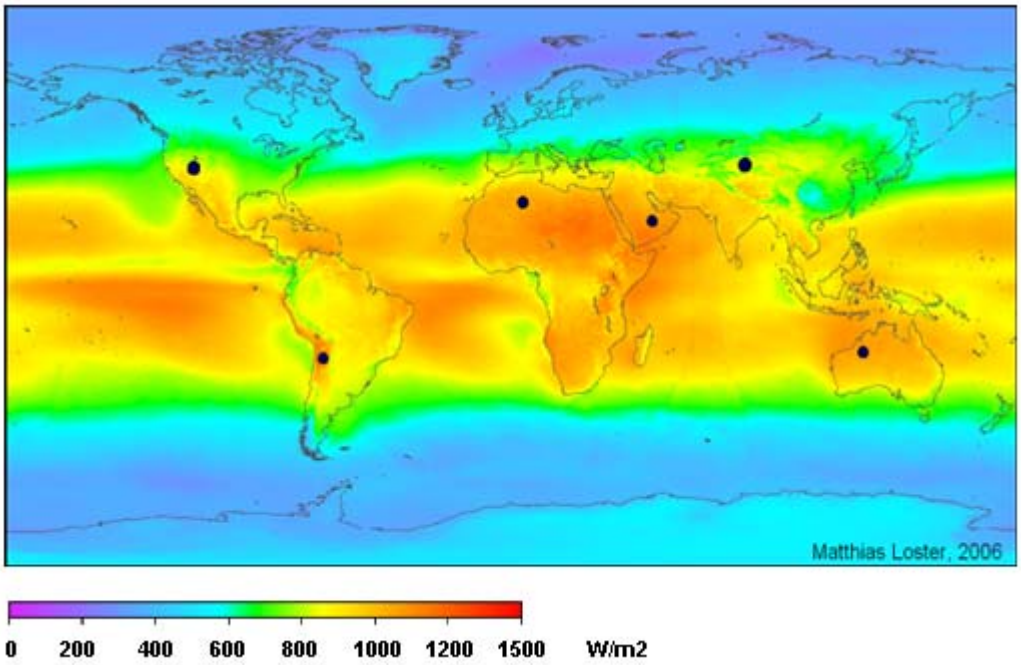


Fig.13.2 Radiació solar incident sobre la superfície

Observant la Fig.13.2 veiem que la radiació solar sobre la superfície a Espanya, es situa entre 800 i 600 W/m^2. El nostre concentrador solar està pensat per donar una potència de 6,33 kW al rebre una radiació de 850 W/m^2.

Així doncs tenim que per una radiació de 800 W/m^2, treballem al 94% del seu rendiment. Per tant ens està generant 5,95 kW. En canvi al nord d'Espanya, la radiació es de 600 W/m^2, i el rendiment ens disminueix fins al 70%, tenint una potència de sortida de 4,4 kW.

A l'hora de buscar la situació geogràfica, la dada més rellevant tècnicament, és l'energia solar incident, mitja entre la radiació solar i les hores de sol. Tal i com hem dit, Andalusia es la comunitat amb més radiació solar, per tant col·locant el motor Stirling, a Sevilla per exemple, tindríem una generació d'energia de:

$$[F.13.1]\ E_{gen.} = P_{gen.} \cdot hores_{sol} \cdot Dies_{any} = 5{,}95\ kW \cdot 8{,}08 \cdot 365 = 17{,}55\ \frac{kWh}{any}$$

El consum mig d'una vivenda unifamiliar a España se situa en 4,36 kWh/any, segons dades de l'institut nacional d'estadística *"INE"*. Per tant, podríem dir que el captador solar Stirling dissenyat, generaria suficient energia per subministrar corrent elèctric a 4 casses d'Andalusia. Com ja s'ha explicat anteriorment, aquest no aniria directament a les

cases, primer passaria a la red elèctrica, per temes econòmics i tècnics (nul·la captació per la nit o en dies nuvolats), i nosaltres consumiríem electricitat de la red.

En el cas d'estar al nord, per exemple a Barcelona, la generació d'energia seria:

$$[F.13.2] \quad E_{gen.} = P_{gen.} \cdot hores_{sol} \cdot Dies_{any} = 4{,}4\ kW \cdot 6{,}59 \cdot 365 = 10{,}58\ \frac{kWh}{any}$$

Aquesta ens serviria per a 2,4 cases, a diferencia d'Andalusia que era de 4. Això es deu a dos motius: El primer és la diferencia d'hores de sol, i el segon la diferència de radiació solar sobre la superfície.

Aquests motors s'han dissenyat pensant en ser aprofitats al màxim dins el territori Espanyol, per treure'n el màxim rendiment han d'estar instal·lats quan més al sud millor, el que afecta clarament a les comunitats d'Andalusia i Múrcia i part de les comunitats d'Extremadura, Castella la Manxa i la Comunitat Valenciana.

14 - Anàlisi de Viabilitat

Per tal de fer un anàlisi econòmic, és imprescindible tenir el cost del producte, en el nostre cas, s'ha realitzat un prototip, per tant no tenim aquest cost. Tot i això, si que es poden contemplar varis aspectes relacionats amb la comercialització del sistema. S'ha de tenir en compte que, els temes que es tracten a continuació es basen en els sistemes implantats, ja que en el nostre cas, un cop comprovat i verificat el bon funcionament del prototip, caldria realitzar un estudi peça a peça per tal de reduir el cost de producció, i d'aquesta manera fer-lo rentable. A continuació s'analitzaran aquests aspectes.

14.1 - Subvencions

Les instal·lacions de generació elèctrica o aigua calenta sanitària, amb energies renovables, estan subvencionades a nivell estatal pel *I.D.A.E.* (Institut per a la Diversificació i Estalvi de l'energia) i a nivell autonòmic pel *I.C.A.E.N.* (Institut Català d´Energia), inclús es poden rebre algunes subvencions dels ajuntaments com els de Barcelona, Tarrassa o Sabadell.

Per optar a les subvencions estatals, les instal·lacions han de ser realitzades per empreses acreditades per el *I.D.A.E*. En el millor dels casos una instal·lació pot arribar ha aconseguir una subvenció del 50% respecte el preu total de l'aparell.

Aquestes subvencions però, corresponen més aviat a plaques solars tèrmiques i fotovoltaiques, el captador dissenyat, al ser encara una tecnologia en desenvolupament, no està contemplat per la llei, tot i això, un cop iniciada la comercialització, fàcilment podria rebre subvencions d'aquest tipus.

14.2 - Temps de vida

El temps de vida és un aspecte complicat d'estimar, segons les dades observades en els sistemes actuals, com *"Distal"* i *"Eurodish"*, el temps de vida es pot estimar en 35 anys.

Comparant-la amb altres sistemes de generació elèctrica com les plaques fotovoltaiques, 30 anys, o les plaques solars tèrmiques, 20 anys, tenim que el sistema de disc parabòlic està força per sobre d'aquests dos. Aquest aspecte és de vital importància a l'hora de calcular el temps d'amortització i estimar el cost del producte, ja que aquest,

pot ser lleugerament superior als sistemes mencionats anteriorment, i seguir essent rentable.

14.3 - Amortització

En l'instal·lació solar hi ha diversos factors que poden influir en la seva amortització.

- Càlcul correcte de les necessitats elèctriques
- Una bona instal·lació
- Situació geogràfica (segons la climatologia i posició en que ens trobem)
- L'ús de l'instal·lació (continuar amb el consum que es va estimar inicialment)
- Preu de compra de l'energia, per part de les companyies elèctriques
- Subvencions estatals, autonòmiques i dels ajuntaments

Fent una mitja de tots aquests aspectes, una instal·lació d'aquest tipus te un temps d'amortització d'uns 10 anys, tenint en compte que, els temps de vida s'estima en 35 anys, el sistema es convertiria en una instal·lació viable econòmicament.

14.4 - Projectes en desenvolupament i estimacions de creixement

La prova de la seva viabilitat la trobem observant el projectes mundials en fase de desenvolupament o ja implantats, aquests és mostren a la taula següent.

Nom del Projecte	Localització	Potència	Situació
Stirling Energy Systems SES I	Mojave Desert, CA (EEUU)	500 MW	En construcció
Stirling Energy Systems SES II	Imperial Valley, CA (EEUU)	300 MW	En projecte
Nevada Solar Dish	Albuquerque, NV (EEUU)	150 kW	En funcionament
Suncal 2000	Huntington Beach, CA (EEUU)	400 kW	En funcionament

The SRP Sundish	Phoenix, AZ (EEUU)	25 kW	En funcionament
Aznalcóllar	Sanlúcar la Mayor (Sevilla)	80 kW	En funcionament
Themdish	Thérmis (França)	50 kW	En funcionament

Una altra dada important és la previsió anual de creixement prevista per als pròxims 30 anys de les energies renovables d'alta temperatura. Aquestes dades provenen de dos estudis diferents, el *"AIP"* (Advanced International Policies Scenario) i el *"DCP"* (Dynamic Current Policies Scenario)

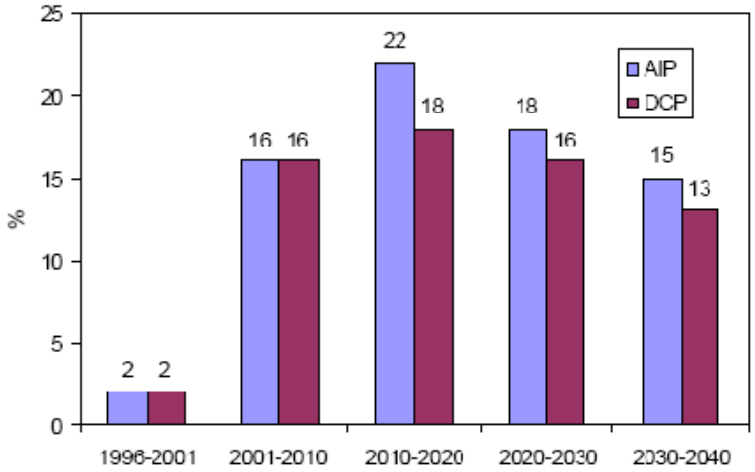


Fig. 14.1. Estimació del creixement anual de les energies solars tèrmiques d'alta temperatura

Com podem observar, el creixement és positiu fins el 2020, a part de ser un creixement molt elevat. A partir d'aquí, el creixement es va alleugerint tot i que segueix essent important.

Pel que fa a l'estimació de generació d'energia renovable, sense distingir la procedència, podem observar en la figura 14.2, com la potència generada creix de forma exponencial.

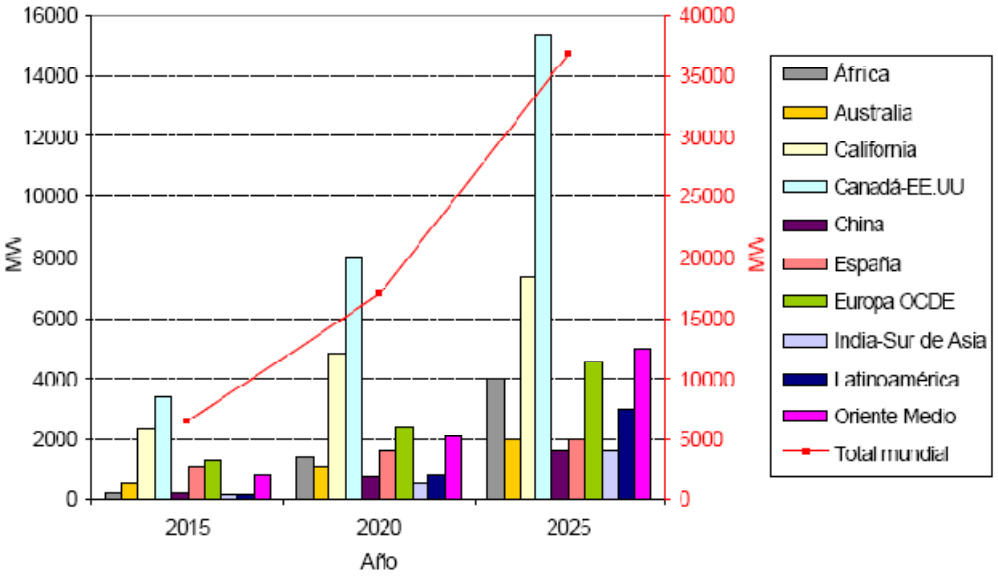


Fig. 14.2. Estimació de generació d'energia elèctrica renovable, a nivell mundial

15 - Estudi d'impacte ambiental

Mitjançant aquest estudi, s'analitza l'impacte ambiental provocat per una unitat de captació solar. També avalua la capacitat d'adaptació al territori i la contaminació que és capaç de reduir.

El captador es classifica en el llistat de projectes sostenibles amb l'entorn, aquest utilitza materials no contaminants i reciclables, com a "combustible" l'energia solar i el seu índex d'emissions a l'atmosfera o al medi es nul.

L'impacte causat al territori i a la seva societat és purament visual. Aquest dispositiu aporta una millora en l'aire que respirem, en detriment d'altres tipus de centrals o tecnologies. L'espai que ocupa en el territori és força reduït si el comparem amb altres sistemes de captació d'energies renovables.

La seva ubicació, nomes està subjecte a l'estudi d'ombres, a l'energia solar projectada i als límits de vent i neu comentats en apartats anteriors.

La contaminació acústica del dispositiu es nul·la, tal i com s'ha explicat anteriorment, el motor Stirling te unes vibracions molt baixes, així com els motors elèctrics del sistema de posicionament i conversió d'energia.

Entrant més a fons en l'emissió de CO^2 i altres gasos contaminats, aquests només es produirien en el procés de fabricació del dispositiu, depenent també d'on extraiem l'energia. Tal i com hem esmentat, les emissions durant l'explotació són nul·les.

Mostrem ara el mix energètic Espanyol i Europeu de producció d'electricitat.

Centrals	Hidro.	Renovables	Nuclears	Fuel-Gas	Carbó	Cicles Combinats
España	14,2 %	3,3 %	27,6 %	10,6 %	35,2 %	9,1 %
Europa	13,4 %	2,8 %	33,3 %	7,4 %	25,7 %	17,4 %

Fig.15.1. Mix energètic Espanyol i Europeu

Tenint en compte aquest mix, observem ara les emissions en "g/kWh", d'Espanya i Europa.

Centrals	CO2	SO2	NOx	Partícules en suspensió
España	749	0,43	1,06	0,11
Europa	574	0,3	0,79	0,8

Fig.15.1. Emissions en "g/kWh", d'Espanya i Europa

Com observem, les emissions de gasos contaminants a Espanya són més elevades que a Europa, es curiós parlant del país punter en energies renovables, però no ho es tant si observem l'ús del carbó per generar energia.

En un any, un sol captador solar es capaç de produir 17,55 kWh, aquesta dada suposa deixar d'emetre a l'atmosfera 13 kg de CO_2, 8 g de SO_2, 17 g de NO_x i 1,87 g de partícules en suspensió.

16 - Conclusions

L'objectiu principal del projecte era dissenyar un captador solar d'alta temperatura amb motor Stirling, aquest objectiu s'ha realitzat de forma satisfactòria, buscant en cada cas, la solució, que des del meu punt de vista, creia millor o més oportuna.

S'ha dissenyat la parabòlica, tenint en compte diversos aspectes, com la càrrega de neu, la càrrega de vent, la reflectivitat i el cost. Aportant en cada apartat solucions al sistema, contrastant diferents models existents i buscant sistemes econòmics d'alta reflexió. Tot fent un pas per la matemàtica que implica una paràbola.

Pel que fa al seguiment solar, s'ha hagut d'analitzar la formulació necessària per determinar la posició solar, tenint així una precisió de fórmules molt elevada, inclús mesura la durada de l'any de 365 dies, 6 hores i 4 minuts. Aquesta exactitud en quant a la formulació, ens ha permès, extreure només dues dades per orientar el nostre captador, l'angle azimutal i l'altura solar. A partir d'aquí, s'han dissenyat dos sistemes de gir amb motor pas a pas dominats per una placa de control, en la qual s'hi introdueix tota la formulació. Tot això ens ha portat a un sistema modern, lluny de la busca del sol per sensors i la seva corresponent problemàtica, en el qual es minimitza el consum energètic i s'optimitza el dispositiu.

El motor Stirling, ha estat la part més complexa del projecte, envers el que jo pensava, aquest és un motor amb molt poca informació i molt secretisme per part de les empreses que el realitzen. Motor, idealment, amb un gran rendiment, però dificultós de realitzar partint d'una experiència pràcticament nul·la. Tot i això, se n'ha realitzat un disseny, prou bo a primera vista, el qual s'hauria de dur a terme i en tot cas, redissenyar o optimitzar aquelles peces que podrien provocar problemes. Com ja hem esmentat anteriorment, aquest motor està poc experimentat, i a l'hora de crear un model nou, les empreses, realitzen desenes de proves i modificacions, abans no en troben el definitiu. Tenim així, tal i com ens havíem marcat als objectius, un primer disseny del motor Stirling, desglossat peça a peça i material a material, preparat per crear el primer prototip.

Com a conclusió final, plantegem la viabilitat energètica del captador solar Stirling, emplaçat a una localització adequada. No es pretenia dissenyar un captador que funciones al màxim rendiment a tot el territori, no és possible, encara que sembli que a la majoria del territori Espanyol fa força sol, hi ha diferències molt importants. Tot i això, en alguns punts d'Espanya, més aviat al sud, es poden implantar dispositius d'aquest

tipus connectats a la red, per abastir diversos habitatges, sempre parlant tècnicament, recordem que s'ha dissenyat un prototip.

Hi han grans esperances mundials dipositades en aquest sistema, s'espera que es converteixi en un dels punters en la captació d'energia solar a gran escala. Cosa que ha fet esperançador aquest projecte i des d'un principi s'ha tingut la seguretat que, treballant correctament, es podia convertir en un captador d'energia solar sostenible, amb emissions baixes en el moment de realitzar-lo i nul·les quan està implantat.

Bibliografia, Webgrafia i Programari

Bibliografia

Bonals Muntada, Lluís Albert i Ruiz Mansilla, Rafael. *"Transmissió de calor"*. Edicions UPC, 1994.

Illa i Alibés. "*Problemes de Termotecnia".* Editorial EUMO, 1990.

Kreith, Frank i Bohn, Mark S. *"Principios de transferencia de calor".* Editorial Thomson, 2001.

Mills, Anthony F. *"Transferencia de calor".* Editorial MacGrawHill. 6ª Edició, 1992.

Ramirez Vázquez, José. *"Máquinas de corriente alterna".* Editorial CEAC,1973.

Álvarez Flórez, Jesus A.; Callejón i Agramunt, Ismael; Roca i Carles, Pere. "El motor Stirling". Editorial CPDA, 1997.

St. Gallen, Kanton. "Stirling-Maschinen" Editorial NTB, 1992.

Webgrafia

Càlculs de posicionament solar

- URL: http://www.jcea.es/artic/orto.htm

Cicle teòric Stirling

- URL: http://personales.able.es/jgros/explicac.htm

Codi per al seguiment solar de dos eixos

- URL: http://rredc.nrel.gov/solar/codes_algs/solpos/

Estimació de pèrdues en un motor Stirling

- URL: http://www2.ubu.es/ingelec/maqmot/StirlingWeb/perdidas/perdidas.htm

Films reflectants

- URL: http://www.reflectechsolar.com/

Inversors de corrent

- URL: http://www.power-one.com/renewable-energy/wind-inverters.php?loc=es

Motors pas a pas

- URL: http://www.micropap.com/Webmicropap_motores.htm

Seguidors Solars

- URL: http://www.ades.tv/productos/seguidor-solar

Sistemes de captació d'energia solar

- URL: http://www.redrok.com/main.htm

Teoria de la paràbola

- URL: http://mathworld.wolfram.com/Parabola.html

Teoria de l'energia solar

- URL: http://saecsaenergiasolar.com/renovables/energia_solar/

Teoria del regenerador

- URL:http://books.google.es/books?id=wrQqoXfl1UwC&pg=PA273&dq=regenerador+termico#v=onepage&q=&f=false

Programari

- Ansys Workbench (Càlcul d'esforços)
- AutoCAD 2009 (Dibuix 2D i 3D)
- Geosol 2.0 (Gràfics de posició solar)
- Microsoft Word 2007 i Excel 2007

Agraïments

Aquest projecte no hauria estat possible sense la gent que hi ha col·laborat desinteressadament, en menor o major mesura tots han posat el seu gra de sorra en la realització del mateix. Agraeixo el recolzament i l'ajuda de la família, del Dr. Ramon Carreras, de la Mercedes Gómez Coll, de la Jasmina Soto Gordo, del Carlos Lopez Folk, de l'Eloi Collell, del Ramon Casals i del Ricard Bosch.

Annexes

Índex dels Annexes

Annex 1 - Demostració de les formules de la paràbola 62
Annex 2 - Disseny del motor Stirling 66
A2.1 - Dimensionament inicial 66
A2.2 - Balanç energètic del cicle teòric Stirling 68
A2.3 - Captador Solar 71
A2.4 - Refrigeració 75
A2.5- Regenerador 78
A2.6 - Balanç energètic del cicle Stirling, tenint en compte els rendiments de cada cicle 84
A2.7 - Disseny mecànic del motor Stirling 88
Annex 3 - Càlcul estructural 92
A3.1 - Hipòtesis de càlcul de l'estructura 92
A3.2 - Demostració del Càlcul del Pilar 95
A3.3 - Demostració del Càlcul de la Sabata 101
Annex 4 - Posicionament de la paràbola 109
A4.1 - Càlcul de la posició solar 109
A4.2 - Dispositiu LCD, Menú contextual 111
A4.3 - Temps d'actualització de Posicionament 113
A4.4 - Motors Pas a Pas 118
Annex 5 - Diagrama Sankey 122
Annex 6 - Hores solars a Espanya 124
Annex 7 - Càlcul d'esforços 126

Annex 1 - Demostració de les formules de la paràbola

En primer lloc s'ha de calcular la funció de la recta que passa pels punts (-D/2 , h) i (0 , 1/(4a)).

$$[F.A1.1] \quad y = mx + n$$

$$Substituim\ el\ 1^o\ punt \qquad [F.A1.2] \quad h = m\left(-\frac{D_p}{2}\right) + n \quad \rightarrow \quad m = \frac{2(n-h)}{D_p}$$

$$Substituim\ el\ 2^o\ punt \qquad [F.A1.3] \quad \frac{1}{4a} = m \cdot 0 + n \quad \rightarrow \quad n = \frac{1}{4a}$$

$$Ens\ queda\ la\ recta\ següent \quad [F.A1.4] \quad y = \frac{\frac{1}{2a} - 2h}{D_p} \cdot x + \frac{1}{4a}$$

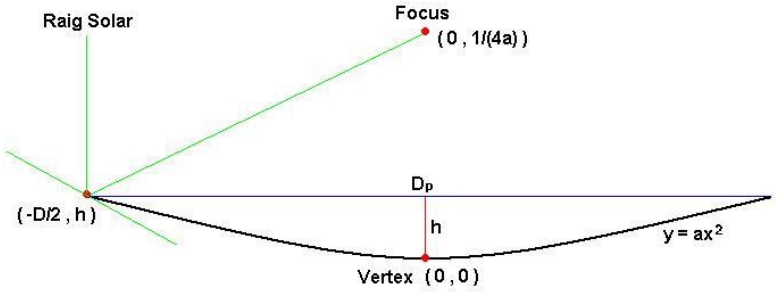


Fig.A1.1. Paràbola, focus i rajos solars

Un cop trobada l'equació de la recta s'ha de trobar l'altura "d_f", que es l'altura del triangle que formen els rajos solars reflectits en l'últim punt de la paràbola i el diàmetre del captador d'energia "D_c". Per tant tindrem la posició a la que ha d'estar el captador d'energia per tal de que impactin en ell tots els rajos solars.

A l'altura del triangle que va des de el punt (0,h) fins al focus li direm H.

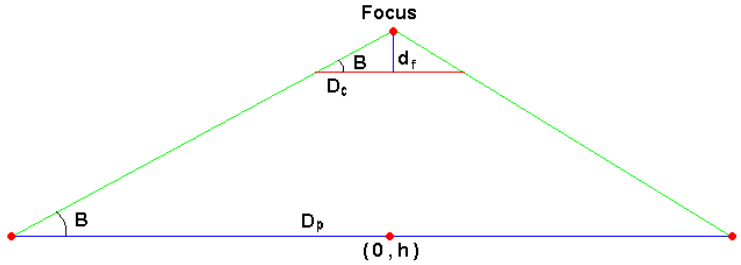


Fig.A1.2. Diàmetre de la paràbola i del concentrador

$$[F.A1.5] \quad H = \frac{1}{4a} - h$$

$$[F.A1.6] \quad tg\beta = \frac{H}{D_c} \quad \rightarrow \quad \beta = tg^{-1}\left(\frac{\frac{1}{4a} - h}{D_p/2}\right)$$

$$[F.A1.7] \quad \frac{D_p/2}{D_c/2} = \frac{H}{d_f} \quad \rightarrow \quad d_f = H \cdot \frac{D_c}{D_p} = \left(\frac{1}{4a} - h\right) \cdot \frac{D_c}{D_p}$$

Ja tenim la distancia que ha d'estar el captador del focus, un cop calculat això, formulem en quant varia el percentatge de rajos que impacten amb el captador si el sol s'inclina un determinat angle "γ".

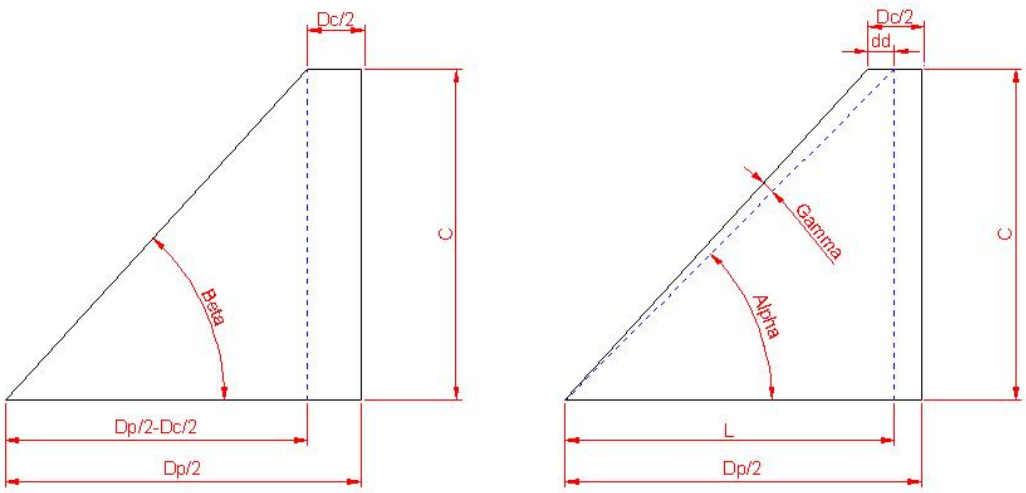


Fig.A1.3. Càlcul de l'angle de desviament

Començarem definint les variables, en les seves expressions més bàsiques, per tal d'aconseguir únicament una formula i no tot un procés de càlcul.

Inicialment definim conceptes bàsics de la paràbola, com la distància d'aquesta al focus (F), l'altura (h) i la seva curvatura (a).

$$[F.A1.8]\ a = \frac{1}{4F} \qquad [Fml.A1.8]\ F = \frac{1}{4a} \qquad [Fml.A1.9]\ h = \frac{1}{4F} \cdot \frac{Dp^2}{4}$$

$$[F.A1.10]\ C = Posicio\ del\ Focus - d_f = F - \left(F - \frac{1}{4F} \cdot \frac{Dp^2}{4}\right) \cdot \frac{D_c}{D_p}$$

Definició dels angles que intervenen en els càlculs de la desviació del raig.

$$[F.A1.11]\ \beta = tg^{-1}\left(\frac{C}{D_p/2 - D_c/2}\right) = \left(\frac{F - \left(F - \frac{1}{4F} \cdot \frac{Dp^2}{4}\right) \cdot \frac{D_c}{D_p}}{D_p/2 - D_c/2}\right)$$

$$[F.A1.12]\ \alpha = \beta - \gamma = tg^{-1}\left(\frac{F - \left(F - \frac{1}{4F} \cdot \frac{Dp^2}{4}\right) \cdot \frac{D_c}{D_p}}{D_p/2 - D_c/2}\right) - \gamma$$

Per últim definim la distancia de desviament dels rajos solars.

$$[F.A1.13]\ L = C \cdot tg(90 - \alpha)$$

$$[F.A1.14]\ dd = \frac{D_p}{2} - \frac{D_c}{2} - L = \frac{D_p}{2} - \frac{D_c}{2} - C \cdot tg(90 - \alpha)$$

$$dd = \frac{D_p}{2} - \frac{D_c}{2} - \left(F - \left(F - \frac{1}{4F} \cdot \frac{Dp^2}{4}\right) \cdot \frac{D_c}{D_p}\right) \cdot tg\left(90 - tg^{-1}\left(\frac{F - \left(F - \frac{1}{4F} \cdot \frac{Dp^2}{4}\right) \cdot \frac{D_c}{D_p}}{D_p/2 - D_c/2}\right) - \gamma\right)$$

En l'annex 2, referent al motor Stirling, ja hem definit el diàmetre de la paràbola i el diàmetre del captador, per tant ja podem substituir els valors en la equació, recordar que les unitats utilitzades són els cm. Els diàmetres són equivalents, ja que les formes que tenim no són rodones, sinó més aviat quadrades.

$$A_c = 576\ cm^2 \rightarrow D_{ec} = 24\ cm\ \ que\ és\ el\ màxim\ costat, el\ qual\ ha\ de\ rebre\ l'entrada\ del\ raig$$

$A_p = 308.000\ cm^2 \ \rightarrow \ D_{ep} = 600\ cm$

Observant la formula A1.15 "*dd*" només ens queda en funció de "*F*" i de "γ".

$$[F.A1.15]\ dd = 288 - \left(F - \left(0{,}04 \cdot F - \frac{900}{F}\right)\right) \cdot tg\left(90 - tg^{-1}\left(\frac{F - \left(0{,}04 \cdot F - \frac{900}{F}\right)}{288}\right) - \gamma\right)$$

Com hem definit en apartats posteriors, el focus el situem a 400 cm de la paràbola. Per la distancia al focus, la formula del desviament ens queda de la següent manera.

- Distància des de la paràbola al focus:

  $F = 400\ cm$

- Curvatura de la paràbola:

  $a = \frac{1}{4F} = 6{,}25 \cdot 10^{-4}$

- Altura de la paràbola:

  $h = \frac{1}{4F} \cdot \frac{Dp^2}{4} = 56{,}25\ cm$

- Distància des del centre de la paràbola al concentrador:

  $C = F - d_f = F - \left(F - \frac{1}{4F} \cdot \frac{Dp^2}{4}\right) \cdot \frac{D_c}{D_p} = 400 - \left(400 - \frac{1}{4 \cdot 400} \cdot \frac{600^2}{4}\right) \frac{24}{600} = 386{,}25\ cm$

- Distància des del focus al concentrador:

  $d_f = 13{,}75\ cm$

- Fórmula de càlcul de la desviació dels rajos solars:

  $dd = 288 - 381{,}75\ \cdot tg(37{,}03 - \gamma)$

Annex 2 - Disseny del motor Stirling

A2.1 - Dimensionament inicial

Per tenir una idea de les dimensions del motor, farem ús de la fórmula de Beale, referent als motors Stirling:

$$[F.A2.1]\ P_B = B \cdot P_m \cdot f \cdot V$$

On: P_B=Potència de Beale [W]
B = Nombre de Beale [Adimensional]
P_m = Pressió Mitja [bar]
f = Freqüència de treball [Hz]
V = Volum [cm^3]

Volem assolir una potència de 5 kW.

T. Màxima de Treball	600 K	800 K	1000 K	1200 K
Disseny Optimitzat	0,008	0,017	0,025	0,03
Disseny poc Optimitzat	0,002	0,006	0,009	0,01

Taula A2.1 Taula de valors per al Numero de Beale

El motor treballarà a una Temperatura màxima de 900 K i una mínima de 300 K, ja que quan més diferència de temperatures més alt serà el rendiment, per tant donarem un nombre de Beale, per a un motor relativament ben optimitzat, agafarem un valor de 0,017.

La Pressió mitja és un tema complex de definir, consultant alguns llibres sobre el tema, la podríem situar en uns 38 bars, per estar aproximadament entre 7 i 67 bars, per tal d'obtenir un bon rendiment i no complicar el sistema de pressurització del motor.

Com a dades inicials tenim que la velocitat òptima per fer treballar el motor és de 750 rpm o 12,5 Hz.

Càlcul del volum del pistó de potència o pistó calent a partir de la formula de Beale:

$$[F.A2.2]\ V = \frac{P_B}{B \cdot P_m \cdot f} = \frac{5000}{0{,}017 \cdot 38 \cdot 12{,}5} = 619{,}2\ cm^3 = V_{pc}$$

Observem que la relació entre el pistó calent i el fred que ens dona un màxim rendiment es k_p=1,1.

Càlcul del pistó fred o pistó desplaçador:

$$[F.A2.3]\ V_{pf} = \frac{V_{pc}}{k_p} = \frac{619{,}2}{1{,}1} = 562{,}9\ cm^3$$

Si tenim en compte que el motor treballa amb un desfasament entre pistons de 90º tenim:

$$[F.A2.4]\ V_{max} = V_{pc} + \frac{1}{2} \cdot V_{pf} = 900{,}65\ cm^3$$

$$[F.A2.5]\ V_{min} = \frac{1}{2} \cdot V_{pf} = 281{,}45\ cm^3$$

La relació de volums màxims i mínims és:

$$[F.A2.6]\ r_{vol} = \frac{V_{min}}{V_{max}} = \frac{281{,}45}{900{,}65} = 0{,}313$$

Resum de dades per al dimensionament inicial:

P_B	Potència de Beale	5000 W
B	Nombre de Beale	0,017
P_m	Pressió mitja	38 bar
P_{max}	Pressió màxima estimada	67 bar
P_{min}	Pressió mínima estimada	7 bar
T_{max}	Temperatura màxima	900 K
T_{min}	Temperatura mínima	300 K
f	Freqüència	12,5 Hz
V_{pc}	Volum pistó calent o de potència	619,2 cm^3
k_p	Relació de volums de pistons	1,1
V_{pf}	Volum pistó fred o desplaçador	562,9 cm^3

V_{max}	Volum màxim	900,65 cm^3
V_{min}	Volum mínim	280,45 cm^3
r_{vol}	Relació de volums màxim i mínim	0,313
α	Desfasament de pistons	90 º

Els pistons, per tal d'oferir un màxim rendiment han de tenir el doble de longitud que de diàmetre. A part, el pistó calent, ha de tenir l'extrem esfèric, ja que treballem a altes temperatures i d'aquesta manera reduirem l'excés de tensions.

Per tant el pistó haurà de tenir la següent mida:

$$V_{pc} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot 2D = 619{,}2\ cm^3 \rightarrow D = 7{,}33\ cm$$

L'altura serà de 14,66 cm.

En canvi el pistó fred serà completament cilíndric i tindrà les següents dimensions.

$$V_{pc} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot 2D = 562{,}9\ cm^3 \rightarrow D = 7{,}1\ cm$$

L'altura serà de 14,2 cm.

A2.2 - Balanç energètic del cicle teòric Stirling

En primer lloc definirem els quatre punts del cicle:

$$V_{max} = V_1 = V_4 = 900{,}65\ cm^3$$

$$V_{min} = V_2 = V_3 = 281{,}45\ cm^3$$

$$T_{max} = T_3 = T_4 = 900\ K$$

$$T_{min} = T_1 = T_2 = 300\ K$$

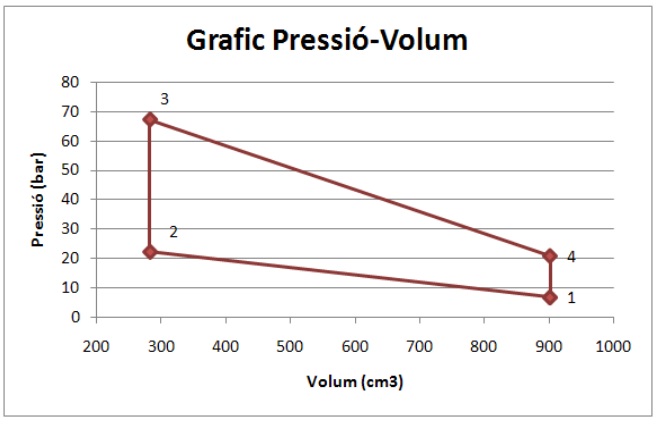


Fig.A2.2 Gràfica pressió-volum del cicle Stirling teòric

A partir de la fórmula dels gasos ideals, usant la pressió mínima de 7 bars, i sabent que la massa molar de l'heli (més endavant s'explica perquè usem aquest gas) es de 4 g/mol, trobem totes les dades:

$$[F.A2.7]\ P \cdot V = \frac{m}{M_m} \cdot R \cdot T$$

On: P=Pressió (Pa)
V = Volum (m3)
m = Massa d'heli (kg)
Mm = Massa molar (Kg/mol)
R = Constant dels gasos ideals (J/mol·K)
T = Temperatura (K)

$$Punt\ 1 \rightarrow\ m = \frac{P_1 V_1 M_m}{R \cdot T_1} = \frac{7 \cdot 10^5 \cdot 900{,}65 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{8{,}314 \cdot 300} = 0{,}00101\ kg = 1{,}01\ g \approx 1\ g$$

$$Punt\ 2 \rightarrow\ P_2 = \frac{m \cdot R \cdot T_2}{V_2 \cdot M_m} = \frac{0{,}001 \cdot 8.314 \cdot 300}{281{,}45 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}004} = 2240000\ Pa\ \approx 22{,}4\ bar$$

$$Punt\ 3 \rightarrow\ P_3 = \frac{m \cdot R \cdot T_3}{V_3 \cdot M_m} = \frac{0{,}001 \cdot 8.314 \cdot 900}{281{,}45 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}004} = 6720000\ Pa\ \approx 67{,}2\ bar$$

$$Punt\ 4 \rightarrow\ P_4 = \frac{m \cdot R \cdot T_4}{V_4 \cdot M_m} = \frac{0{,}001 \cdot 8.314 \cdot 900}{900{,}65 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}004} = 2100000\ Pa\ \approx 21\ bar$$

Resum de dades:

Punt	Volum (cm3)	Pressió (bar)	Temperatura (K)
1	900,65	7	300
2	280,45	22,4	300
3	280,45	67,2	900
4	900,65	21	900

Taula.A2.3 Taula resum de dades del cicle teòric

Ara que ja tenim les condicions en les que ha de treballar el motor, veurem l'energia necessària per fer-lo treballar d'aquesta manera.

Expansió isotèrmica; en aquest punt es on s'ha de recollir l'escalfor del sol:

$$[F.A2.8]\ Q_{34} = \frac{m}{Mm} \cdot R \cdot T_{max} \cdot \ln\left(\frac{1}{r_v}\right) = \frac{0{,}001}{0{,}004} \cdot 8{,}314 \cdot 900 \cdot \ln\left(\frac{1}{0{,}313}\right) = 2199{,}94\ J$$

Compressió isotèrmica; és el calor que hem d'evacuar per refredament:

$$[F.A2.9]\ Q_{12} = \frac{m}{Mm} \cdot R \cdot T_{min} \cdot \ln(r_v) = \frac{0{,}001}{0{,}004} \cdot 8{,}314 \cdot 300 \cdot \ln(0{,}313) = -733{,}31\ J$$

Escalfament isocòric; calor que el regenerador ha de cedir al fluid:

$$[F.A2.10]\ Q_{23} = \frac{m}{Mm} \cdot R \cdot C_v \cdot (T_{max} - T_{min}) = \frac{0{,}001}{0{,}004} \cdot 8{,}314 \cdot 3{,}117 \cdot (900 - 300) = 3887{,}21\ J$$

Refredament isocòric; calor que el regenerador ha d'absorbir del fluid:

$$[F.A2.11]\ Q_{41} = \frac{m}{Mm} \cdot R \cdot C_v \cdot (T_{min} - T_{max}) = \frac{0{,}001}{0{,}004} \cdot 8{,}314 \cdot 3{,}117 \cdot (300 - 900) = -3887{,}21\ J$$

Tindrem un rendiment teòric màxim, o rendiment de Carnot, de:

$$[F.A2.12]\ \eta_c = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} = 1 - \frac{300}{900} = 0{,}66 = 67\%$$

Per tant tenim un treball útil de:

$$[F.A2.13]\ Wu = \eta_c \cdot Q_{34} = Q_{34} + Q_{12} = 1466{,}62\ J$$

Això fa que tinguem una potència útil teòrica de sortida de:

$$[F.A2.14]\ \ P_u = W_u \cdot f = 18{,}33\ Kw$$

La potència útil calculada, encara dista molt de la potència real estimada, encara se li han d'incloure pèrdues tals com l'absorció del calor, el regenerador, el refrigerador,...

Considerant que el motor Stirling acostuma a treballar al 45% del rendiment de Carnot, la potència real se situarà sobre:

$$[F.A2.15]\ P_{real} = P_u \cdot 0{,}45 \cdot 0{,}67 = 5{,}5\ Kw$$

A2.3 - Captador Solar

Tal i com hem esmentat anteriorment, la captació solar es produeix en el pas 3,4 i hem de ser capaços d'arribar a una potència de:

$$[F.A2.16]\ P_{nec} = Q_{34} \cdot f = 2199{,}94 \cdot 12{,}5 = 27{,}5\ kW$$

La irradiació solar màxima a la superfície terrestre, se situa en uns 1100 W/m2, i a Espanya, es podria situar entre el 600 i els 850 W/m2.

Podem dir que necessitem una area de captació, i un diàmetre equivalent de parabòlica de:

$$[F.A2.17]\ A_c = \frac{P_{nec}}{I_{ss}} = \frac{27500}{850} = 32{,}35\ m^2$$

$$[F.A2.18]\ \ D_c = 2 \cdot \frac{\sqrt{A_c}}{\pi} = 6{,}26\ m$$

Per motius de disseny, la nostra parabòlica fa 30,8 m^2 i no és rodona, més aviat és quadrada, per tant es perdrà part de l'energia en aquest punt. A continuació es mostren les dades del captador solar.

Dades del captador solar		
Potència a absorbir	27,5	Kw
Irradiació	850	W/m2
Parabòlica	30,8	m2
Potència absorbida	26,2	Kw
Reflexió	94,4	%
Rendiment del seguiment	97,5	%
Potència enviada al concentrador	24,11	kW

El concentrador d'energia tindrà un costat de 24 cm. A la taula següent es mostra la superfície, la concentració d'irradiació solar, els sols i la potència que rep.

Dades del concentrador d'energia		
Costat	24	cm
Superfície	576	cm^2
Concentració Solar	535	Sols
G (Irradiació Solar sobre el concentrador)	418606	W/m^2
Potència rebuda	24112	W
Calor rebuda	1928,94	J/cicle

En el camp de la captació solar, el terme "Sols" indica les vegades que concentrem el sol, surt de la divisió de l'àrea del captador i l'àrea del concentrador.

Passem en aquest punt a dimensionar els tubs de captació

Dades del entramat de tubs de captació	
Radi Interior	0,15 cm
Radi Exterior	0,3 cm
Longitud	0,24 cm
Tubs	40 Tubs
Volum mort	67,86 cm^3
Superfície plana ocupada	576 cm^2
Superfície de contacte exterior	905 cm^2

El material escollit per fer el concentrador es el WASPALOY amb base de níquel, aquest proporciona una emissivitat molt baixa, una conducció de calor acceptable, i un punt de fusió molt alt, que ens permet treballar a altes temperatures.

Propietats del INCONEL®	
k conductivitat	90,7 W/mK
Emissivitat	0,059
Punt de Fusió	1552 ºC
	1825 K

Per fer uns càlculs aproximats farem ús de les formules de transferència de calor, tenint com a cas un tub irradiat en el qual i circula un fluid, en el nostre cas l'heli. Amb la calor que rep el dispositiu, es calcula la calor que es radia i la calor que absorbeix el fluid. La primera però no es perd totalment, es queda a la cambra on hi ha el concentrador i es va escalfant l'aire, el qual fa que la potència radiada descendeixi, aquesta s'estima en un 60% de la temperatura del tub. Les potències mostrades a continuació són per cada un dels tubs.

$$[F.A2.19]\ r_{conveccio} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{ti} \cdot l_t \cdot h_c} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0{,}0015 \cdot 0{,}24 \cdot 905} = 0{,}488$$

$$[F.A2.20]\ r_{conduccio} = \frac{\ln\left(\frac{r_{te}}{r_{ti}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot K_t \cdot l_t} = \frac{\ln\left(\frac{0{,}003}{0{,}0015}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 90{,}7 \cdot 0{,}24} = 0{,}00507$$

$$[F.A2.21]\ Q_{rebuda} - Q_{radiada} - Q_{absorbida} = 0$$

$$[F.A2.22]\ Q_{rebuda} = \frac{Q_{total,rebuda}}{Nº\ tubs} = \frac{24112}{40} = 602{,}79\ W$$

$$[F.A2.23]\ Q_{radiada} = \varepsilon_p \cdot \sigma_B \cdot S_c \cdot \left(T_p^4 - T_c^4\right)$$
$$= 0{,}059 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 0{,}707 \cdot \left({T_p}^4 - \left(T_p \cdot 0{,}6\right)^4\right)$$

$$[F.A2.24]\ Q_{absorbida} = \frac{T_p - T_f}{r_{conveccio} + r_{conduccio}} = \frac{T_p - 900}{0{,}488 + 0{,}00507}$$

Igualant les formules trobem una temperatura del tub de 1191 K, o 918 ºC, temperatura suportable pel WASPALOY material escollit.

La potència absorbida i radiada queda de la següent manera.

$$Q_{absorbida} = 589{,}58\ W/tub$$

$$Q_{radiada} = 13{,}25\ W/tub$$

La calor absorbida correspon a la tubera, considerem que aquesta un cop esta a màxima temperatura, havent fet uns quants cicles, es transfereix gairebé tota a l'heli. La eficiència del concentrador és de:

$$[F.A2.25]\ \eta_{tuberia} = \frac{589{,}58\ W}{602{,}79\ W} \cdot 100 = 97\ \%$$

El volum mort que representa el concentrador solar es:

$$[F.A2.26]\ V_{mc} = \pi \cdot r_{ti}^2 \cdot l_t \cdot N_{tubs} = \pi \cdot 0{,}15^2 \cdot 24 \cdot 40 = 67{,}86\ cm^3$$

La potència total absorbida per l'heli es:

$$[F.A2.27]\ Q_{absorbida} = 23{,}58\ kW$$

Pel que respecte a la parabòlica dissenyada, a la reflectivitat dels miralls i al concentrador, el rendiment és:

$$[F.A2.28]\ \eta_{captador} = \frac{Q_{absorbida}}{Q_{necesaria}} \cdot 100 = 89{,}7\ \%$$

A2.4 - Refrigeració

La refrigeració es produeix en el pas 1-2, en aquest hem de ser capaços de dissipar 9,1 KW, per tal de poder completar el cicle Stirling.

El sistema és similar al captador solar, un seguit de tubs separats, per on hi circula l'heli, que sotmesos a un corrent de vent extern, provocat per un ventilador, s'emporta el calor.

A continuació es mostra la taula amb la potència i el calor a dissipar i les dades que necessitem per trobar la solució.

Requeriments del sistema de refrigeració	
Q_{12} a refrigerar	-733,31 J
f (cicles/s)	12,5 Hz
Potència a dissipar	9166 W

Dades necessàries per als càlculs	
T ambient	300 K
T tub - Aprox. T. Heli	360 K
mhu (Viscositat aire)	2,08E-05
rho (densitat aire)	0,995 Kg/m3
Prandtl (aire)	0,7
k (conductivitat aire)	0,01 W/mK
Velocitat Vent	12 m/s

Les tuberes tindran les següents dimensions, a part, també s'exposa les distàncies que hi hauran entre elles.

Dimensionat del refrigerador	
nombre de tubs	20
Longitud del tub	0,3 m
Distancia entre tuberes (ST)	0,06 m
Diàmetre	0,006 m
Paret	0,0015 m
Volum mort	42,4 cm^3

Calculem el coeficient de convecció que tindrem en les parets del tub. En primer lloc, quan tenim un entramat de tubs, la velocitat del vent augmenta, ja que la secció per la que ha de passar es redueix, calculem en quant augmenta aquesta.

$$[F.A2.29]\ V_{pas} = \frac{V_{vent} \cdot d_{tubs}}{d_{tubs} - D_{tub}} = \frac{12 \cdot 0{,}06}{0{,}06 - 0{,}006} = 13{,}33\ m/s$$

A continuació es calcula el numero de Reynolds i el numero de Nusselt.

$$[F.A2.30]\ Re = \frac{\rho_{aire} \cdot V_{pas} \cdot D_{tub}}{\mu_{aire}} = \frac{0{,}995 \cdot 13{,}33 \cdot 0{,}006}{2{,}08 \cdot 10^{-5}} = 3823$$

Per a un flux extern perpendicular a un cilindre, el numero de Nusselt es calcula a partir d'una taula que està en funció del numero de Reynolds.

Reynolds	C	m
0,4-4	0,989	0,330
4-40	0,911	0,385
40-4.000	0,683	0,466
4.000-40.000	0,193	0,618
40.000-400.000	0,027	0,805

$$[F.A2.31]\ Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^{1/3} = 0{,}683 \cdot 3823^{0{,}466} \cdot 0{,}7^{1/3} = 28{,}32$$

Finalment ja estem en disposició de calcular el coeficient de convecció.

$$[F.A2.32]\ h = \frac{Nu \cdot k}{D_{tub}} = \frac{28{,}32 \cdot 0{,}01}{0{,}006} = 47{,}21\ \frac{W}{m^2K}$$

La superfície de contacte d'un tub és molt baixa, per aquest motiu s'ha de fer un sistema d'aletes. Amb aquest aconseguirem tenir una gran àrea de contacte amb l'aire i dissipar així la potència necessària. Les aletes tindran la següent forma:

Aletes		
Diàmetre	2,8	cm
Gruix	0,15	cm
Area lateral (2 costats)	11,75	cm2
Area longitudinal	1,32	cm2
Separació entre elles	0,15	cm
Nombre	100,00	
Superficie Total	1335,18	cm2

La potència dissipada per tub es calcula de la següent manera.

$$[F.A2.33]\ Q_{dissipada} = (T_{tub} - T_a) \cdot S_{contacte} \cdot h = (360 - 300) \cdot 0{,}1335 \cdot 47{,}21 = 378{,}215\ W$$

$$[F.A2.34]\ Q_{dissipada,total} = Q_{dissipada} \cdot N_{tubs} = 7564\ W$$

$$[F.A2.35]\ \eta_{refrigerador} = \frac{7564}{9166} \cdot 100 = 82{,}5\%$$

Pel que fa al ventilador que hem de col·locar, ens ha de donar un caudal d'aire de:

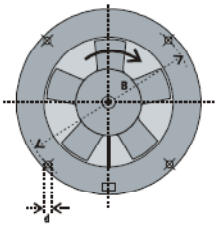
$$[F.A2.36]\ Q_{aire} = V_{aire} \cdot S = 12\frac{m}{s} \cdot 0{,}3 \cdot 5(0{,}06 + 0{,}006) = 1{,}18\frac{m^3}{s}$$

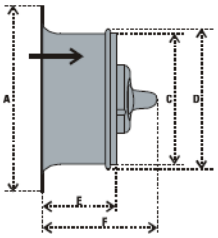
El ventilador seleccionat es del tipus axial, de la casa *"Siemens"*, les característiques són:

Tipus	Diàmetre [mm]	Caudal [m3/s]	Potència [W]	Intensitat [A]	Nivell de soroll [dB]	Pes [Kg]
2CC2 404-5YC3	400	1,45	220	3,2	74	8

Img.A2.4 Ventilador seleccionat

Tipo	A	B	C	D	E	F	d
2CC2 254-5YC3	360	340	252	262	145	215	10.5
2CC2 314-5YC3	430	410	318	328	145	238	10.5
2CC2 354-5YC3	465	445	356	366	145	236	10.5
2CC2 404-5YC3	515	490	402	412	145	234	10.5
2CC2 404-5YB6	515	490	402	412	145	205	10.5





Img.A2.5 Taula de les mides del ventilador

A2.5- Regenerador

El regenerador es separa en dues parts, absorció de calor del fluid i la transferència de calor al fluid. Per dimensionar el regenerador tindrem en compte l'absorció de calor del fluid.

Com ja hem comentat abans, es transfereix calor en el pas 4,1, hem de transferir la següent quantitat de calor al regenerador cada cicle:

$$Q_{41} = \frac{m}{Mm} \cdot R \cdot C_v \cdot (T_{min} - T_{max}) = \frac{0{,}001}{0{,}004} \cdot 8{,}314 \cdot 3{,}117 \cdot (300 - 900)$$
$$= -3887{,}21\ J$$

En Primer lloc definirem les propietats que necessitarem de l'heli i les condicions en que treballarem.

Heli		
Símbol	**Valor**	**Unitats**
m	0,001	g
$\dot{m}$ (Caudal)	0,00002	Kg/s
Cv	3177	J/Kg·K

Relació entre temperatures, pressions i conductivitat del heli															
T (K)	800	770	740	710	680	650	620	590	560	530	500	470	440	410	380
P (bars)	59,1	55,4	51,7	48,0	44,3	40,6	36,9	33,2	29,5	25,8	22,2	18,5	16,5	14,8	12,3
k (W/mK)	0,31	0,29	0,28	0,27	0,25	0,24	0,22	0,21	0,19	0,17	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10

També hem de definir les unitats que utilitzarem del coure, la densitat i el calor específic.

Coure		
Símbol	**Valor**	**Unitats**
ρ	8933	Kg/m^3

Relació entre temperatures i capacitat calorífica del coure															
T (K)	800	770	740	710	680	650	620	590	560	530	500	470	440	410	380
C (J/Kg·K)	433	428	423	418	413	408	403	398	393	388	383	378	373	368	365

A part de totes aquestes dades dels materials, també en definirem unes altres, que fan referència a les condicions en que treballa el regenerador i la seva forma. La secció correspon a un entramat de tubs de secció quadrada.

Condicions de treball del regenerador		
Símbol	**Valor**	**Unitats**
Nu (Nombre de Nusselt)	8,24	
τ (Període de pas)	0,02	s
δ (Espessor de la lamina)	0,04	cm
S_l (Separació entre lamines)	0, 3	cm

Definim també alguns càlculs que seran constants, al llarg del dimensionament:

- Diàmetre Hidràulic:

$$[F.A2.37]\ D_h = 2 \cdot \Delta = 2 \cdot (S_l - \delta) = 2 \cdot (0{,}003 - 0{,}0004) = 0{,}0052\ m$$

- Perímetre equivalent:

$$[F.A2.38]\ \wp = (Nº\ Voltes) \cdot (Longitud\ mitja\ per\ volta) \cdot (2\ Costats)$$

$$= \left(\frac{R}{S_l}\right)(\pi \cdot R)(2) = \frac{2 \cdot \pi \cdot R^2}{0{,}003} = 2094{,}39 \cdot R^2\ \ m^2$$

- Percentatge de Secció de coure

$$[F.A2.39]\ S_{c=} \frac{0{,}0004}{0{,}0004+0{,}003} \cdot 100 = 11{,}76\ \%$$

- Percentatge de Secció de buit

$$[F.A2.40]\ S_{b=} \frac{0{,}003}{0{,}0004+0{,}003} \cdot 100 = 88{,}24\ \%$$

Ara ja podem procedir amb els càlculs, tal i com hem explicat, en el regenerador, es produeix un gradient tèrmic, per tant els càlculs es fan per trams. A partir d'aquí s'exposen els càlculs del primer tram:

Coeficient de convecció:

$$[F.A2.41]\ h_c = \frac{k}{D_h} \cdot Nu = \frac{0{,}311}{0{,}0052} \cdot 8{,}24 = 492{,}82\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Nombre d'unitats de transferència:

$$[F.A2.42]\ N_{ut} = \frac{h_c \cdot \wp \cdot L}{\dot{m} \cdot C_p} = \frac{492{,}82 \cdot 2094{,}39 \cdot R^2 \cdot L}{0{,}00002 \cdot 5195} = 9933939{,}71 \cdot R^2 \cdot L$$

Nombre adimensional R_R:

$$[F.A2.43]\ R_R = \frac{\rho \cdot c \cdot \delta_{1/2} \cdot \wp \cdot L}{\dot{m} \cdot C_p \cdot \tau} = \frac{8933 \cdot 433 \cdot 0{,}0002 \cdot 2049{,}39 \cdot R^2 \cdot L}{0{,}00002 \cdot 5195 \cdot 0{,}02}$$
$$= 779699468{,}1 \cdot R^2 \cdot L$$

Dissenyem la següent taula de iteracions, en primer lloc donem un valor a R_R i trobem $R^2 \cdot L$, a partir d'aquí ja podem saber N_{ut}, i amb la ajuda de la taula trobem la Eficiència. Per últim mirem la longitud necessària per un radi determinat, busquem un valor de eficiència superior al 90%.

Taula d'iteracions				
R_R	**$R^2 \cdot L$**	**N_{ut}**	**ε**	**Longitud R = 2 cm**
1	0,0013	0,01	< 0,5	0,0003
100	0,128	1,27	0,57	0,032
500	0,641	6,37	0,87	0,16
1000	1,282	12,74	0,92	0,321
1300	1,667	16,56	0,94	0,417

A partir del nivell d'eficiència, podem saber la temperatura a la que surt el fluid, sabent a la temperatura que entra i la temperatura mitja del tub.

$$[F.A2.44]\ \varepsilon = \frac{T_{hs} - T_{he}}{T_M - T_{he}} \rightarrow T_{hs} = \varepsilon(T_M - T_{he}) + T_{he} = 0{,}94(830 - 900) + 900$$
$$= 834{,}2\ K$$

On: TM és la temperatura mitja de la matriu en aquest tram

Ths és la temperatura de sortida del heli
The és la temperatura d'entrada del heli

Calculem la quantitat de calor que el fluid ha perdut, per tant que a transferit al entramat de coure o matriu:

$$[F.A2.45]\ Q_{ced} = \frac{Cv \cdot R \cdot m}{M_m} \cdot (T_{hs} - T_{he}) = \frac{3{,}177 \cdot 8{,}314 \cdot 0{,}001}{0{,}004} \cdot (834{,}2 - 900) = -434{,}5\ J$$

$$[F.A2.46]\ Q_{abs} = |Q_{ced}| = 434{,}5\ J$$

Mesurem la massa de coure d'aquest tram i veurem el que s'ha escalfat:

$$[F.A2.47]\ m_{ct1} = V_c \cdot \rho = \pi \cdot R^2 \cdot L \cdot S_c \cdot \rho = \pi \cdot 0{,}02^2 \cdot 0{,}00417 \cdot 0{,}1176 \cdot 8933 = 0{,}055\ Kg$$

$$[F.A2.48]\ T_{Mf} = \frac{Q_{abs}}{m \cdot c} + T_{Mi} = \frac{434{,}5}{0{,}0055 \cdot 433} + 700 = 882\ K$$

Estem en disposició de calcular la temperatura mitja d'aquest tram, que tornarà a baixar quan passi el fluid per endur-se la calor del regenerador.

$$[F.A2.49]\ T_M = \frac{T_{Mi} + T_{Mf}}{2} = 791\ K$$

Com és de suposar, al començament del dia la temperatura inicial de la matriu no és de 700 K, arribat a aquest punt s'hi estabilitza desprès d'haver fet varis cicles.

Trams		1	2	3	4	5	6	7	8
h_c	$W/(m^2 \cdot K)$	492,82	470,63	448,45	426,26	402,49	378,72	353,37	328,02
N_{ut}	$[R^2 \cdot L]$	9,9E+06	9,5E+06	9,0E+06	8,6E+06	8,1E+06	7,6E+06	7,1E+06	6,6E+06
R_R	$[R^2 \cdot L]$	7,8E+08	7,7E+08	7,6E+08	7,5E+08	7,4E+08	7,3E+08	7,3E+08	7,2E+08
R_R	--	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
$R^2 \cdot L$	--	1,667	1,687	1,707	1,727	1,748	1,769	1,791	1,814
N_{ut}	--	16,56	16,00	15,43	14,84	14,18	13,51	12,76	11,99
L	cm	0,42	0,42	0,43	0,43	0,44	0,44	0,45	0,45
ε	--	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,91
T_M	K	830	798	766	734	701	669	637	605
T_{he}	K	900	834	800	768	736	704,2	672,1	640,0
T_{hs}	K	834,2	800,0	768,1	736,0	704,2	672,1	640,0	608,2
Q_{ced}	J	-434,50	-225,57	-210,77	-212,13	-209,94	-212,05	-212,22	-209,93
Q_{abs}	J	434,50	225,57	210,77	212,13	209,94	212,05	212,22	209,93
m_{ctx}	Kg	0,0055	0,0056	0,0056	0,0057	0,0058	0,0058	0,0059	0,0060
T_{Mi}	K	700	720	690	660	630	600	570	540
T_{Mf}	K	882	815	778	749	718	689	659	628
T_M	K	791	767	734	704	674	644	615	584

Trams		9	10	11	12	13	14	15
h_c	$W/(m^2 \cdot K)$	301,08	274,14	247,20	220,26	193,32	174,31	158,46
N_{ut}	$[R^2 \cdot L]$	6,1E+06	5,5E+06	5,0E+06	4,4E+06	3,9E+06	3,5E+06	3,2E+06
R_R	$[R^2 \cdot L]$	7,1E+08	7,0E+08	6,9E+08	6,8E+08	6,7E+08	6,6E+08	6,6E+08
R_R	--	1300	1300	1301	1302	1303	1304	1305
$R^2 \cdot L$	--	1,837	1,861	1,886	1,913	1,940	1,968	1,986
N_{ut}	--	11,15	10,28	9,40	8,49	7,56	6,91	6,34
L	cm	0,46	0,47	0,47	0,48	0,48	0,49	0,50
ε	--	0,90	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85
T_M	K	573	541	509	476	444	412	380
T_{he}	K	608,2	576,4	544,3	512,5	480,8	449,1	417,3
T_{hs}	K	576,4	544,3	512,5	480,8	449,1	417,3	385,6
Q_{ced}	J	-209,70	-211,98	-209,85	-209,59	-209,51	-209,44	-209,38
Q_{abs}	J	209,70	211,98	209,85	209,59	209,51	209,44	209,38
m_{ctx}	Kg	0,0061	0,0061	0,0062	0,0063	0,0064	0,0065	0,0066
T_{Mi}	K	510	480	450	420	390	360	330
T_{Mf}	K	598	569	538	508	478	448	418
T_M	K	554	524	494	464	434	404	374

A la taula superior es poden veure tots els càlculs realitzats anteriorment fets per a cada un dels trams, a continuació es mostren les dimensions finals del regenerador.

L (cm)	D (cm)	Volum Total (cm^3)	Volum Coure (cm^3)	Volum Mort (cm^3)
6,825	4	85,77	10,09	75,68

El calor que el fluid cedeix a la matriu és de 3396,55 J/cicle. Això ens proporciona el següent rendiment:

$$[F.A2.50]\ \eta_{regenerador,1\ pas} = \frac{3396{,}55}{3887{,}21} \cdot 100 = 87{,}3\%$$

Aquest rendiment però, varia perquè tenim el camí d'anada i tornada, per tant el rendiment real del regenerador és:

$$[F.A2.51]\ \eta_{regenerador} = \eta_{regenerador,1pas}{}^{2} = 76{,}21\ \%$$

A2.6 - Balanç energètic del cicle Stirling, tenint en compte els rendiments de cada cicle

Per començar, mostrarem la taula resum dels apartats anteriors, amb els rendiments que tenim i els volums morts.

Cicle	Rendiment (%)	Volum Mort (cm3)
Captador d'energia	97,5	67,86
Refrigerador	82,5	42,4
Regenerador	76,21	75,68
Volum mort Total		**185,94**

Els volums màxims i mínims del cicle han variat, ja que tenim un volum mort, aquests han canviat de la següent manera:

$$[F.A2.52]\ V_{max} = V_1 + V_{mort} = V_4 + V_{mort} = 900{,}65{+}185{,}94 = 1086{,}59\ cm^3$$

$$[F.A2.53]\ V_{min} = V_2 + V_{mort} = V_3 + V_{mort} = 281{,}45{+}185{,}94 = 477{,}39\ cm^3$$

A partir de la fórmula dels gasos ideals, usant la pressió mínima de 7 bars i sabent que la massa molar de l'heli es de 4 g/mol, trobem totes les dades:

$$P \cdot V = \frac{m}{M_m} \cdot R \cdot T$$

On: P=Pressió (Pa)
V = Volum (m3)
m = Massa d'heli (kg)
Mm = Massa molar (Kg/mol)
R = Constant dels gasos ideals (J/mol·K)
T = Temperatura (K)

$$Punt\ 1 \rightarrow\ m = \frac{P_1 V_1 M_m}{R \cdot T_1} = \frac{7 \cdot 10^5 \cdot 1086{,}59 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{8{,}314 \cdot 300} = 0{,}00122\ kg = 1{,}22\ g$$

Per tal de no tenir tantes pèrdues, el que farem és incrementar la quantitat d'heli que teníem a 1'22 grams.

$$Punt\ 2 \rightarrow\ P_2 = \frac{m \cdot R \cdot T_2}{V_2 \cdot M_m} = \frac{0{,}0012 \cdot 8.314 \cdot 300}{477{,}39 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}004} = 2240000\ Pa\ \approx 15{,}9\ bar$$

$$Punt\ 3 \rightarrow\ P_3 = \frac{m \cdot R \cdot T_3}{V_3 \cdot M_m} = \frac{0{,}001 \cdot 8.314 \cdot 900}{477{,}39 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}004} = 6720000\ Pa\ \approx 47{,}8\ bar$$

$$Punt\ 4 \rightarrow\ P_4 = \frac{m \cdot R \cdot T_4}{V_4 \cdot M_m} = \frac{0{,}001 \cdot 8.314 \cdot 900}{1086{,}59 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}004} = 2100000\ Pa\ \approx 21\ bar$$

Resum de dades:

Punt	Volum (cm3)	Pressió (bar)	Temperatura (K)
1	1086,59	7	300
2	477,39	15,9	300
3	477,39	47,8	900
4	1086,59	21	900

Es pot observar com les pressions màximes han caigut considerablement, de 67,2 bars a 47,8 bars, aquest descens de pressió provocarà també un descens en el treball útil del cicle.

Expansió isotèrmica; en aquest punt es on s'ha de recollir l'escalfor del sol:

$$Q_{34} = \frac{m}{Mm} \cdot R \cdot T_{max} \cdot \ln\left(\frac{1}{r_v}\right) = \frac{0{,}001}{0{,}004} \cdot 8{,}314 \cdot 900 \cdot \ln\left(\frac{1}{0{,}439}\right) = 1876{,}73\, J$$

Compressió isotèrmica; és el calor que hem d'evacuar per refredament:

$$Q_{12} = \frac{m}{Mm} \cdot R \cdot T_{min} \cdot \ln(r_v) = \frac{0{,}001}{0{,}004} \cdot 8{,}314 \cdot 300 \cdot \ln(0{,}439) = -625{,}58\, J$$

Escalfament isocòric; calor que el regenerador ha de cedir al fluid:

$$Q_{23} = \frac{m}{Mm} \cdot R \cdot C_v \cdot (T_{max} - T_{min}) = \frac{0{,}001}{0{,}004} \cdot 8{,}314 \cdot 3{,}117 \cdot (900 - 300) = 3887{,}21\, J$$

Refredament isocòric; calor que el regenerador ha d'absorbir del fluid:

$$Q_{41} = \frac{m}{Mm} \cdot R \cdot C_v \cdot (T_{min} - T_{max}) = \frac{0{,}001}{0{,}004} \cdot 8{,}314 \cdot 3{,}117 \cdot (300 - 900) = -3887{,}21\, J$$

Per tant tenim un treball útil de:

$$Wu = \eta_c \cdot Q_{34} = Q_{34} + Q_{12} = 1251{,}16\, J$$

Això fa que tinguem una potència útil de sortida de:

$$P_u = W_u \cdot f = 15{,}64\, Kw$$

Fins aquest punt només hem aplicat les pèrdues per volums morts. Ara aplicarem les pèrdues pels rendiments del cicles.

$$Q_{34,real} = Q_{34} \cdot \eta_{tuberia} = 1876{,}73 \cdot 0{,}90 = 1689{,}06\, J$$

$$Q_{12,real} = Q_{12} / \eta_{refrigerador} = -625{,}58/0{,}825 = -758{,}27\, J$$

Per trobar el rendiment del motor, hem de dividir el calor útil, que és el calor que absorbim en el concentrador menys el calor que hem de cedir en el refrigerador, això dividit pel calor que hem d'absorbir, més el calor que perdem en el regenerador, potència que s'ha de suplir amb la captació solar.

$$\eta_{termic,motor} = \frac{Q_u}{Q_a} = \frac{R \cdot \Delta T \cdot \ln r}{R \cdot T_{max} \cdot \ln r + (1 - e) \cdot C_v \cdot \Delta T} = \frac{1689{,}06 - 758{,}27}{1689{,}06 + (1 - 0{,}76) \cdot 3887{,}21} = 35{,}5\ \%$$

Així doncs de forma estimada, s'ha de contar que el sistema també te pèrdues mecàniques i pèrdues per transferència de calor en altres punts, com els pistons o els tubs d'enllaç. Les pèrdues mecàniques es poden avaluar en un 10% i les tèrmiques en un 5% ja que recobrirem totes les parts necessàries amb un aïllant de llana de roca, capaç d'aguantar temperatures superiors a 1000ºC. D'altra banda hem de tenir en compte la potència que consumeix el ventilador, és de 220 W.

Tal i com hem esmentat anteriorment la potència que ens arriba al concentrador es de 24,12 kW. Amb lo qual la potència que generem és de:

$$P_{generada} = P_{generada} \cdot \eta_{termic,motor} \cdot \eta_{mecanic} \cdot \eta_{termic} - P_{ventilador}$$
$$= 24{,}12 \cdot 0{,}355 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}95 - 0{,}22 = 7{,}1\ kW$$

$$\eta_{motor} = \frac{P_{generada}}{P_{absorbida}} \cdot 100 = \frac{7{,}1}{24{,}12} \cdot 100 = 29{,}4\ \%$$

Dada molt similar a l'estimació que hem fet d'un rendiment del motor Stirling del 30%. Tot i això, aquesta encara no es la captació final, ja que se li hauran de restar, en apartats posteriors, la potència consumida pels sistemes de seguiments, les pèrdues del generador elèctric, i algun altre terme.

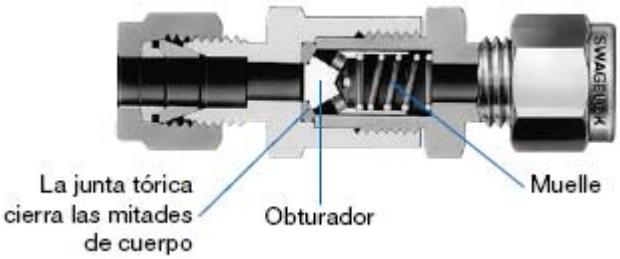
A2.7 - Disseny mecànic del motor Stirling

A2.7.1 - Components especials del Motor

El motor Stirling dissenyat treballa a 60 bars de pressió, això crea un problema a l'hora de sellar el sistema, perquè a dins i tenim heli. El principal problema el trobem en la sortida del eix, aquesta és mòbil. A continuació és mostren les solucions adoptades en cada un dels elements del motor.

El motor es fa amb tancament pressuritzat, tant en la part inferior del pistó com en la part superior tenim heli a pressió, en la part inferior l'heli el trobem a la pressió mitja del cicle. Per a la introducció de l'heli s'hi col·loquen dues vàlvules antiretorn, una a la part inferior i l'altre a la sortida del pistó calent. Les vàlvules de la casa *"Swagelok"* sèrie 2C són capaces d'aguantar pressions de 68,9 bars. Aquestes vàlvules es col·loquen amb una junta tòrica per sellar el tancament.

El tancament pressuritzat es fa per dos motius, el primer per reduir el diferencial de pressions entre els dos costats del pistó i que aquest no pateixin tant. En segon lloc i més important per no tenir escapaments de pressions, un cop parem el motor, les pressions inferiors i superiors s'igualen, el pistó calent deixa de treballar i es refreda, aquest pistó es dissenya mínimament menor que la camisa, perquè al escalfar-se s'hi adapti perfectament. És en aquest punt on hi pot haver moviment d'heli entre la part superior i l'inferior, s'hi tenim les diferents parts a la mateixa pressió no és problema, del contrari perdríem tota la pressió a la part superior.



Img.A2.6. Vàlvula antirretorn

La sortida de l'eix la fem a traves d'un retén, de la casa *"GAT®"* model SW40, són capaços d'aguantar pressions de 70 bars girant a 6000 rpm. En el nostre cas, hem d'aguantar pressions entre 60 i 45 bars de màxima girant a 750 rpm.

Img.A2.7. Reten casa GAT®

Les unions dels diferents elements, així com els cilindres amb el bloc motor, es fan a partir de juntes. Aquestes han d'aguantar altes temperatures i elevades pressions. Les juntes necessàries les trobem a la casa *"LATTY®"*, en el model LATTYgraf EFA, aquestes estan compostes per dos capes de grafit expandit del 98%, laminat i pressionat sobre una capa perforada d'acer inoxidable. Aquestes són capaces d'aguantar temperatures de 650ºC i pressions de 650 bars. També tenen la propietat de no deixar passar calor entre els diferents elements. Millorant així el rendiment del motor.

Img.A2.8. Material per a les juntes

El motor Stirling, al igual que la resta de motors de combustió necessita lubricació, aquesta es disposa al motor per una ranura superior, col·locada al bloc motor i s'extrau per sota un cop cada dos anys. Al ser un motor poc desenvolupat, no disposa de lubricants molt específics, amb lo qual es fa servir un lubricant universal per a motors de combustió.

Els pistons, com es pot observar als plànols corresponents, incorporen tres anells, dos d'ells són anells de compressió, per sellar el tancament, l'altre amb una forma sinusoïdal i col·locat sota els de compressió s'encarrega de repartir l'oli a tota la camisa.

La distribució de l'oli als pistons la farà el mateix cigonyal, esquitxant oli amb unes pales, quan el pistó es troba en la seva part més elevada. El nivell d'oli el determinen les pales.

Per últim, la subjecció del motor es fa a traves de silenblocs, aquests fets de goma dura, permeten reduir les vibracions del motor.

Altres elements del motor, ja han estat explicats anteriorment, com els pistons, el regenerador,... d'altres que no tenen més complicació es mostren als plànols.

A2.7.2 - Materials Utilitzats

El motor Stirling, tal i com hem comentat anteriorment, consta de dos pistons disposats en V, entre ells hi circula el fluid de treball, heli en el nostre cas.

Un bon material per a la construcció del motor es l'alumini, de baix pes i bona resistència, tot i això te la desavantatge de la seva baixa resistència a les altes temperatures. Per aquest motiu només el podem utilitzar en zones de baixa temperatura. El seu coeficient de dilatació es de $18\ \frac{\mu m}{m \cdot {}^{o}C}$.

Per suplir aquest inconvenient de l'alumini es pot fer servir un material registrat anomenat INCONEL®, aquest és una mescla de níquel, crom i ferro, els percentatges estan entre un 50-55% (níquel), un 17-20% (crom) i la resta de ferro. Aquest és un material pensat per treballar a altes temperatures. A la taula següent es mostra la relació entre temperatures i resistència a la tracció.

Temperatura (ºC)	**Resistència a la Tracció fins ruptura (MPa)**
595	750
650	590
705	370
760	170

Veiem un descens brusc de la resistència quan passem de 700ºC, tot i que no es el nostre cas. Nosaltres treballem lleugerament per sota dels 650ºC. S'ha de dir que el mòdul elàstic se situa per sota del mostrat a la taula, però encara tenim molt marge d'acció. El seu coeficient de dilatació és de $13\ \frac{\mu m}{m \cdot ºC}$

Els tubs utilitzats per a les unions dels diferents elements, inclús a l'interior d'alguns d'ells, és coure d'alta resistència, aquest disposa d'un alt coeficient de conducció tèrmica, bona resposta a altes temperatures i una resistència a la tracció moderada. El seu coeficient de dilatació és de $17\ \frac{\mu m}{m \cdot ºC}$

El concentrador solar és el punt més crític del motor, en ell trobem les temperatures més elevades de tot el sistema, arribant al voltant de 900ºC. Això ens porta a seleccionar un material d'alta resistència a la temperatura, aquest serà una mescla entre níquel, coure i crom, a part d'altres materials, anomenat Waspaloy (43.3% Níquel, 19% Crom, 13.5% Coure, 4.3 Molibdè, 3% Titani, 2% Ferro i 1.5% Alumini), aquesta barreja ens proporciona resistència a molt altes temperatures, al voltant de 980ºC.

Tal i com podem observar, els diferents materials tenen unes dilatacions similars, el que garantitza la reducció de problemes de dilatació.

Un altre material utilitzat és la llana de roca, aquest el fem servir com aïllant tèrmic, col·locat en el circuit que va des del pistó calent fins al regenerador. Permet reduir les pèrdues per convecció a l'exterior, es capaç de suportar temperatures superiors als 1200ºC. Les peces del circuit, es recobriran amb una capa de 3 cm.

Una vegada seleccionats els diferents materials, es pot determinar el pes final del motor Stirling, incloent la seva carcassa i el motor elèctric és de 195 kg, pot semblar un pes excessivament elevat, però el motor de la marca comercial "Eurodish", de 9.2 kW de potència, ronda els 430 kg, per tant considerem que el pes està dins uns valors estàndard.

Annex 3 – Càlcul estructural

A3.1 - Hipòtesis de càlcul de l'estructura

En primer lloc definirem les variables que intervenen en aquest càlcul.

Pes Propi: Considerem uns 800 Kg.

Hipòtesi de Vent: Segons el codi tècnic de l'edificació (DB-SE-AE), i tenint en compte que la implantació pot ser per tot l'estat, agafarem el pitjor dels cassos, aquest correspon a la zona C de 0,52 kN/m^2, per tant la màxima carrega de vent és la següent:

$$[F.A3.1]\ H_{vent} = 0{,}52\ \frac{kN}{m^2} \cdot S_{parabola} = 0{,}52 \cdot 28 = 14{,}56\ kN = 1.456\ Kg$$

Apliquem un factor de reducció per les ranures de les que disposa la paràbola, el moment que el vent ocasiona sobre la sabata és el següent:

$$[F.A3.2]\ M_{vent} = H_{vent} \cdot F_{reducció} \cdot L_{Biga} = 1456\ Kg \cdot 0{,}8 \cdot 5\ m = 5.824\ Kg \cdot m = 58{,}4\ kN \cdot m$$

Zona	Pressió dinàmica [KN/m^2]
A	0,42
B	0,45
C	0,52

Fig.A3.1. Mapa de zones de vent, segons CTE.

Hipòtesi de Neu: En aquest cas no agafarem el nivell màxim, ja que es diferència molt d'un nivell estàndard i en faria augmentar molt el cost, en cas de voler situar el captador en zones mes conflictives s'hauria de fer un nou càlcul estructural. Prendrem 1,7 kN/m2 aplicant un factor reductor del 30% ja que la parabòlica en cap cas està plana, cal tenir en compte que aquestes dades són per a un terreny horitzontal, per tant fent els càlculs tindrem la següent càrrega de neu:

$$[F.A3.3]\ H_{neu} = 1{,}5\ \frac{kN}{m^2} \cdot F_{correcció} \cdot S_{parabola} = 1{,}7 \cdot 0{,}7 \cdot 28 = 29{,}4\ kN$$
$$= 2.940\ Kg$$

Fig.A3.2. Mapa de zones de neu, segons CTE.

Altitud (m)	**Zona de clima invernal**, (según figura E.2)						
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
0	0,3	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
200	0,5	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
400	0,6	0,6	0,2	0,3	0,4	0,2	0,2
500	0,7	0,7	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2
600	0,9	0,9	0,3	0,5	0,5	0,4	0,2
700	1,0	1,0	0,4	0,6	0,6	0,5	0,2
800	1,2	1,1	0,5	0,8	0,7	0,7	0,2
900	1,4	1,3	0,6	1,0	0,8	0,9	0,2
1.000	1,7	1,5	0,7	1,2	0,9	1,2	0,2
1.200	2,3	2,0	1,1	1,9	1,3	2,0	0,2
1.400	3,2	2,6	1,7	3,0	1,8	3,3	0,2
1.600	4,3	3,5	2,6	4,6	2,5	5,5	0,2
1.800	-	4,6	4,0	-	-	9,3	0,2
2.200	-	8,0	-	-	-	-	-

Fig.A3.3. Taula de carregues de neu, segons CTE.

Sigma Admissible del sòl: Agafarem una pressió admissible de 1,5 kg/cm^2.

NATURALESA DEL TERRENY	TIPUS DE TERRENY	PRECAUCIONS	PRESSIÓ ADMISSIBLE σ_{adm} (kgf / cm^2)
Rocós	Isòtrop	Anàlisi en profunditat (coves i torrents) Estrats NO inclinats Meteorització de les roques	30 - 60
	Estratificat		10 - 20
Sense cohesió	Graves	Mòbils sota l'acció de corrents d'aigua	4 - 8
	Sorres gruixudes		2.5 - 5
	Sorres fines		1.5 - 2.2
Coherents	Argilès dures	Pèrdua de cohesió sota l'efecte de l'aigua	4
	Argiles semi-dures		2
	Argiles toves		1
	Argiles fluides		0.5
Deficients	Fangs	No aptes per la cimentació	0
	Terrenys orgànics		0
	Rebliment sense consolidar		0

Fig.A3.4. Taula de la pressió admissible del terreny

Un cop calculat tot això veiem que:

N = 3740 Kg (Força Normal)

V=1164,8 Kg (Força produïda pel vent)

M = 5.824 Kg·m (Moment Màxim, aplicat a la sabata)

$\sigma_{adm} = 1{,}5\ kg/cm^2$

A3.2 - Demostració del Càlcul del Pilar

Per calcular el pilar, agafem les dades calculades en l'apartat anterior:

N = 3.740 Kg (Força Normal)

M = 5.824 Kg·m (Moment Màxim)

V = 1.456 kg (Empenta horitzontal del Vent)

Coeficient de minoració de l'acer: $\gamma_s = 1{,}15$

Coeficient de majoració de les accions: $\gamma_f = 1{,}6$

Resistència de l'acer: $f_y = 4000 \rightarrow f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_s} = 3478{,}26\ kg/cm^2$

Tenint en compte la rotació del sistema, la biga escollida serà de perfil circular.

A continuació es fa el càlcul de resistència d'un perfil 203 x 25,4 (Normalitzat), aquest perfil és adequat per muntar el sistema de rotació de la paràbola.

Abans de començar el càlcul, direm que, al ser un sistema simètric, només farem els càlculs en l'eix y, ja que l'eix z seran exactament iguals.

Dades de la biga	
Diàmetre [D]	203 mm
Pes lineal [P]	111,3 Kg/m
Espessor [e]	25,4 mm
Superfície [A]	141,78 cm^2
Moment d'Inèrcia [I_y]	5704 cm^4
Mòdul Plàstic [W_y]	562 cm^3
Factor de Forma [i_y]	6,342 cm
Longitud [L]	5 m

Tenint en compte el pes propi N passa a ser:

$[F.A3.4]$ N = 3740 Kg + 111,3 Kg/m · 5 m = 4296,5 Kg

Longitud de Pandeig

$$[F.A3.5]\ L_{py} = \beta \cdot L = 2 \cdot 500cm = 1000\ cm$$

$on\ \beta\ es\ el\ coeficient\ de\ Pandeig, en\ una\ biga\ encastada\ a\ terra\ i\ en\ voladís$ és 2

Esveltesa

$$[F.A3.6]\ S'_y = \frac{L_{py}}{i_y} = \frac{1000\ cm}{6{,}342\ cm} = 157{,}68$$

Esveltesa Reduïda

$$[F.A3.7]\ S'_{yk} = \frac{S'_y}{S'_E} = \frac{S'_y}{93{,}91 \cdot \sqrt{\frac{235}{fy}}} = \frac{157{,}86}{93{,}91 \cdot \sqrt{\frac{235}{275}}} = 1{,}816$$

Coeficient de pandeig

Consultem en la taula A3.5 el tipus de corba de pandeig que tenim, està en funció de la secció.

Tipo de perfil	Límites	Pandeo respecto al eje	Curva de pandeo S 235 S 275 S 355 S 420	Curva de pandeo S 450
Perfiles laminados	h/b > 1,2	y-y	a	a_0
	$t_f \leq 40$ mm	z-z	b	a_0
	$40 < t_f \leq 100$ mm	y-y	b	a
		z-z	c	a
	h/b ≤ 1,2	y-y	b	a
	$t_f \leq 100$ mm	z-z	c	a
	$t_f > 100$ mm	y-y	d	c
		z-z	d	c
Vigas armadas	$t_f \leq 40$ mm	y-y	b	b
		z-z	c	c
	$t_f > 40$ mm	y-y	c	c
		z-z	d	d
Secciones huecas	laminados en caliente	cualquiera	a	a
	Conformados en frío	cualquiera	b	b
Vigas armadas en cajón	En general, con excepción de lo siguiente	cualquiera	b	b
	Soldaduras gruesas (a > 0,5·t_f): $b/t_f < 30$, $h/t_w < 30$	cualquiera	c	c
Perfiles U; T y macizos		cualquiera	c	c
Angulares		cualquiera	b	b

Fig.A3.5. Taula del tipus de corba de pandeig

La corba corresponent a la secció és del tipus b. A partir d'aquí i fent ús de la següent taula (A3.6) i la esveltesa reduïda, trobem el coeficient de pandeig.

	$\bar{\lambda}_k$	Curva de pandeo				
		a_0	a	b	c	d
Esbeltez reducida	0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
	0,1	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
	0,2	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
	0,3	0,9859	0,9775	0,9641	0,9491	0,9235
	0,4	0,9701	0,9528	0,9261	0,8973	0,8504
	0,5	0,9513	0,9243	0,8842	0,8430	0,7793
	0,6	0,9275	0,8900	0,8371	0,7854	0,7100
	0,7	0,8961	0,8477	0,7837	0,7247	0,6431
	0,8	0,8533	0,7957	0,7245	0,6622	0,5797
	0,9	0,7961	0,7339	0,6612	0,5998	0,5208
	1	0,7253	0,6656	0,5970	0,5399	0,4671
	1,1	0,6482	0,596	0,5352	0,4842	0,4189
	1,2	0,5732	0,5300	0,4781	0,4338	0,3762
	1,3	0,5053	0,4703	0,4269	0,3888	0,3385
	1,4	0,4461	0,4179	0,3817	0,3492	0,3055
	1,5	0,3953	0,3724	0,3422	0,3145	0,2766
	1,6	0,352	0,3332	0,3079	0,2842	0,2512
	1,7	0,315	0,2994	0,2781	0,2577	0,2289
	1,8	0,2833	0,2702	0,2521	0,2345	0,2093
	1,9	0,2559	0,2449	0,2294	0,2141	0,1920
	2	0,2323	0,2229	0,2095	0,1962	0,1766
	2,1	0,2117	0,2036	0,1920	0,1803	0,1630
	2,2	0,1937	0,1867	0,1765	0,1662	0,1508
	2,3	0,1779	0,1717	0,1628	0,1537	0,1399
	2,4	0,1639	0,1585	0,1506	0,1425	0,1302
	2,5	0,1515	0,1467	0,1397	0,1325	0,1214
	2,6	0,1404	0,1362	0,1299	0,1234	0,1134
	2,7	0,1305	0,1267	0,1211	0,1153	0,1062
	2,8	0,1216	0,1182	0,1132	0,1070	0,0997
	2,9	0,1136	0,1105	0,1060	0,1012	0,0937
	3	0,1063	0,1036	0,0994	0,0951	0,0882

Fig.A3.6. Taula del coeficient de pandeig

El coeficient de pandeig és:

$$\varkappa_{ky} = 0{,}2521$$

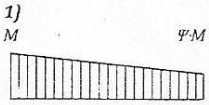
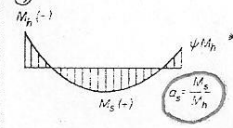
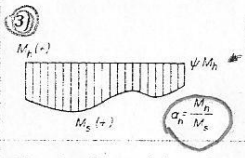
Factor de Moment Flector Uniforme

En el nostre cas tenim un diagrama de moments tipus 1 amb:

$$\psi_{max} \quad i \quad \psi_{min} = 0 \quad i \ per\ tant\ \alpha_s = 0$$

Per tant tindrem, observant la taula 3.7:

$$C_{my} = 0{,}6 + 0{,}4 \cdot \alpha_s = 0{,}6 \geq 0{,}4\ Correcte$$

Diagrama de momentos	Rango		c_{my} y c_{mz} Carga uniforme	c_{my} y c_{mz} Carga puntual
1) 		$-1 \leq \Psi \leq 1$	$0{,}6+0{,}4\cdot\Psi \geq 0{,}4$	
2) 	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \Psi \leq 1$	$0{,}2+0{,}8\cdot\alpha_s \geq 0{,}4$	$0{,}2+0{,}8\cdot\alpha_s \geq 0{,}4$
	$-1 \leq \alpha_s \leq 0$	$0 \leq \Psi \leq 1$	$0{,}1-0{,}8\cdot\alpha_s \geq 0{,}4$	$-0{,}8\cdot\alpha_s \geq 0{,}4$
		$-1 \leq \Psi \leq 0$	$0{,}1\cdot(1-\Psi)-0{,}8\cdot\alpha_s \geq 0{,}4$	$0{,}2\cdot(-\Psi)-0{,}8\cdot\alpha_s \geq 0{,}4$
3) 	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \Psi \leq 1$	$0{,}95+0{,}05\cdot\alpha_h$	$0{,}90+0{,}10\cdot\alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h \leq 0$	$0 \leq \Psi \leq 1$	$0{,}95+0{,}05\cdot\alpha_h$	$0{,}90+0{,}10\cdot\alpha_h$
		$-1 \leq \Psi \leq 0$	$0{,}95+0{,}05\cdot\alpha_h\cdot(1+2\,\Psi)$	$0{,}90-0{,}10\cdot\alpha_h\cdot(1+2\,\Psi)$

El subíndice i del coeficiente $c_{m,i}$ representa y cuando la flexión se refiere al eje y-y

El subíndice i del coeficiente $c_{m,i}$ representa z cuando la flexión se refiere al eje z-z

En barras de estructuras aporticadas sin arriostrar con longitudes de pandeo superiores a las de las propias barras debe tomarse, $c_m = 0{,}9$

Los momentos M_s y M_h deben considerarse con el signo que corresponda

2) El valor absoluto del momento máximo en el vano es menor que el valor absoluto del momento mayor de los dos extremos

3) El valor absoluto del momento máximo en el vano es mayor que el valor absoluto del momento mayor de los dos extremos

Fig.A3.7. Taula del factor del moment flector uniforme

Càlcul de pilars a Compressió amb flexió respecte l'eix de major inèrcia

$$[F.A3.8] \quad \frac{N}{\varkappa_{ky} \cdot A} + \varkappa_{ky} \cdot C_{my} \cdot \frac{M}{W_y} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$on \quad \gamma_{M1} \ es\ el\ coeficient\ de\ seguretat\ de\ l'acer$$

$$\frac{4.296{,}5\ \ Kg \cdot 1{,}6}{0{,}2521 \cdot 141{,}78\ cm^2} + 0{,}2521 \cdot 0{,}6 \cdot \frac{5.824.000\ Kg \cdot cm \cdot 1{,}6}{526\ cm^3} \leq 3478{,}26$$

$$192{,}33 + 2679{,}66 \leq 3478{,}26 \qquad 2872 \leq 3478{,}26\ Compleix$$

La biga aguanta favorablement tota l'estructura i les diferents hipòtesi plantejades, veient el marge que tenim, es podria col·locar una biga mes lleugera, utilitzarem per comoditat en la construcció del sistema de rotació i per no anar massa al límit, aquesta biga.

A3.3 - Demostració del Càlcul de la Sabata

Per començar recordem les hipòtesis plantejades anteriorment.

N = 3.740 Kg (Força Normal) + 111,3 ·5 (Pilar) = 4296,5 Kg

M = 5.824 Kg·m (Moment Màxim)

$\sigma_{adm} = 1{,}5\ kg/cm^2$

Tipus de formigó: HA-25/P/40/IIa (Densitat 2,5 t/m^3)

Tipus d'Acer: B-400-S

Coeficient de minoració del formigó: $\gamma_c = 1{,}5$

Coeficient de minoració del acer: $\gamma_s = 1{,}15$

Coeficient de majoració de les accions: $\gamma_f = 1{,}6$

Coeficient de seguretat al bolc: $\gamma_1 = 1{,}5$

Resistència del Acer: $f_y = 4000 \rightarrow f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_s} = 3478{,}26\ kg/cm^2$

Les forces majorades queden:

N_d = N·1,6 = 6874,4 Kg

M_d = M·1,6 = 9318,4 Kg·m

Ja tenim totes les dades per iniciar el càlcul. Com a condicions donem que: la sabata no llisqui, no bolqui i que la sigma màxima sigui inferior a la sigma admissible.

Definim primer unes dimensions bàsiques per fer els càlculs.

a=1 m

b=1 m

h=0,5 m

A3.3.1 - Comprovació de Bolcat

$M_{estababilitzant} > M_{bolcat}$

$(N_d + P)\frac{a}{2} \geq (M_d + T \cdot h) \cdot \gamma_1$

Sent:

N_d: Esforç axial

M_d: Moment flector

T: Esforç tallant

P: Pes propi

El pes propi serà: $P = \delta_f \cdot a \cdot a \cdot h = 2500 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}5 = 1250\ Kg$

$[F.A3.9]\ (N + P)\frac{a}{2} \geq (M + T \cdot h) \cdot \gamma_1$

$$(6874{,}4 + 1250 \cdot 1{,}6)\frac{1}{2} \geq (9318{,}4 + 0) \cdot 1{,}5 \qquad 4437{,}2 \geq 13977{,}6 \quad No\ Compleix$$

Estem per sota del límit, recalculant trobem que la *"a"* ha de ser de 1,94 m, per aproximar-la posarem 2 metres.

El pes propi passarà ha ser de:

$[F.A3.10]\ P = \delta_f \cdot a \cdot a \cdot h = 2500 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 0{,}5 = 5000\ Kg$

$$(6874{,}4 + 5000 \cdot 1{,}6)\frac{2}{2} \geq (9318{,}4 + 0) \cdot 1{,}5 \qquad 14874{,}4 \geq 13978 \quad Compleix$$

Comprovem que es compleixen les condicions de sabata rígida, el vol (part horitzontal de la sabata sense ancoratge, les dimensions es poden veure en els plànols) ha de ser inferior a dos vegades el canto.

$$V_{vol} = \frac{a - D_{suport}}{2} < 2 \cdot h \qquad \frac{200 - 65}{2} < 2 \cdot h \quad 67{,}5\ cm = 100\ cm \quad Compleix$$

A3.3.2 - Comprovació de Lliscament

$$[F.A3.11]\ F_{fricció} = Normal \cdot \mu = Normal \cdot \tan 30$$

$$[F.A3.12]\ Normal = N + P = 6874{,}4 + 5000 \cdot 1{,}6 = 14874{,}4\ Kg$$

S'ha de complir que:

$$[F.A3.13]\ \frac{F_{fricció}}{Empenta_{horitzontal}} \geq 1{,}5 \quad \frac{14874{,}4 \cdot \tan(30)}{1456 \cdot 1{,}6} = 3{,}69 \geq\ 1{,}5\ Compleix$$

L'empenta horitzontal correspon a la força del vent

A3.3.3 - Comprovació a l'enfonsament o a la tensió admissible del terreny

Primer hem de definir l'excentricitat amb la que actuen els esforços, d'aquesta manera podrem classificar el tipus de càrrega que tenim.

$$[F.A3.14]\ e = \frac{M_d + T \cdot h}{N_d + P} = \frac{9318{,}4 + 0}{6874{,}4 + 5000 \cdot 1{,}6} = 0{,}63\ m$$

$$\frac{a}{6} = 0{,}3333\ m$$

Com que la excentricitat és major a *"a/6"*, la distribució de tensions és triangular, caient la carrega fora del nucli central.

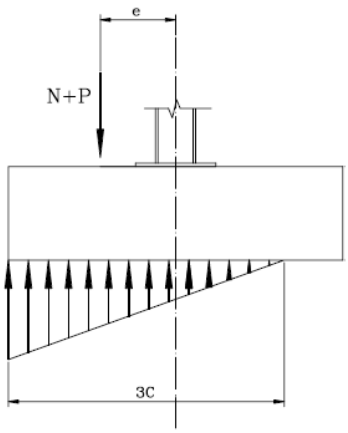


Fig.A3.8. Càrregues sobre la sabata

$$[F.A3.15]\ C = \frac{a}{2} - e = \frac{2}{2} - 0{,}62 = 0{,}38\ m = 38\ cm$$

3C = 1,14 m

La tensió màxima a l'extrem de la sabata té el següent valor:

$$[F.A3.16]\ \sigma_{max} = \frac{4}{3} \cdot \frac{N_d + P}{b \cdot 2C} = \frac{4}{3} \cdot \frac{6874{,}4 + 5000 \cdot 1{,}6}{200 \cdot 2 \cdot 33{,}3} = \frac{1{,}3\ Kg}{cm^2}$$

S'ha de complir que la sigma màxima, sigui inferior a 1,25 vegades la sigma admissible.

$$[F.A3.17]\ \sigma_{max} \leq 1{,}25 \cdot \sigma_{adm} \qquad \frac{1{,}30\ Kg}{cm^2} \leq \frac{1{,}875 Kg}{cm^2} \quad Compleix$$

Resumint, ens queda una sabata quadrada de:

a=2m

h=0,5m

A3.3.4 - Càlcul de l'armadura

L'esforç per al càlcul serà:

$$[F.A3.18]\ N_d = (N + P) \cdot \gamma_f = (4296{,}5 + 5000) \cdot 1{,}6 = 14874{,}4\ Kg$$

$$[F.A3.19]\ M_d = M \cdot \gamma_f = 5824 \cdot 1{,}6 = 9.318{,}4\ Kg \cdot m$$

L'ancoratge fa a_1=65 cm i els esforços de compressió es descomponen en dos, un a cada banda de la placa.

$$[F.A3.20]\ R_{1d} = \frac{N_d}{2} + \frac{3 \cdot M_d}{2 \cdot a_1} = \frac{14874{,}4}{2} + \frac{3 \cdot 9318{,}4}{2 \cdot 0{,}65} = 28.941{,}2\ Kg$$

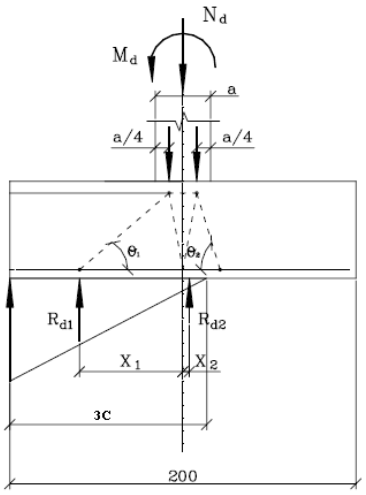


Fig.A3.9. Distribució de forces de la sabata

A continuació passem a resoldre la gelosia corresponent, obtenint els resultats de les traccions dels tirants *"T_{1d}"* i *"T_{2d}"*, primer determinarem el centre de gravetat, *"X1"* i *"X2"*. A la part esquerra de la sabata tenim un trapezi, i a la part dreta un triangle.

El valor màxim de la carrega al trapezi serà:

$$[F.A3.21]\ \sigma_{1d} = \sigma_{max} \cdot a = 1{,}3 \cdot 200 = 260\ kg/cm^2$$

$$[F.A3.22]\ X_1 = \frac{\frac{N_d}{2} + \frac{4 \cdot M_d}{b}}{R_{1d}} \cdot \frac{b}{4} = \frac{\frac{14874{,}4}{2} + \frac{4 \cdot 9318{,}4}{2}}{28941{,}2} \cdot \frac{2}{4} = 0{,}45\ m = 45\ cm$$

Ja estem en disposició de determinar la tracció del tirant

$$[F.A3.23]\ T_d = \frac{R_{1d}}{0{,}85 \cdot d}(x_1 - 0{,}25 \cdot a_1) = A_s \cdot f_{yd}$$

$$on \qquad d = h \cdot 0{,}85 + \frac{h - h \cdot 0{,}85}{2} = 46{,}25\ cm$$

$$[F.A3.24]\ T_d = \frac{R_{1d}}{0{,}85 \cdot d}(x_1 - 0{,}25 \cdot a_1) = \frac{28941{,}2}{0{,}85 \cdot 46{,}25} \cdot (45 - 0{,}25 \cdot 65) = 21165{,}26\ Kg$$

$$[F.A3.25]\ A_s = \frac{T_d}{f_{yd}} = \frac{21165{,}26}{3478{,}26} = 6{,}08\ cm^2$$

En principi col·locarem 11 rodons corrugats de 12mm, els quals tenen una àrea total de 6,22 cm^2.

Hem de comprovar les limitacions de la quantia geomètrica mínima, imposades per les normes EHE, la quantia geomètrica mínima serà d'un dos per mil.

$$[F.A3.26]\ \rho = \frac{A_s}{A_c} \cdot 1000$$

On p és la quantia geomètrica en tant per mil

As és la secció armada

Ac és la secció útil

$$A_c = d \cdot a = 46{,}25 \cdot 200 = 9250\ cm^2 = 0{,}925\ m^2$$

$$\rho = \frac{A_s}{A_c} \cdot 1000 = \frac{6{,}22}{9250} \cdot 1000 = 0{,}67‰ \qquad No\ arribem\ al\ mínim$$

La mínima As corresponent al dos per mil és:

$$As = \frac{A_c \cdot \rho}{1000} = \frac{9250 \cdot 2}{1000} = 18{,}5\ cm^2$$

Agafarem rodons de 20 mm i en posarem 12 amb una àrea de 18,84 cm^2.

La separació de les parets laterals mínima, segons normativa, és de 3,5 cm.

La norma també especifica que hem de tenir uns rodons laterals per sostenir l'armadura, separats entre ells un mínim de 3 cm.

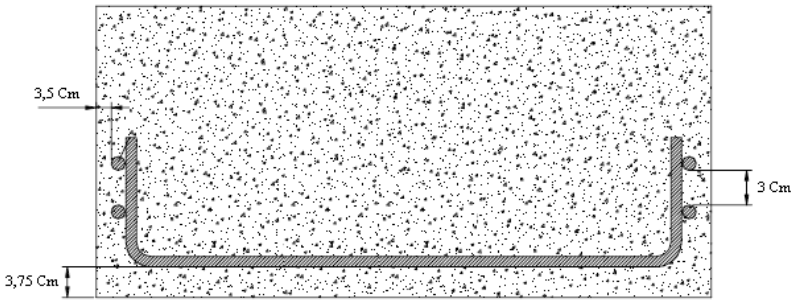


Fig.A3.10. Tall de la fonamentació i els perns corrugats

A3.3.5 - Càlcul de la Placa d'ancoratge i els perns

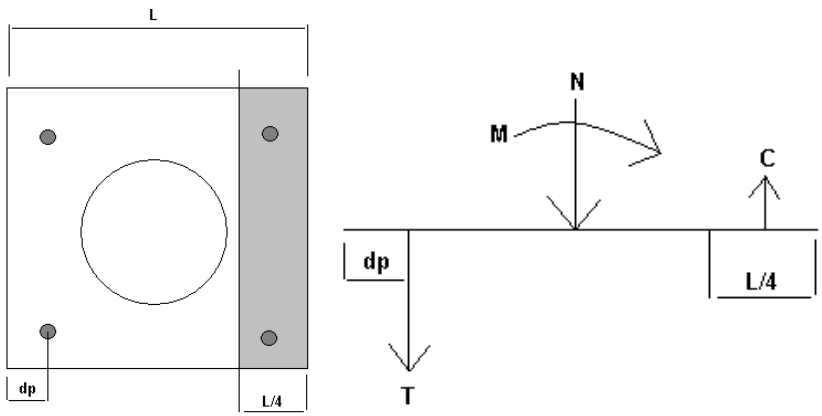


Fig.A3.11. Placa d'ancoratge i forces en els perns

Aplicarem les lleis de la física de sumatori de forces i moments iguals a zero, per tal de trobar la força *"T"*.

$$\Sigma M = 0 \qquad [F.A3.27] \quad T \cdot \left(L - d_p - \frac{L}{8}\right) + N \cdot \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{8}\right) - M = 0$$

$$\Sigma F = 0 \qquad [F.A3.28] \quad T \cdot \left(0{,}65 - 0{,}1 - \frac{0{,}65}{8}\right) + 6874{,}4 \cdot \left(\frac{0{,}65}{2} - \frac{0{,}65}{8}\right) - 9318{,}4 = 0$$

Aïllant del sumatori de moments la "*T*", tenim que és:

$$T = 16304{,}56\ Kg$$

Busquem ara, l'àrea de compressió.

$$[F.A3.29] \quad A_{c1} = L \cdot \frac{L}{4} = 65 \cdot \frac{65}{4} = 1056{,}25\ m^2$$

S'ha de complir que:

$$[F.A3.30] \quad \frac{N}{A_{c1}} \leq 0{,}525 \cdot f_{yd} \qquad \frac{6874{,}4}{1056{,}25} \leq 0{,}525 \cdot \frac{4000}{1{,}15}$$

$$6{,}5\,\frac{Kg}{cm^2} \leq 1826{,}08\,\frac{Kg}{cm^2}\ Compleix$$

Ja podem dir que la placa és capaç de suportar tots els esforços. El següent pas és dimensionar els perns. Col·locarem perns corrugats pes suportar els esforços de la biga, aquests tenen les següents característiques:

fy=5100 Kg/cm^2

Diàmetre del pern, 2cm.

$$A_c = \frac{\pi \cdot 2^2}{4} = 3{,}14\ cm^2$$

Comprovem ara si aguanten:

$$[F.A3.31]\quad \frac{\frac{T}{2}}{A_{c1}} \leq 0{,}8 \cdot \frac{f_y}{\gamma_s} \qquad \frac{\frac{16304{,}56}{2}}{3{,}14} \leq 0{,}8\frac{5100}{1{,}15}$$

$$2596{,}3\frac{Kg}{cm^2} \leq 3547{,}82\frac{Kg}{cm^2} \qquad Compleix$$

L'altura inicial del pern serà:

$$l_{bI} = m \cdot D^2 = 30{,}72\ cm$$

On m correspon a la interacció formigó-acer, en el nostre cas és 12.

Calculem l'àrea que necessitaríem del pern si estiguéssim al límit, calculant-ho amb la fórmula anterior.

$$[F.A3.32]\quad \frac{16767{,}57/2}{A_n} = 0{,}8\frac{5100}{1{,}15} \quad \rightarrow \quad A_n = 2{,}36\ cm^2$$

$$[F.A3.33]\quad l_{b,neta} = l_{bI} \cdot \beta \cdot \frac{A_{s,necesaria}}{A_{s,colocada}} = 32 \cdot 0{,}7 \cdot \frac{2{,}36}{3{,}14} = 16{,}83\ cm\ \approx 17\ cm$$

La longitud neta segons la norma EHE no pot ser menor a deu vegades el diàmetre del rodó, a 15 cm, i a un terç de "L_{bl}". Per tant serà de 20 cm, ja que 17 cm no compleix amb les deu vegades major al diàmetre del pern.

Annex 4 - Posicionament de la paràbola

A4.1 - Càlcul de la posició solar

$$[F.A4.1]$$
$$Eq.\ Temps = 9{,}87 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot 360 \cdot (\mathrm{Dia} - \mathrm{Dia_{ref}})}{365{,}2422}\right) - 7{,}53 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot (\mathrm{Dia} - \mathrm{Dia_{ref}})}{365{,}2422}\right) - 1{,}5 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (\mathrm{Dia} - \mathrm{Dia_{ref}})}{365{,}2422}\right) \ [\mathrm{min}]$$

On: Dia-$\mathrm{Dia_{ref}}$ = És la diferencia de dies entre, l'actual i un dia de referència que equivalgui a un equinoci de primavera, incloent les hores i els minuts. [Dies]

$$[F.A4.2]\ Correcció\ Solar = \frac{AH - UH + \frac{LN}{15} - \frac{Eq.Temps}{60}}{24} \ [Dies]$$

On:

AH = Avanç Horari [h]
UH = Ús Horari [h]
LN = Longitud [º]

$$[F.A4.3]\ Hora\ Solar = Hora + Correcció\ Solar \quad [Dies]$$

On: Hora = Hora a calcular [Dies]

$$[F.A4.4]\ \omega = 24 \cdot 15 \cdot (\mathrm{Hora\ Solar} - 0{,}5)\ [\text{Radiants->º}]$$

A4.1.1 - Càlcul de L'angle d'elevació Solar (γ_s)

$$[F.A4.5]\ \delta = 0{,}4 \cdot \sin^{-1}\left(\sin\left(\frac{360 \cdot (Dia - Dia_{ref})}{365{,}2422}\right)\right) \quad [º]$$

$$[F.A4.6]\ \gamma s = \sin^{-1}(\sin\delta \cdot \sin\Phi + \cos\delta \cdot \cos\Phi \cdot \cos\omega) \quad [º]$$

On: Φ = Latitud

A4.1.2 - Càlcul de L'Azimut (Ψ)

$$[F.A4.7]\ \Psi = \frac{\omega}{|\omega|} \cdot \cos^{-1}\left(\frac{-\sin\delta \cdot \cos\Phi + \cos\delta \cdot \sin\Phi \cdot \cos\omega}{\cos\gamma s}\right) \quad [º]$$

On: El punt de referència és el sud en el nostre hemisferi

A4.1.3 - Càlcul de l'hora de sortida i posta de sol

$[F.A4.8]$ $Migdia\ Solar = 12{:}00 -$ Correcció Solar [Hora]

$[F.A4.9]$

$$Sortida\ del\ Sol = \left(\frac{180 - \cos^{-1}\left(\sin(-0{,}83) - \frac{\sin\delta \cdot \sin\Phi}{\cos\delta \cdot \cos\Phi}\right)}{15 \cdot 24}\right) - Correcció\ Solar \quad [Hora]$$

$[F.A4.10]$

$$Posta\ de\ Sol = \left(\frac{180 + \cos^{-1}\left(\sin(-0{,}83) - \frac{\sin\delta \cdot \sin\Phi}{\cos\delta \cdot \cos\Phi}\right)}{15 \cdot 24}\right) - Correcció\ Solar \quad [Hora]$$

A4.2 - Dispositiu LCD, Menú contextual

En aquest annex es mostren els menús de la pantalla LCD, i la seva utilitat, així com la configuració duta a terme pel tècnic d'instal·lació del captador.

Fig.A4.1. Pantalla LCD, Menú 1

Aquesta és la primera pantalla, la que hi ha per defecte, en ella s'hi pot observar el dia, l'hora i el sistema horari.

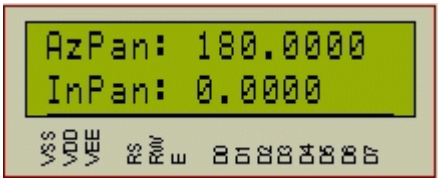


Fig.A4.2. Pantalla LCD, Menú 2

En aquest segon panell, es mostra l'angle azimutal i l'altura solar o inclinació del panell. Per tal de regular el sistema, la parabòlica s'haurà d'orientar al sud amb una inclinació de 0º i introduir en el LCD la posició en la que estem per tal d'obtenir un punt de referència. En cas de que estem en l'hemisferi nord, l'azimut ha de ser 180º, i en el sud -180º, l'inclinació sempre serà 0.

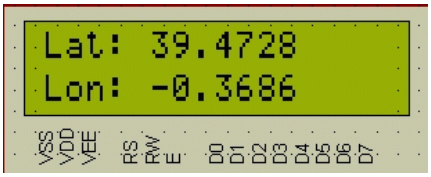


Fig.A4.3. Pantalla LCD, Menú 3

En el tercer menú, s'ha d'introduir la latitud i longitud on es troba col·locada la parabòlica, fàcilment obtenible a traves d'un dispositiu GPS.

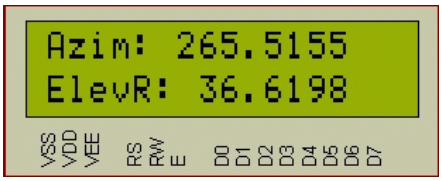


Fig.A4.4. Pantalla LCD, Menú 4

En el menú número quatre, el sistema ens mostra la posició solar segons les dades introduïdes, aquest menú és merament de comprovació i representa les ordres que se li hauran de donar als motors.

Fig.A4.5. Pantalla LCD, Menú 5

Aquest panell també és informatiu, ens mostra l'hora de la sortida de sol, en la qual, amb un marge de temps, el sistema començarà a treballar.

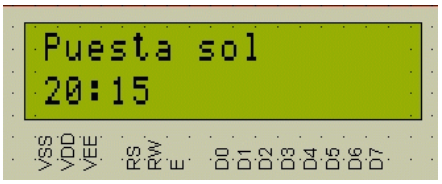


Fig.A4.6. Pantalla LCD, Menú 6

Al igual que se'ns mostra l'hora de sortida del sol, el menú sis ens mostra l'hora de posta, de la qual, pararà una estona abans.

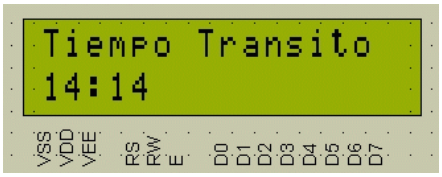


Fig.A4.7. Pantalla LCD, Menú 7

En aquest panell, com a dada per fer una regulació del sistema, causada per l'inexactitud del motor pas a pas, tenim l'hora on l'azimut és 180º.

A4.3 - Temps d'actualització de Posicionament

Per poder calcular cada quan de temps hem d'actualitzar el captador solar per poder tenir unes pèrdues mínimes, farem ús de les cartes solars estereogràfiques. Aquestes, les crearem amb el programa "Geosol 2.0".

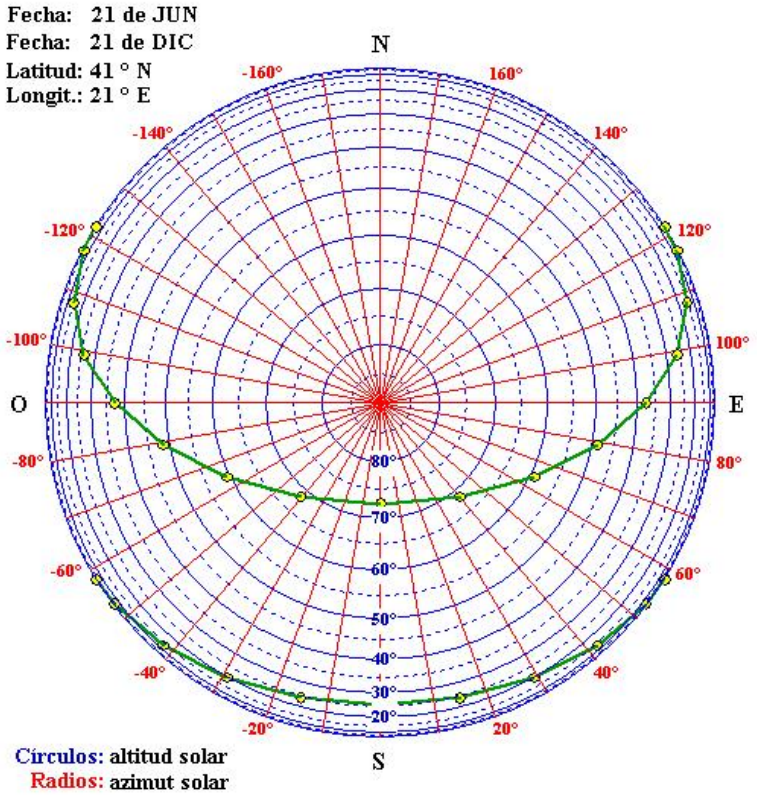


Fig.A4.8. Carta solar Estereogràfica de Barcelona

La carta ens mostra l'altura solar i l'angle azimutal, les dues línies verdes representen el solstici d'estiu i el d'hivern, entre elles i queden compresos tots els dies de l'any. Els punts grocs representen l'hora solar, sent el punt central de les línees les 12h. A partir d'aquests gràfics podem trobar les variacions d'angle respecte el temps, o la velocitat solar.

A continuació mostrarem les taules de velocitat solar en l'àrea de Barcelona, aquestes distaran mínimament segons el punt que ens trobem d'Espanya. Tot i això agafarem uns marges d'error, sempre satisfactoris en quant als càlculs. Com podem observar a la taula, la màxima variació d'altura és de 0,19º/min, i la màxima variació d'azimut és de 0,67º/min.

21 Desembre, hora	Altura Solar	Azimut	Vel. Altura (Graus/min)	Vel. Azimut (Graus/min)
8	4,88	52,9	----	----
9	13,21	41,8	0,14	0,19
10	19,79	29,2	0,11	0,21
11	24,06	15,1	0,07	0,24
12	25,55	0	0,02	0,25
13	24,06	-15,1	0,02	0,25
14	19,79	-29,2	0,07	0,24
15	13,21	-41,8	0,11	0,21
16	4,88	-52,9	0,14	0,19

Taula A4.9. Altura, Azimut, i velocitats del sol el 21 de desembre

21 Juny, hora	Altura Solar	Azimut	Vel. Altura (Graus/min)	Vel. Azimut (Graus/min)
5	4,7	117,2	----	----
6	15,13	108,1	0,17	0,15
7	26,12	99,3	0,18	0,15
8	37,39	90	0,19	0,16
9	48,65	79,1	0,19	0,18
10	59,39	64,3	0,18	0,25
11	68,41	40,2	0,15	0,40
12	72,45	0	0,07	0,67
13	68,41	-40,2	0,07	0,67
14	59,39	-64,3	0,15	0,40
15	48,65	-79,1	0,18	0,25
16	37,39	-90	0,19	0,18
17	26,12	-99,3	0,19	0,16
18	15,13	-108,1	0,18	0,15
19	4,7	-117,2	0,17	0,15

Taula A4.10. Altura, Azimut, i velocitats del sol el 21 de juny

Per determinar les pèrdues farem ús de los fórmules plantejades en l'annex 1, referents al disc parabòlic.

$$dd = 288 - \left(0{,}96 \cdot F - \frac{900}{F}\right) \cdot tg\left(90 - tg^{-1}\left(\frac{0{,}96 \cdot F - \frac{900}{F}}{288}\right) - \gamma\right)$$

F \ γ (cm)	0,05 º	0,1 º	0,2 º	0,3 º	0,4 º	0,5 º
300 cm	0,5	1	2	3	4	5
320 cm	0,51	1,03	2,05	3,07	4,09	5,10
340 cm	0,52	1,03	2,06	3,09	4,11	5,13
360 cm	0,52	1,04	2,08	3,11	4,15	5,18
380 cm	0,53	1,05	2,10	3,15	4,19	5,24
400 cm	0,52	1,04	2,08	3,12	4,24	5,36

Taula A4.11 Desviació del l'àrea projectada pel sol respecte el captador solar.

Veiem que la *"F"* no influeix de forma molt determinant en la desviació, per tant, agafarem una *"F"* de 400 cm, ja que aquesta dona unes bones proporcions de curvatura de la parabòlica, idònies a l'hora de dissenyar els miralls. Per tant la formula ja ens queda més abreviada.

$$[F.A4.11]\ dd = 288 - 381{,}75\ \cdot tg(37{,}03 - \gamma)$$

En el cas de moure el temporitzador cada 0,1º , tindríem una desviació de 1,07 cm. En el pitjor dels casos, ja que l'altura no es mou tant com l'angle azimutal, tindrem unes pèrdues del 7,5%, a continuació calcularem les pèrdues.

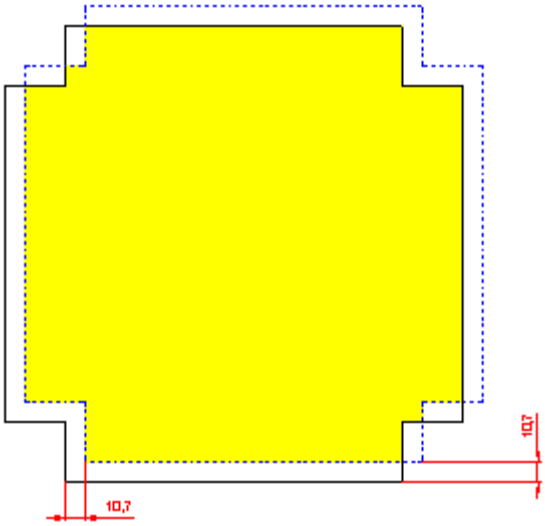


Fig.A4.12. Desviament dels rajos del sol respecte el diàmetre del captador, girant cada 0,1º

Àrea captador = 536 cm^2

Àrea de concordança = 488 cm^2

$$[F.A4.12]\ \eta = \frac{488}{536} \cdot 100 = 91\ \%$$

Aquest 91% correspon just al moment anterior de la correcta col·locació del seguidor solar, amb lo qual per trobar les pèrdues ocasionades pel seguiment, s'ha de fer la mitja entre la posició idònia del 100% i aquest 91%.

$$[F.A4.13]\ P_{perduda,seguiment} = 100 - \frac{100 + 91}{2} = 4{,}5\%$$

Calcularem les pèrdues en el cas de que el sistema girés cada 0,05º. La desviació serà de 0,53 cm.

Àrea captador = 536 cm^2

Àrea de concordança = 510 cm^2

$$\eta = \frac{510}{536} \cdot 100 = 95\%$$

$$P_{perduda,seguiment} = 100 - \frac{100 + 95}{2} = 2{,}5\%$$

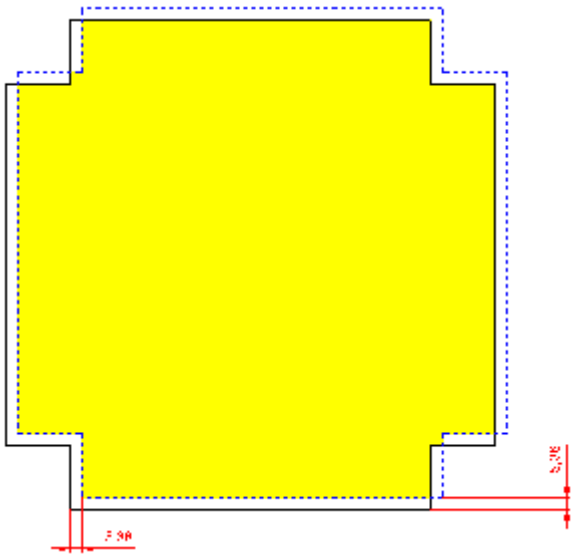


Fig.A4.14. Desviament dels rajos del sol respecte el diàmetre del captador, girant cada 0,05º.

La dada és molt significativa, ja que el captador rep aproximadament uns 25 KW, pel gir cada 0,1º perdem 1'13 KW, i per al gir cada 0,05º només perdem 0,625KW. Ja que els motors pas a pas, treballant a molt baixes revolucions, tenen un consum mínim, els farem girar cada 0,05º.

A4.4 – Motors Pas a Pas

Per poder calcular el par-motor necessari, hem d'observar les diferents posicions de la paràbola í així calcular la inèrcia.

Si mirem la paràbola des de la biga en amunt, la podem veure situada de dues maneres, be mirant al zenit, o be mirant al Sud o Nord, segons estigui disposada, aquest cas correspon al moviment giratori. Tot i així si la mirem des del lateral, tindríem el moviment d'inclinació i sempre veuríem el lateral de la paràbola. Els casos del moviment circular només es donen en ocasions puntuals, tot i això els farem servir per fer els càlculs, ja que son els dos extrems.

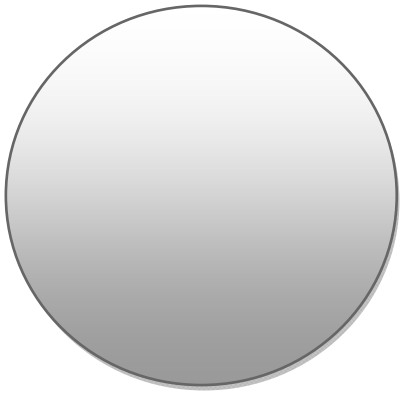


Fig.A4.15 Paràbola enfocada al zenit

Fig.A4.16 Paràbola enfocada a Sud o Nord

A simple vista s'observa que la inèrcia serà superior en el cas de la paràbola enfocada al zenit, per tant serà la forma que utilitzarem.

En primer lloc calcularem el par necessari per moure la paràbola en un cert temps. Començarem definint el moment torçor.

$$[F.A4.14]\ M_t = \propto \cdot I$$

On $\propto$ és l'acceleració angular.

On I és la inèrcia provocada per la paràbola sobre l'eix.

L'acceleració angular és la variació de velocitat angular dividida pel temps que tardarem en fer el moviment. Es pot calcular de la següent manera:

$$[F.A4.15]\ \propto = \frac{2 \cdot \beta}{t^2}$$

On β és l'angle a girar en radians

On t és temps empleat per girar

L'angle que girarem, tal i com hem esmentat anteriorment és de 0,05º i el temps de gir el definirem en 0,3 segons.

$$\propto = \frac{2 \cdot \beta}{t^2} = \frac{2 \cdot 8{,}727 \cdot 10^{-4}\, rad}{(0{,}3s)^2} = 0{,}019\, rad/s^2$$

Calculem doncs l'inèrcia, aquesta correspon al producte de la massa pel radi al quadrat. Considerem la massa distribuïda uniformement en el cos. La massa aproximada correspon a $m = 1400\ kg$ i el radi equivalent de la paràbola són 3 metres.

$$[F.A4.16]\ I = m \cdot r^2 = 1400 \cdot 3^2 = 12600\ Kg \cdot m^2$$

Ja estem en disposició de calcular el moment torçor necessari per moure la càrrega.

$$M_t = \propto \cdot I = 0{,}019 \cdot 12600 = 239{,}4\ Nm$$

Agafarem un engranatge de 15 dents per l'eix, diàmetre 4,5cm i un engranatge per fer girar la paràbola de 60 dents i un diàmetre de 18cm.

A l'engranatge de 60 dents aplicarem una força a la dent de:

$$[F.A4.17]\ F_d = \frac{M_t}{r} = \frac{239{,}4\ Nm}{0{,}09\ m} = 2660\ N$$

Per tant tindrem un moment a l'altre engranatge de:

$$M_{t,motor} = F_d \cdot r = 2850\ N \cdot 0{,}0225\ m = 59{,}85\ Nm$$

El motor ha de ser capaç de donar-nos el doble del moment, o par motor, segons la normativa, per tant el mínim que necessitem és de:

$$[F.A4.18]\ \tau_{motor,min} = M_{t,minim} = 59{,}85 \cdot 2 = 119{,}7\ Nm$$

Es realitza d'aquesta forma per motius de seguretat, ja que podem tenir en alguns casos forces externes com el vent o la carrega de neu.

Tant el motor-reductor que fa girar la paràbola com el que inclina l'eix, hauran de complir aquesta condició, i els dos hauran de girar 2,22 graus en 0,3 segons. La velocitat de gir serà:

$$[F.A4.19]\ RPM_{reductor} = \frac{1\,rev}{360^o} \cdot 2{,}22^o \cdot \frac{60s}{1min} \cdot \frac{1}{0{,}03s} = 12{,}33\,rpm$$

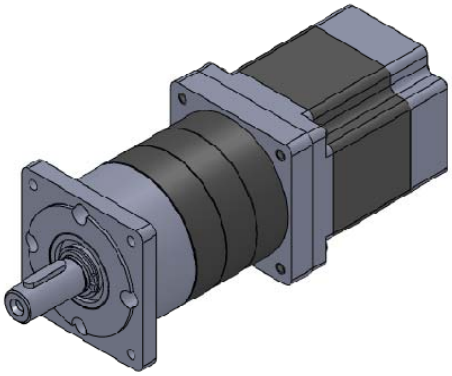


Fig.A4.171 Motor pas a pas 34GN-BK1-S0051

Motor	34KM-K122-00W/99W
Longitud	96 mm
Angle de pas	1,8 º
Intensitat de treball	1,9 A
Resistència elèctrica	3,9 Ohms
Par-Motor	4,8 Nm
Pes	2,9 Kg

Caixa de Canvis	34GN-BK1-S0181
Longitud	155,8 mm
Par-Motor	120 Nm
Eficiència energètica	70%
Pes	3,2 Kg
Etapes	3
Engranatges	Plans
Transmissió	181:1

Un cop seleccionat aquest motor, definirem com ha de funcionar: Per fer el gir de 0,05º el motor haurà de fer 223,5 passos, el que produeix que el reductor giri 2,2º. No farà exactament els 0,05º que necessitem, sinó 0,04989, així que cada cert gir haurà de fer 1 pas extra.

En conjunt del motor-reductor queda de la següent manera.

Conjunt	**34GN-BK1-H0050**
Longitud	249,8 mm
Ample i alt	86 mm
Longitud Eix	47 mm
Diàmetre Eix	19 mm
Pes	6,1 Kg

Annex 5 - Diagrama Sankey

A continuació podem observar el diagrama Sankey del captador solar Stirling, aquest és un resum de l'energia captada i generada pel sistema, desglossant totes les pèrdues i mostrant el percentatge sobre l'energia captada, i quan representa aquest. Finalment mostra l'energia nominal generada i el rendiment global per a una irradiació màxima de 850 W/m^2.

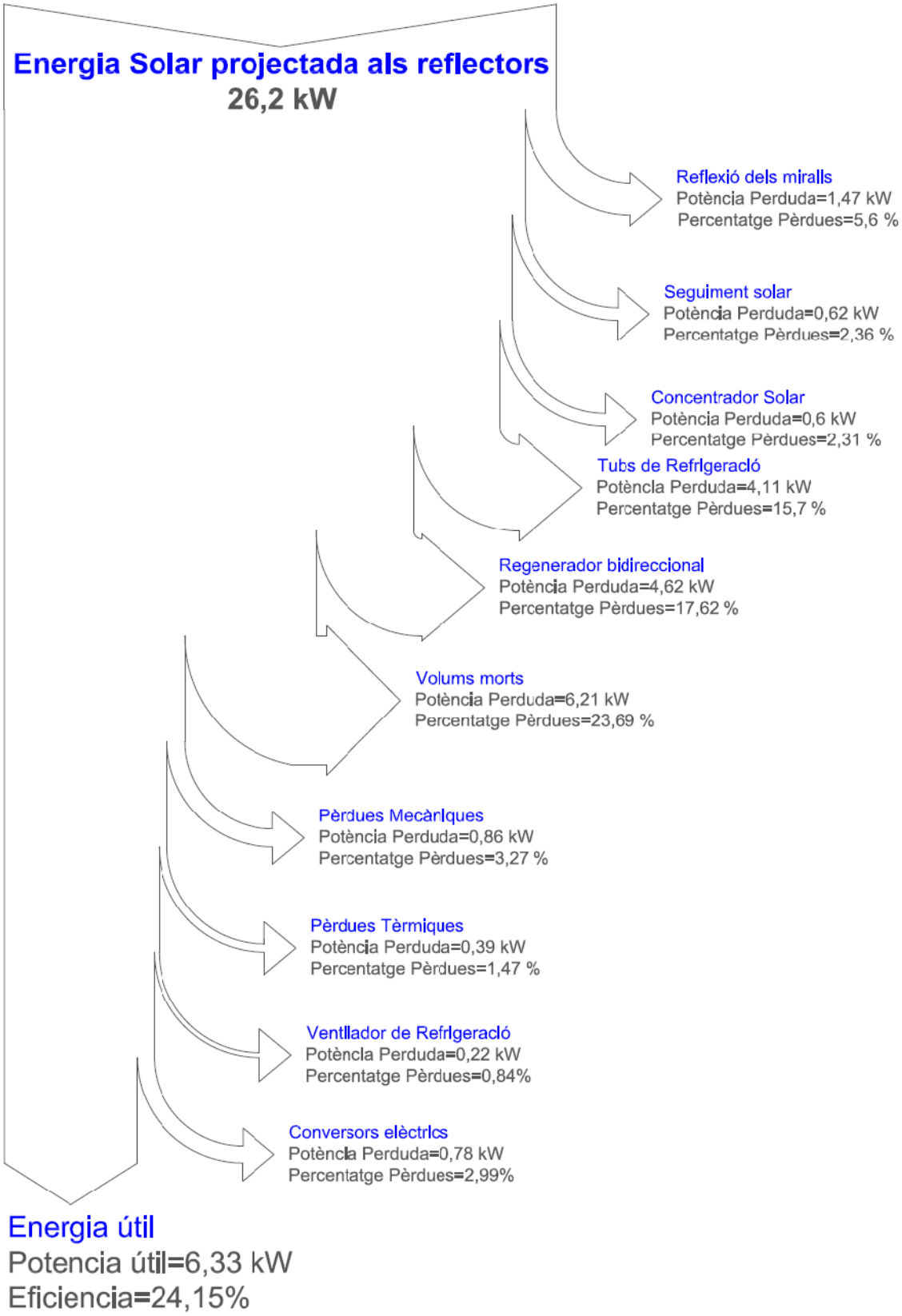


Fig.A5.1. Diagrama Sankey del Captador Solar Stirling

Annex 6 - Hores solars a Espanya

	Andalucía (Sevilla)		Aragón (Zaragoza)		Asturias (Oviedo)		Balears (Mahó)		Canaríes (Las Palmas)		Cantabria (Santander)	
	Anual	Diària	Anual	Diària	Anual	Diària	Anual	Diària	Anual	Diària	Anual	Diària
2004	2931	8,03	2788	7,64	-	-	2535	6,95	3420	9,37	1682	4,61
2005	3058	8,38	3002	8,22	1465	4,01	2358	6,46	-	-	1950	5,34
2006	2816	7,72	2802	7,68	-	-	2357	6,46	3565	9,77	1643	4,50
2007	2954	8,09	2941	8,06	-	-	2244	6,15	3845	10,53	1839	5,04
2008	2993	8,20	2769	7,59	1831	5,02	-	-	-	-	1535	4,21
Mitja	2950	8,08	2860	7,84	1648	4,52	2374	6,50	3610	9,89	1730	4,74

Taula A6.1. Hores solars a España, per comunitats, dades en hores.

	Castilla i León (León)		Castilla i la Mancha (Albacete)		Catalunya (Barcelona)		País Valencia (Alacant)		Extremadura (Badajoz)		Galicia (A Coruña)	
	Anual	Diària	Anual	Diària	Anual	Diària	Anual	Diària	Anual	Diària	Anual	Diària
2004	2790	7,64	2730	7,48	2606	7,14	2754	7,55	2958	8,10	2083	5,71
2005	2947	8,07	3025	8,29	2482	6,80	3010	8,25	3124	8,56	2145	5,88
2006	2734	7,49	2766	7,58	2337	6,40	2781	7,62	2888	7,91	2170	5,95
2007	2763	7,57	2777	7,61	2194	6,01	2886	7,91	2957	8,10	2271	6,22
2008	2774	7,60	2782	7,62	-	-	-	-	2923	8,01	2112	5,79
Mitja	2801	7,68	2816	7,72	2405	6,59	2858	7,83	2970	8,14	2156	5,91

Taula A6.2 Hores solars a España, per comunitats, dades en hores.

	Madrid (Madrid)		Navarra (Pamplona)		La rioja (Logroño)		País Vasco (Bilbao)	
	Anual	Diària	Anual	Diària	Anual	Diària	Anual	Diària
2004	2698	7,39	2235	6,12	2249	6,16	1456	3,99
2005	3023	8,28	2488	6,82	2461	6,74	1731	4,74
2006	2710	7,42	2404	6,59	2474	6,78	1581	4,33
2007	-	-	2277	6,24	2476	6,78	1453	3,98
2008	-	-	2166	5,93	2393	6,56	1530	4,19
Mitja	2810,3	7,70	2314	6,34	2411	6,60	1550	4,25

Taula A6.3 Hores solars a España, per comunitats, dades en hores.

Annex 7 - Càlcul d'esforços

Aquest annex el dedicarem a calcular els esforços que han de suportar algunes de les peces del nostre dispositiu; en primer lloc, dissenyarem les peces en 3D amb l'Autocad i posteriorment les traslladarem a l'Ansys, per fer els càlculs d'esforços.

A l'Ansys farem el mallat de la peça, seguint els mètodes de càlcul per elements finits, posteriorment hi aplicarem les condicions de contorn i les càrregues a les que està sotmesa la peça.

Abans de tot, farem una simple comprovació d'esforços, calculant l'esforç manualment i comparant-t'ho amb els resultats que ens proporciona el programa, per certificar que estem treballant de forma correcta.

Abans de tot definirem les unitats a fer servir:

Unitats	MPa	Pa	N/mm^2	Kg/cm^2
Conversió	1	$x\ 1 \cdot 10^6$	x 1	x 10
Acer S275	275	$275 \cdot 10^6$	275	2750

Les unitats de força que utilitza l'Ansys són els Pa, i de longitud els mil·límetres.

Per fer la comprovació farem ús d'una biga encastada en voladís, amb una càrrega de 100 Kg a l'extrem, aquesta tindrà una secció de 50x50 mm i un metre de llarg.

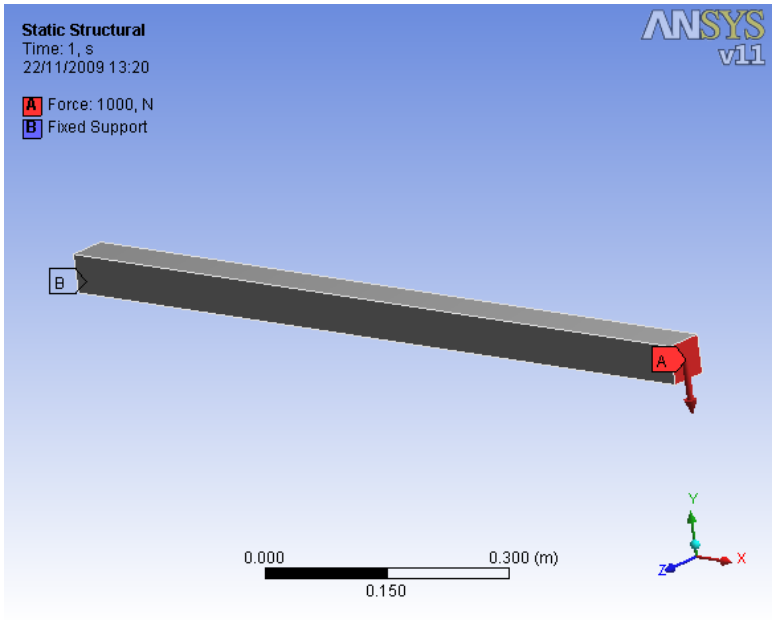


Fig.A7.1. Condicions de contorn i càrregues

Abans d'analitzar els càlculs amb el programa els farem a mà. Per calcular la tensió màxima de biga en voladís amb secció rectangular utilitzarem la següent formula.

$$[FA8.1] \quad \sigma_{max} = \frac{6 \cdot P \cdot L}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot 1000\ N \cdot 1000\ mm}{50\ mm \cdot 50\ mm^2} = 48 \frac{N}{mm2} = 4{,}8 \cdot 10^7\ Pa$$

Estem per sota del límit elàstic del material, per tant encara ens aguantaria.

També calcularem la màxima fletxa a partir de la següent fórmula:

$$[FA8.2] \quad y_{max} = \frac{4 \cdot L^3 \cdot F}{Y \cdot b \cdot h^3} = \frac{4 \cdot 1^3 \cdot 1000}{20{,}6 \cdot 10^{10} \cdot 0{,}05 \cdot 0{,}05^3} = 0{,}0031\ m = 3{,}1\ mm$$

On Y és el mòdul de Young expressat en N/m^2.

Ja podem procedir a fer els càlculs de la biga, per començar s'ha de fer el mallat, amb triangles de 1 mm i un factor d'ampliació de 50.

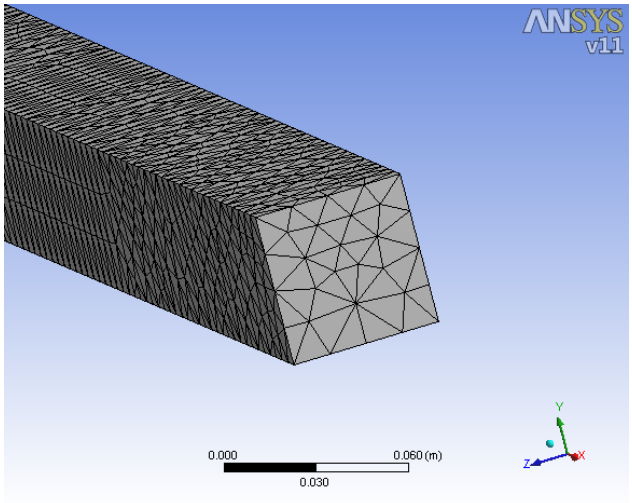


Fig.A7.2. Mallat de la peça

Es calcula la tensió suportada en l'eix X, on es veu la màxima tensió.

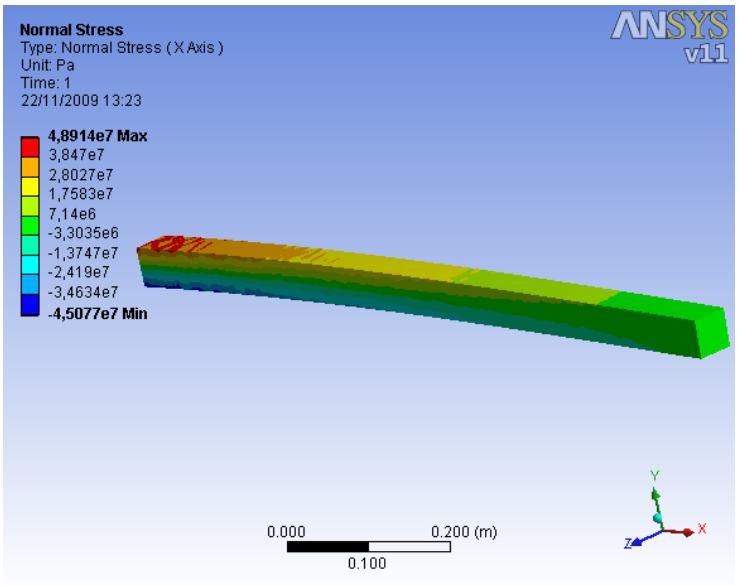


Fig.A7.3. Esforç en l'eix X

La tensió màxima és $4{,}89 \cdot 10^7$ Pa i la calculada a mà ens dona $4{,}8 \cdot 10^7$ Pa, evidentment no dona igual degut a que en el nostre càlcul no tenim en compte la deformació, però el resultat el donem com a correcte per la seva mínima variació.

El programa també ens mostra les tensions equivalents en cada punt, el conegut com assaig de Von-Mises.

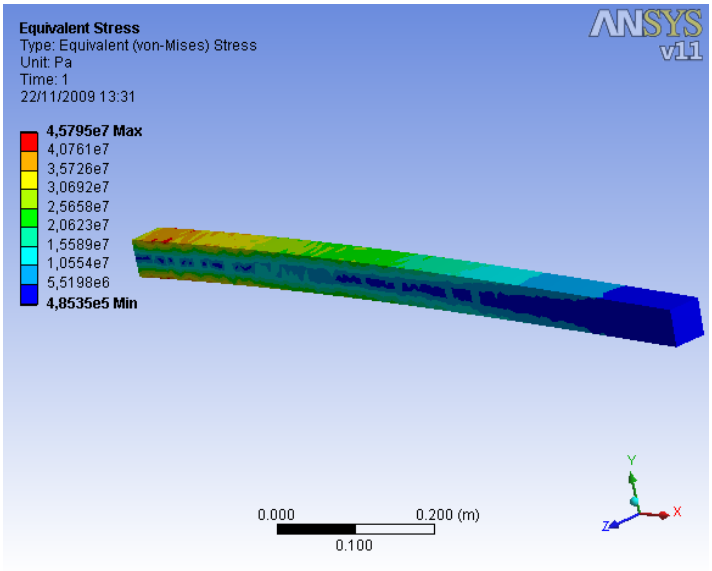


Fig.A7.4. Esforços totals, assaig de Von-Mises

Les màximes deformacions de la peça, són de 2,9 mm. Calculat a mà el resultat ens dona 3,1 mm, dada força equivalent.

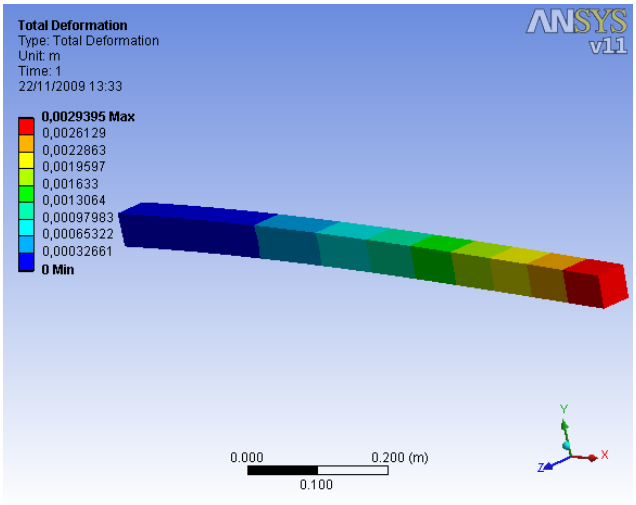


Fig.A7.5. Deformacions de la peça

Un cop fetes aquestes comprovacions ja es pot procedir a l'anàlisi de tot tipus de peces, ja que les dades que ens proporciona el programa són correctes.

Motor Stirling, tubs de connexió

Peça	Tubs de connexió, corresponent a les peces: MS-030, MS-031, MS-042, MS-043, MS-045, MS-046, MS-047 i MS-048.
Assaig	Dimensionament de la paret dels tubs de connexió.
Observacions	Diàmetre intern 1 cm, paret des de 1,5 mm fins a 10 mm.
Carrega	Pressió interna de 60 bars.
Suports	Laterals del tub.
Material	Coure - límit elàstic $1{,}24 \cdot 10^8$ Pa.
Resultat	Força de $2'5 \cdot 10^7$ MPa en la paret de 1,5mm i $1{,}4 \cdot 10^7$ MPa en la paret de 5mm. Deformació màxima inferior a 0,1 mm.
Valoració	Dissenyarem el tub amb una paret de 5 mm, per tenir un marge de seguretat força ampli, s'ha de pensar que en algun cas estem a 600ºC.

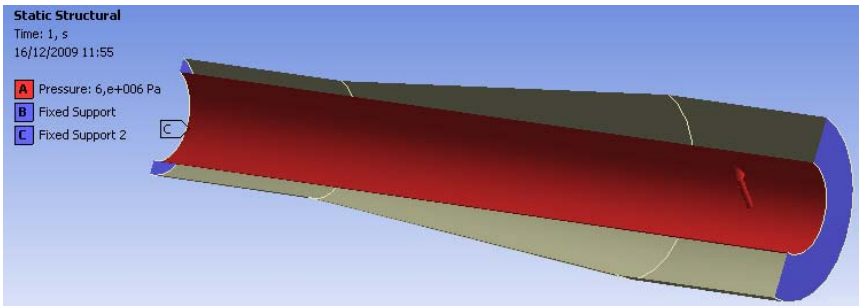


Fig.A7.6. Tubs de connexió, condicions de contorn

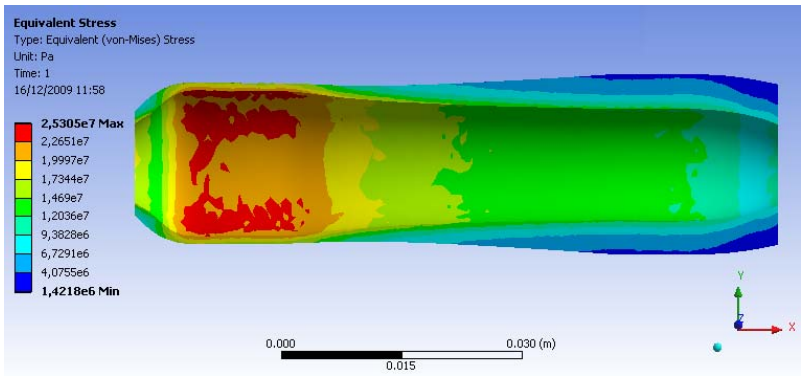


Fig.A7.7. Tubs de connexió, assaig de Von-Mises

Motor Stirling, tub d'elements

Peça	Tubs d'elements MS-007, MS-030, MS-031, MS-035 i MS-044.
Assaig	Comprovació de la paret dels tubs dels diferents elements.
Observacions	Diàmetre intern 3 mm, paret de 1,5 mm.
Carrega	Pressió interna de 60 bars.
Suports	Laterals del tub.
Material	Coure - límit elàstic $1{,}24 \cdot 10^8$ Pa i Waspaloy $2{,}92 \cdot 10^8$ Pa a 900ºC.
Resultat	Força màxima de $1'3 \cdot 10^7$ MPa. Deformació màxima inferior a 0,1 mm.
Valoració	El tub aguanta àmpliament la pressió aplicada, tant amb un material com amb l'altre.

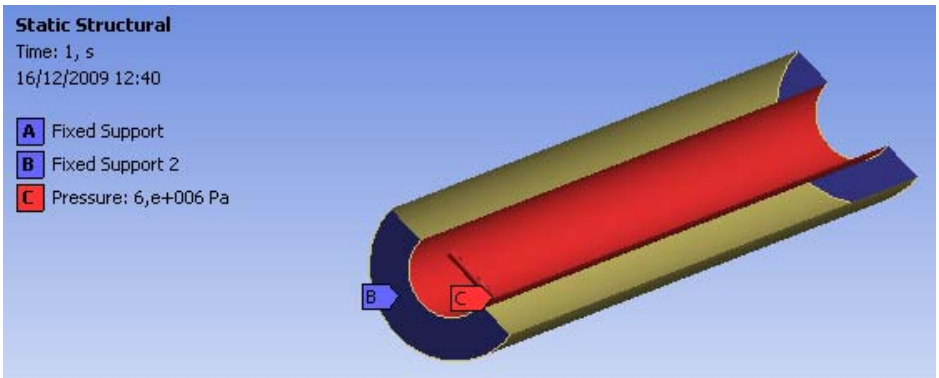


Fig.A7.8. Tub d'elements, condicions de contorn

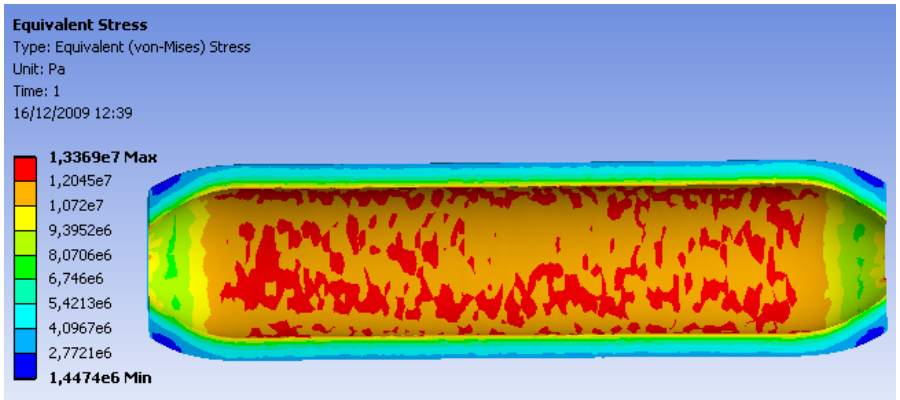


Fig.A7.9. Tub d'elements, assaig de Von-Mises

Motor Stirling, cilindre d'aire calent

Peça	Cilindre calent MS-011, extrapolable a les peces: MS-005.
Assaig	Comprovació de la resistència del cilindre d'alta temperatura.
Carrega	Pressió interna de 60 bars.
Suports	Part inferior i superior del cilindre.
Material	INCONEL®, límit elàstic $1{,}40 \cdot 10^8$ Pa a 800ºC.
Resultat	Força màxima de $4'3 \cdot 10^7$ MPa. Deformació màxima inferior a 0,1 mm.
Valoració	El cilindre aguanta àmpliament la pressió aplicada.

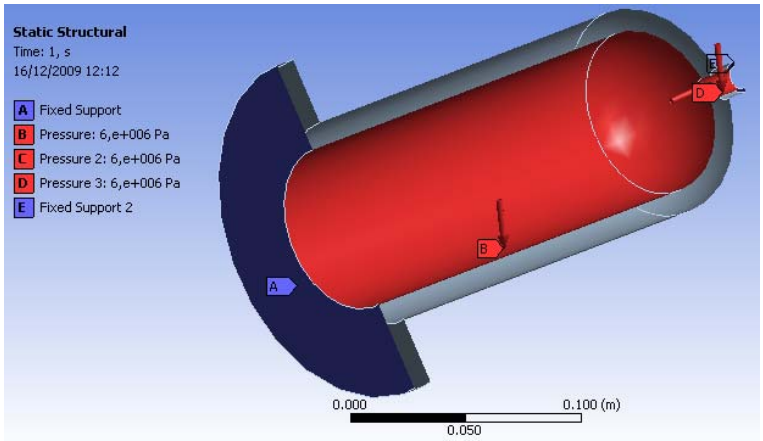


Fig.A7.10. Cilindre d'aire calent, condicions de contorn

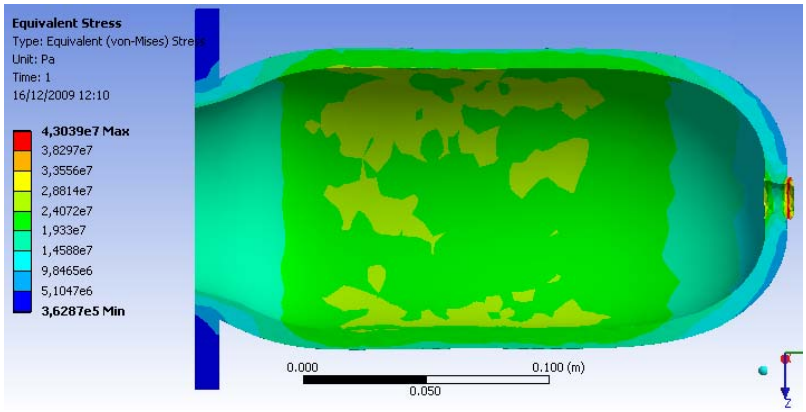


Fig.A7.11. Cilindre d'aire calent, assaig de Von-Mises

Engranatges

Peça	Engranatge SI-003, extrapolable a les peces: SI-004, SG-006 i SG-007.
Assaig	Comprovació de la resistència de les dents de l'engranatge.
Carrega	Força de 2100 N aplicada al llarg de la dent.
Suports	Xaveta, paret que rep la força.
Material	Acer al carboni F-1150, límit elàstic $2{,}91 \cdot 10^8$ Pa.
Resultat	Força màxima de $1'78 \cdot 10^8$ MPa. Deformació màxima inferior a 0,1 mm.
Valoració	L'engranatge de menor tamany es capaç d'aguantar l'esforç màxim aplicable amb un coeficient de seguretat de 1,6.

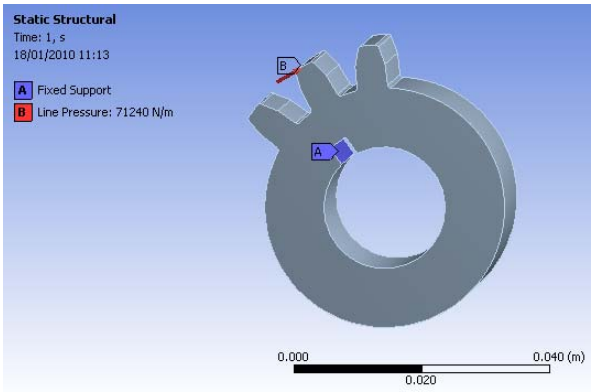


Fig.A7.12. Engranatge, condicions de contorn

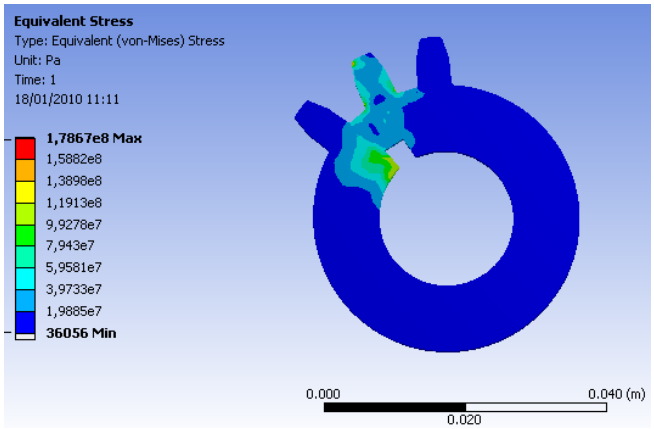


Fig.A7.13. Engranatge, assaig de Von-Mises

Sistema de subjecció de rodaments

Peça	Sistema de subjecció de rodaments SG-003.
Assaig	Comprovació de resistència.
Carrega	Pressió de $5{,}5 \cdot 10^7$ Pa, corresponent a una força de 1500 kg.
Suports	Als 4 forats dels cargols.
Material	Fosa nodular A-476, límit elàstic $3{,}08 \cdot 10^8$ Pa.
Resultat	Força màxima de $3'85 \cdot 10^7$ MPa. Deformació màxima inferior a 0,1 mm.
Valoració	La peça es capaç de suportar l'esforç aplicat àmpliament.

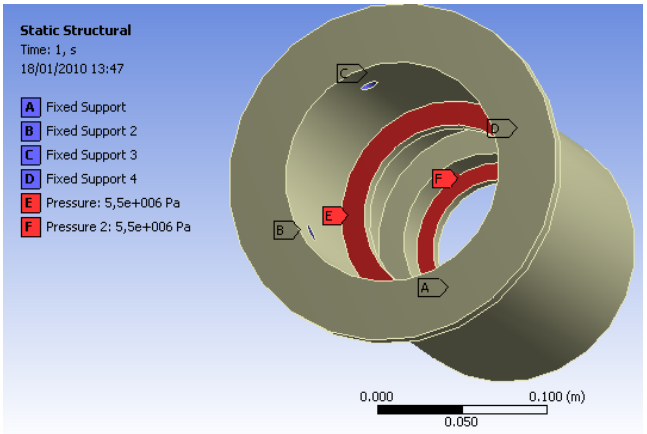


Fig.A7.14. Sistema de subjecció de rodaments, condicions de contorn

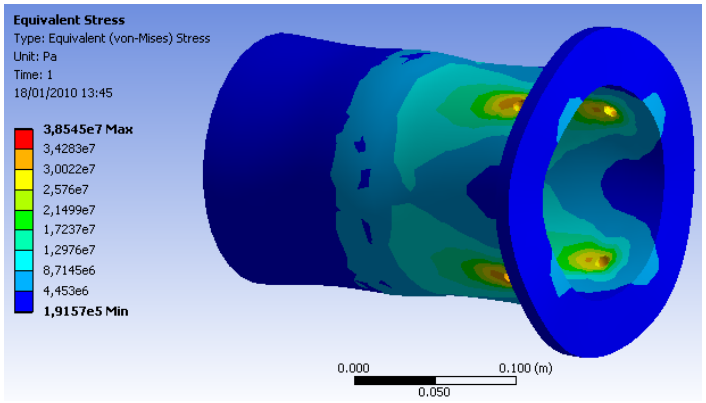


Fig.A7.15. Sistema de subjecció de rodaments, assaig de Von-Mises

Plataforma giratòria

Peça	Plataforma giratòria SG-002.
Assaig	Comprovació de resistència.
Carrega	Pressió de 26000 Pa, corresponent a una força de 1500 kg.
Suports	Als recolzaments amb els rodaments.
Material	Fosa nodular A-476, límit elàstic $3{,}08 \cdot 10^8$ Pa.
Resultat	Força màxima de $8'89 \cdot 10^5$ MPa. Deformació màxima inferior a 0,1 mm.
Valoració	La peça es capaç de suportar l'esforç aplicat àmpliament.

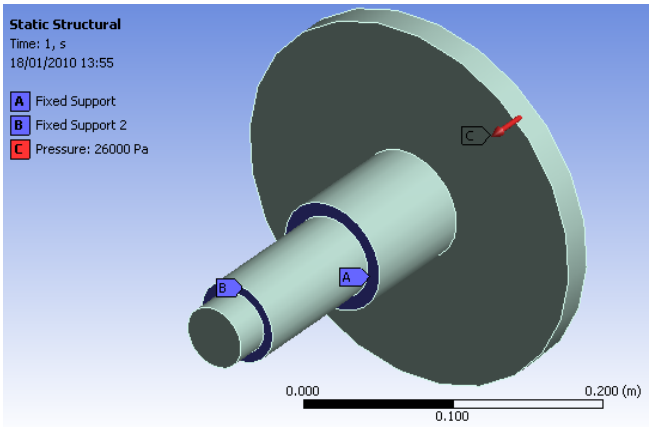


Fig.A7.16. Plataforma giratòria, condicions de contorn

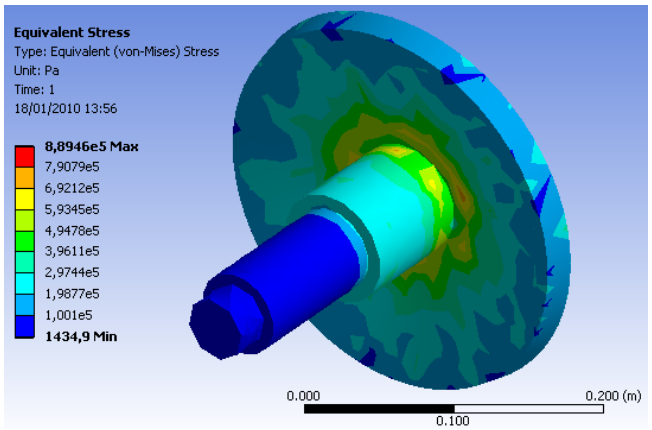


Fig.A7.17. Plataforma giratòria, assaig de Von-Mises

Plataforma de sustentació de l'eix d'inclinació

Peça	Plataforma de sustentació de l'eix d'inclinació SI-002.
Assaig	Comprovació de resistència.
Carrega	Forces de 7500 N aplicades als dos encaixos per als coixinets.
Suports	A la part inferior.
Material	Acer al carboni F-1150, límit elàstic $2{,}91 \cdot 10^8$ Pa
Resultat	Força màxima de $8'59 \cdot 10^6$ MPa. Deformació màxima inferior a 0,1 mm.
Valoració	La peça es capaç de suportar l'esforç aplicat àmpliament.

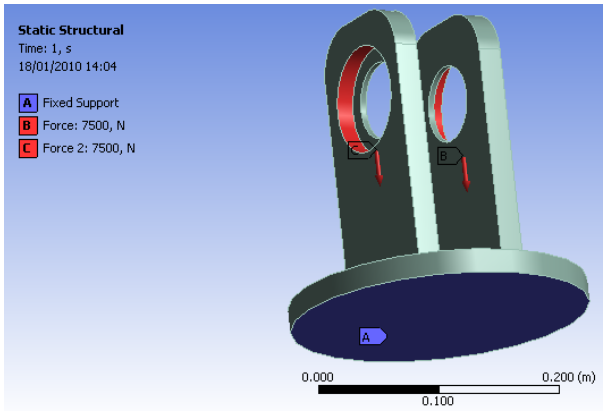


Fig.A7.18. Plataforma de sustentació de l'eix d'inclinació, condicions de contorn

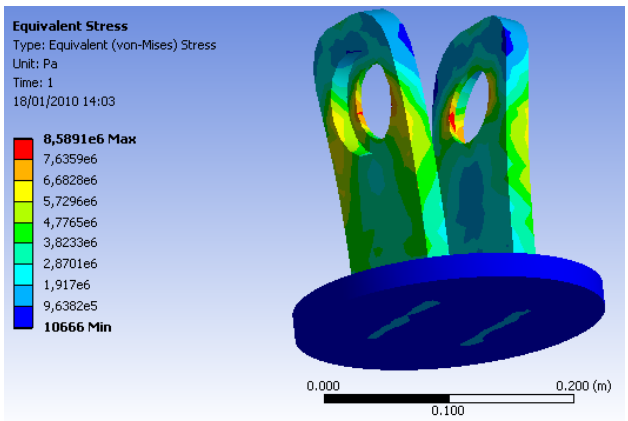


Fig.A7.19. Plataforma de sustentació de l'eix d'inclinació, assaig de Von-Mises

Eix d'inclinació

Peça	Eix d'inclinació SI-006.
Assaig	Comprovació de resistència.
Carrega	Forces de 7000 N aplicades al grafilat.
Suports	Posició central, en la ubicació dels coixinets.
Material	Acer al carboni F-1150, límit elàstic $2{,}91 \cdot 10^8$ Pa.
Resultat	Força màxima de $1'48 \cdot 10^8$ MPa. Deformació màxima inferior a 0,1 mm.
Valoració	La peça es capaç de suportar l'esforç, amb un marge de seguretat de 2.

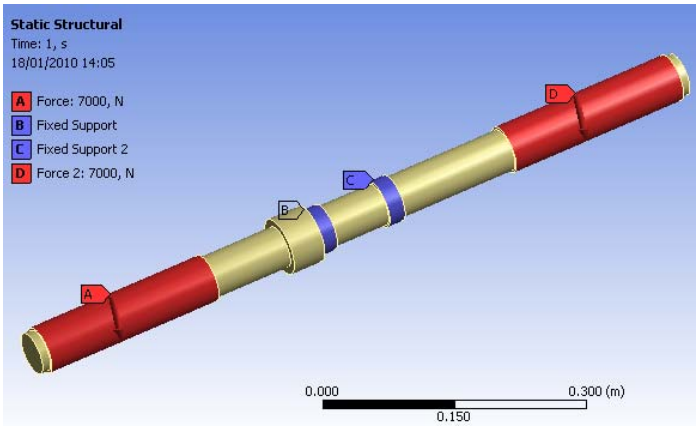


Fig.A7.20. Eix d'inclinació, condicions de contorn

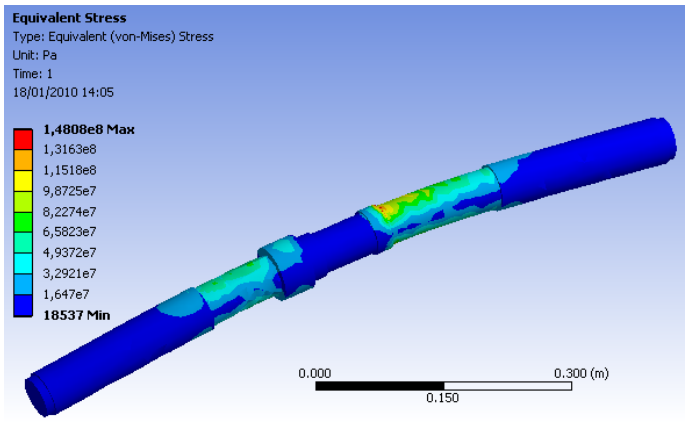


Fig.A7.21. Eix d'inclinació, assaig de Von-Mises

Pistó fred

Peça	Pistó fred MS-001 extrapolable a les peces: MS-007.
Assaig	Comprovació de resistència.
Carrega	Pressió de 30 bars, corresponent a la màxima diferencia de pressions.
Suports	Als recolzaments amb el boló.
Material	Fosa nodular A-476, límit elàstic $3{,}08 \cdot 10^8$ Pa.
Resultat	Força màxima de $3'43 \cdot 10^6$ MPa. Deformació màxima inferior a 0,1 mm.
Valoració	La peça es capaç de suportar l'esforç aplicat àmpliament.

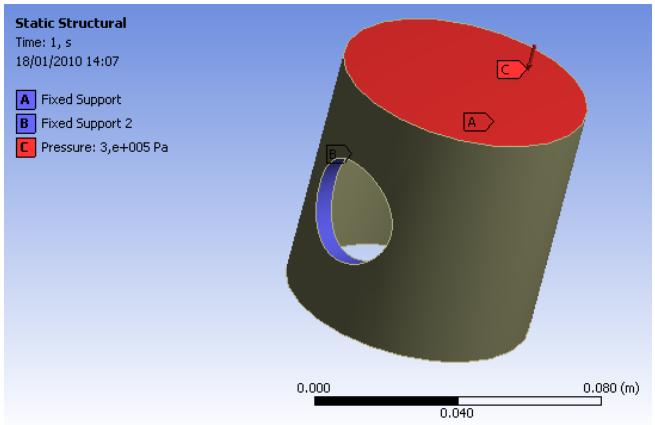


Fig.A7.22. Pistó fred, condicions de contorn

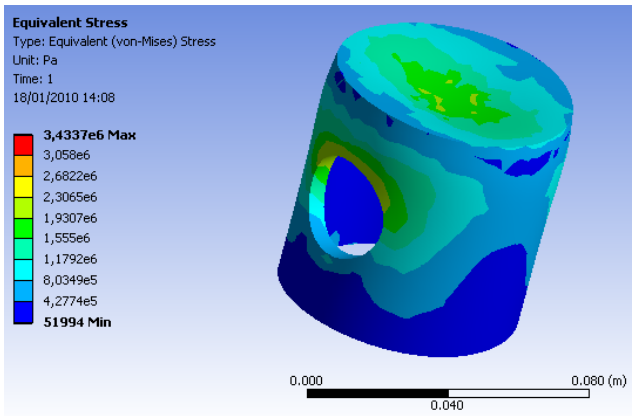


Fig.A7.23. Pistó fred, assaig de Von-Mises

Biela del pistó fred

Peça	Biela del pistó fred MS-006, extrapolable a les peces: MS-012.
Assaig	Comprovació de resistència.
Carrega	Força de 1000 N.
Suports	Encaix amb el cigonyal.
Material	Fosa nodular A-476, límit elàstic $3{,}08 \cdot 10^8$ Pa.
Resultat	Força màxima de $2'33 \cdot 10^6$ MPa. Deformació màxima inferior a 0,1 mm.
Valoració	La peça es capaç de suportar l'esforç aplicat àmpliament.

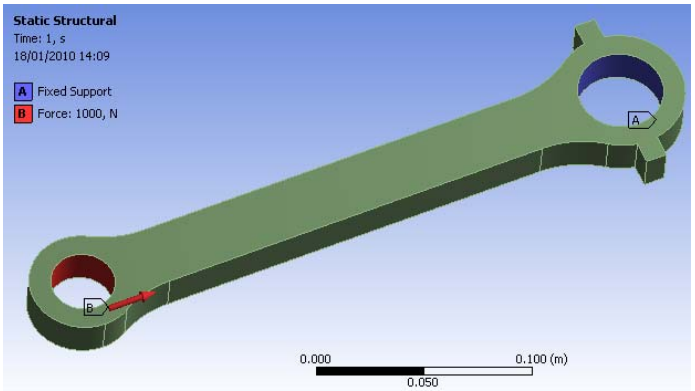


Fig.A7.24. Biela del pistó fred, condicions de contorn

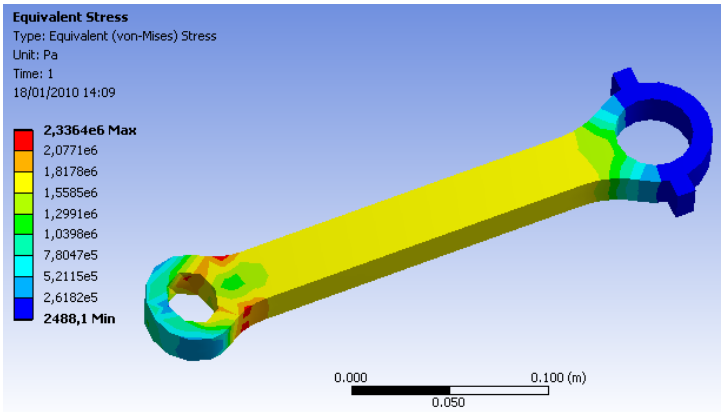


Fig.A7.25. Biela del pistó fred, assaig de Von-Mises

Pressupost

Índex del Pressupost

Pressupost 142
P.1 - Motor Stirling 142
P.2 - Sistema giratori 147
P.3 - Sistema d'inclinació 148
P.4 - Estructura del disc 149
P.5 - Estructura de la parabòlica 152
P.6 - Components elèctrics 153
P.7 - Cost total de l'instal·lació 154

Pressupost

El pressupost s'ha realitzat tenint en compte que dissenyem un prototip. Aquest no és rentable econòmicament, degut a la diferencia de preu entre mecanitzar una peça o tenir una producció en cadena.

El preus de mecanitzar han estat consultats a l'empresa "*Mecanizados Folkman S.L.*", donant preus orientatius de les peces, a part, algunes peces haurien de ser modificades en recomanació de l'empresa, per abaratir-ne el seu preu.

Les peces prefabricades, tals com, motors elèctrics, juntes, silenblocs, ... no tindran preu de mecanitzat ni de material, es mostrarà el seu preu total.

El pes del material respon al bloc necessari per poder realitzar la peça, i no al de la pròpia peça.

P.1 - Motor Stirling

Peça	Descripció	Material/Concepte	Un./kg/ hores	Preu unitari (€/un)	Total (€)
MS-001	Pistó fred	Fosa nodular A476	2,12 kg	3,2	6,78
		Mecanitzat	1 Un.	70	70
MS-002	Boló del pistó fred	Fosa nodular A476	0,35 kg	3,2	1,12
		Mecanitzat	1 Un.	15	15
MS-003	Anells de Compressió del pistó fred	"*ROLCAR*"	2 Un.	5,25	10,50
MS-004	Anells de lubricació del pistó fred	"*ROLCAR*"	1 Un.	10,30	10,30
MS-005	Cilindre fred	Fosa nodular A476	26,2 kg	3,2	83,84
		Mecanitzat	1 Un.	180	180
MS-006	Biela pistó fred	Fosa nodular A476	4,15 kg	3,2	13,28
		Mecanitzat	1 Un.	60	60

MS-007	Pistó calent	INCONEL® 750	3,19 kg	38,42	122,56
		Mecanitzat	1 Un.	80	80
MS-008	Boló del pistó calent	INCONEL® 750	0,38 kg	38,42	14,6
		Mecanitzat	1 Un.	15	15
MS-009	Anells de Compressió del pistó calent	*"ROLCAR"*	2 Un.	5,25	10,50
MS-010	Anells de lubricació del pistó calent	*"ROLCAR"*	1 Un.	10,30	10,30
MS-011	Cilindre calent	INCONEL® 750	39,04 kg	38,42	1500
		Mecanitzat	1 Un.	350	350
MS-012	Biela pistó calent	INCONEL® 750	4,32 kg	38,42	165,97
		Mecanitzat	1 Un.	60	60
MS-013	Vàlvula antirretorn i Junta tòrica	*"Swagelok"*	2 Un.	15,25	30,5
MS-015	Reten, sortida del eix motor Model: SW40	*"GAT"*	1 Un.	32,56	32,56
MS-016	Rodament casa FAG Model: 7308B-TVP	*"FAG"*	2 Un.	115,21	230,42
MS-017	Tapa Rodament sortida eix motor	Alumini 2024-T3	0,91 kg	4	3,64
		Mecanitzat	1 Un.	60	60
MS-018	Motor síncron d'imants permanents de 4 pols	*"SALES"*	1 Un.	590,51	590,51
MS-019	Tapa davantera del bloc motor, sortida d'eix	Alumini 2024-T3	65,98 kg	4	263,92
		Mecanitzat	1 Un.	850	850
MS-020	Tapa del darrera del bloc motor	Alumini 2024-T3	10,28 kg	4	41,12
		Mecanitzat	1 Un.	300	300
MS-021	Tapa Rodament part del darrera	Alumini 2024-T3	0,95 kg	4	3,8
		Mecanitzat	1 Un.	60	60
MS-022	Bloc Motor	Alumini 2024-T3	110,2 kg	4	440,8
		Mecanitzat	1 Un.	1550	1550

MS-023	Acoblament d'eixos	Fosa nodular A476	2,22 kg	3,2	7,1
		Mecanitzat	2 Un.	60	120
MS-024	Cigonyal	Acer Carboni F-1150	4,72 kg	0,8	3,77
		Mecanitzat	1 Un.	2300	2300
MS-025	Tapa d'entrada i sortida d'oli	Alumini 2024-T3	0,06 kg	4	0,24
		Mecanitzat	2 Un.	3	6
MS-026	Junta tòrica del oli	Segons Fabricant	2 Un.	2	4
MS-027	Tubs de concentració d'energia	Waspaloy®	3,16 kg	43,24	136,69
		Soldador	5 hores	23,4	117
MS-028	Tancament concentrador d'energia	Waspaloy®	16,52 kg	43,24	714,32
		Mecanitzat	1 Un.	100	100
MS-029	Vidre del concentrador d'energia	Vidre clar (5mm)	0,06 m^2	19,49	1,17
MS-030	Paret del refrigerador, banda del regenerador	Alumini 2024-T3	3,97 kg	4	15,88
		Mecanitzat	1 Un.	1600	1600
MS-031	Paret del refrigerador, banda del pistó fred	Alumini 2024-T3	3,97 kg	4	15,88
		Mecanitzat	1 Un.	1600	1600
MS-032	Subjecció del ventilador part dreta	Alumini 2024-T3	5,4 kg	4	21,6
		Mecanitzat	1 Un.	50	50
MS-033	Subjecció del ventilador part esquerra	Alumini 2024-T3	5,4 kg	4	21,6
		Mecanitzat	1 Un.	50	50
MS-034	Ventilador, sistema de refrigeració	"*SIEMENS*"	1 Un.	130,54	130,54
MS-035	Tubs amb aletes del refrigerador	Coure C51000	33,14 kg	5,8	192,21
		Mecanitzat	20 Un.	150	3000
MS-036	Silenblocs gran	*"FARE S.L."*	8 Un.	0,25	2
MS-037	Silenblocs petit	*"FARE S.L."*	12 Un.	0,2	2,4
MS-038	Suport motor Stirling banda dreta	Acer carboni F-1150	11,23 kg	0,8	8,98
		Mecanitzat	1 Un.	150	150

MS-039	Suport motor Stirling banda esquerra	Acer carboni F-1150	12,35 kg	0,8	9,88
		Mecanitzat	1 Un.	150	150
MS-040	Tapa lateral del refrigerador	Alumini 2024-T3	0,81 kg	4	3,24
		Mecanitzat	2 Un.	40	80
MS-041	Circuit de pas d'aire del refrigerador	Alumini 2024-T3	3,88 kg	4	15,52
		Mecanitzat	1 Un.	400	400
MS-042	Tub concentrador – regenerador 2	Coure C51000	3,96 kg	5,8	22,97
		Mecanitzat	1 Un.	30	30
MS-043	Tub divisor del concentrador solar	Coure C51000	16,14 kg	5,8	93,61
		Mecanitzat	2 Un.	600	1200
MS-044	Tub concentrador – regenerador 1	Coure C51000	0,9 kg	5,8	5,22
		Soldador	2 hores	23,4	46,8
MS-045	Tub regenerador – refrigerador	Coure C51000	2,4 kg	5,8	13,92
		Mecanitzat	1 Un.	30	30
MS-046	Tub pistó calent – concentrador	Coure C51000	1,8 kg	5,8	10,44
		Mecanitzat	1 Un.	25	25
MS-047	Tub refrigerador – pistó fred	Coure C51000	5,54 kg	5,8	32,13
		Mecanitzat	1 Un.	40	40
MS-048	Regenerador	Coure C51000	2,28 kg	5,8	13,22
		Mecanitzat	1 Un.	3200	3200
MS-049	Junta de les unions entre tubs	*"LATTYgraf EFA"*	8 Un.	15	120
MS-050	Junta del pistó calent amb el bloc motor	*"LATTYgraf EFA"*	1 Un.	20	20
MS-051	Junta del pistó fred amb el bloc motor	*"LATTYgraf EFA"*	1 Un.	20	20
MS-052	Junta de les tapes del bloc motor	*"LATTYgraf EFA"*	2 Un.	40	80
MS-053	Cantonera per a la subjecció del vidre del concentrador	Fosa nodular A476	0,49 kg	3,2	1,57
		Mecanitzat	4 Un.	15	60

MS-058	Sustentador del motor Stirling	Acer carboni F-1140	18,15 kg	0,75	13,62
		Soldador	7 hores	23,4	163,8
MS-060	Cobertura del motor, part esquerra	Fibra de vidre	6,4 kg	7	44,8
		Extruït	1 Un.	150	150
MS-061	Cobertura del motor, part dreta	Fibra de vidre	6,4 kg	7	44,8
		Extruït	1 Un.	150	150
---------	Aïllant tèrmic	Llana de Roca	1 kg	6,2	6,2
Muntatge del motor Stirling (2 Muntadors)			4 hores	2x23,8	190,4
Subtotal Motor Stirling				**24.095,54 €**	

P.2 - Sistema giratori

Peça	Descripció	Material/Concepte	Un./kg/ hores	Preu unitari (€/un)	Total (€)
SG-001	Suport del motor pas a pas del sistema giratori	Fosa nodular A476	8,81 kg	3,2	28,19
		Mecanitzat	1 Un.	150	150
SG-002	Plataforma giratòria	Acer carboni F-1150	70,27 kg	0,8	224,8
		Mecanitzat	1 Un.	180	180
SG-003	Sistema de subjecció de rodaments	Acer carboni F-1150	58 kg	0,8	46,4
		Mecanitzat	1 Un.	400	400
SG-004	Rodament casa FAG Model: 7312B-TVP	*"FAG"*	1 Un.	132,21	132,21
SG-005	Rodament casa FAG Model: 7309B-TVP	*"FAG"*	1 Un.	120,21	120,21
SG-006	Engranatge acoblat al eix motor, casa CLR model: SS30/25A	*"RS"*	1 Un.	11,08	11,08
		Mecanitzat	1 Un.	15	15
SG-007	Engranatge acoblat a la plataforma giratòria, casa CLR model: SS30/100A	*"RS"*	1 Un.	78,12	78,12
		Mecanitzat	1 Un.	15	15
ME-001	Motor elèctric Pas a Pas, de la casa NMB, model 34KM-K122-00W/99W	*"NMB"*	1 Un.	34,9	34,9
ME-002	Caixa d'engranatges, de la casa NMB, model 34GN-BK1-S0181	*"NMB"*	1 Un.	125,24	125,24
AL-001	Xaveta normalitzada, tipus DIN6885	"Mecanizados Folkman"	1 Un.	0,2	0,2
Muntatge del Sistema giratori (1 muntador)			2 hores	23,8	47,6
Subtotal sistema giratori				**1.608,95 €**	

P.3 - Sistema d'inclinació

Peça	Descripció	Material/Concepte	Un./kg/ hores	Preu unitari (€/un)	Total (€)
SI-001	Suport del motor pas a pas del sistema d'inclinació	Fosa nodular A476	3,4 kg	3,2	10,88
		Mecanitzat	1 Un.	80	80
SI-002	Plataforma de sustentació del eix d'inclinació	Acer carboni F-1150	97,71 kg	0,8	78,17
		Mecanitzat	1 Un.	1050	1050
SI-003	Engranatge acoblat al eix motor, casa CLR model: SS30/15A	*"RS"*	1 Un.	6,75	6,75
		Mecanitzat	1 Un.	15	15
SI-004	Engranatge acoblat al eix d'inclinació, casa CLR model: SS30/60A	*"RS"*	1 Un.	46,98	46,98
		Mecanitzat	1 Un.	15	15
SI-006	Eix d'inclinació	Acer carboni F-1150	24,07 kg	0,8	19,26
		Mecanitzat	1 Un.	230	230
SI-007	Tapa de l'eix d'inclinació	Acer carboni F-1150	0,26 kg	0,8	0,21
		Mecanitzat	1 Un.	15	15
SI-008	Rodament casa FAG Model: 322 10 A	*"FAG"*	2 Un.	72,15	144,3
ME-001	Motor elèctric Pas a Pas, de la casa NMB, model 34KM-K122-00W/99W	*"NMB"*	1 Un.	34,9	34,9
ME-002	Caixa d'engranatges, de la casa NMB, model 34GN-BK1-S0181	*"NMB"*	1 Un.	120,24	120,24
AL-001	Xaveta normalitzada, tipus DIN6885	"Mecanizados Folkman"	2 Un.	0,2	0,4
Muntatge del Sistema d'inclinació (1 muntador)			2 hores	23,8	47,6
Subtotal sistema d'inclinació				**1.914,69 €**	

P.4 - Estructura del disc

Peça	Descripció	Material/Concepte	Un./kg/ hores	Preu unitari (€/un)	Total (€)
ED-001	Estructura vertical del disc parabòlic, peça esquerra	Acer S-275-JR	21,06 kg	0,7	14,74
		Soldador	6 hores	23,4	140,4
		Mecanitzat	1 Un.	1200	1200
ED-002	Estructura vertical del disc parabòlic, peça dreta	Acer S-275-JR	21,06 kg	0,7	14,74
		Soldador	6 hores	23,4	140,4
		Mecanitzat	1 Un.	1200	1200
ED-003	Estructura vertical del disc parabòlic, peça esquerra	Acer S-275-JR	21,06 kg	0,7	14,74
		Soldador	6 hores	23,4	140,4
		Mecanitzat	1 Un.	1200	1200
ED-004	Estructura vertical del disc parabòlic, peça dreta	Acer S-275-JR	21,06 kg	0,7	14,74
		Soldador	6 hores	23,4	140,4
		Mecanitzat	1 Un.	1200	1200
ED-005	Estructura vertical del disc parabòlic, peça esquerra	Acer S-275-JR	17,16 kg	0,7	12,02
		Soldador	5 hores	23,4	117
		Mecanitzat	1 Un.	1000	1000
ED-006	Estructura vertical del disc parabòlic, peça dreta	Acer S-275-JR	17,16 kg	0,7	12,02
		Soldador	5 hores	23,4	117
		Mecanitzat	1 Un.	1000	1000
ED-007	Estructura vertical del disc parabòlic, peça central	Acer S-275-JR	8,58 kg	0,7	6
		Soldador	3 hores	23,4	70,2
		Mecanitzat	1 Un.	600	600
ED-008	Estructura horitzontal del disc parabòlic 1	Acer S-275-JR	7,61 kg	0,7	5,32
		Mecanitzat	1 Un.	600	600
ED-009	Estructura horitzontal del disc parabòlic 2	Acer S-275-JR	14,04 kg	0,7	9,82
		Mecanitzat	1 Un.	600	600

ED-010	Estructura horitzontal del disc parabòlic 3	Acer S-275-JR	14,04 kg	0,7	9,82
		Mecanitzat	1 Un.	600	600
ED-011	Estructura horitzontal del disc parabòlic 4	Acer S-275-JR	14,04 kg	0,7	9,82
		Mecanitzat	1 Un.	600	600
ED-012	Estructura horitzontal del disc parabòlic 5 esquerra	Acer S-275-JR	5,46 kg	0,7	3,82
		Mecanitzat	1 Un.	150	150
ED-013	Estructura horitzontal del disc parabòlic 5 dreta	Acer S-275-JR	5,46 kg	0,7	3,82
		Mecanitzat	1 Un.	150	150
ED-014	Estructura horitzontal del disc parabòlic 6 esquerra	Acer S-275-JR	5,46 kg	0,7	3,82
		Mecanitzat	1 Un.	150	150
ED-015	Estructura horitzontal del disc parabòlic 6 dreta	Acer S-275-JR	5,46 kg	0,7	3,82
		Mecanitzat	1 Un.	150	150
ED-016	Estructura horitzontal del disc parabòlic 7 esquerra	Acer S-275-JR	5,46 kg	0,7	3,82
		Mecanitzat	1 Un.	150	150
ED-017	Estructura horitzontal del disc parabòlic 7 dreta	Acer S-275-JR	5,46 kg	0,7	3,82
		Mecanitzat	1 Un.	150	150
ED-018	Estructura horitzontal del disc parabòlic 8 esquerra	Acer S-275-JR	3,51	0,7	2,46
		Mecanitzat	1 Un.	150	150
ED-019	Estructura horitzontal del disc parabòlic 8 dreta	Acer S-275-JR	3,51	0,7	2,46
		Mecanitzat	1 Un.	150	150
ED-020	Subjecció fixa del mirall reflectant	Alumini 2024-T3	1,35 kg	4	5,4
		Mecanitzat	45 Un.	10	450
ED-021	Subjecció mòbil del mirall reflectant	Alumini 2024-T3	1,35 kg	4	5,4
		Mecanitzat	45 Un.	8	360

ED-022	Mirall reflectant	Vidre clar (5 mm)	30,8 m^2	19,49	600,29
		Torçat en calent	38 Un.	15	570
		Lamina Reflectant	30,8 m^2	14,34	441
ED-025	Subjecció del disc amb el braç de palanca	Acer carboni F-1140	52,5 kg	0,75	39,38
		Mecanitzat	2 Un.	350	700
Muntatge de l'estructura del disc (2 muntadors)			8 hores	2x23,8	380,8
Subtotal estructura del disc				**15.269,69 €**	

P.5 - Estructura de la parabòlica

Peça	Descripció	Material/Concepte	Un./kg/ hores	Preu unitari (€/un)	Total (€)
EP-001	Sabata del pilar, fonamentació	Formigó HA-25/P/40/IIa	2,8 m^3	67	187,6
		Peó	5 hores	12,05	60,25
		Oficial de 1ª	5 hores	23,02	115,1
EP-002	Pilar suport de tot el dispositiu	Acer S-275-JR	532,7 kg	0,7	372,89
		Mecanitzat	1 Un.	70	70
EP-004	Placa d'ancoratge del pilar a la sabata	Acer S-275-JR	324 kg	0,7	226,8
		Mecanitzat	1 Un.	200	200
EP-005	Perns d'unió de la placa d'ancoratge a la sabata	Acer B-400-S	4,25 kg	0,65	2,76
		Mecanitzat	4 Un.	15	60
EP-006	Mallat de rodons corrugats, fonamentació	Acer B-400-S	141,9 kg	0,65	92,23
		Soldador	12 hores	23,4	280,8
EP-007	Braç de Palanca	Acer S-275-JR	720,9 kg	0,7	504,63
		Soldador	14 hores	23,4	327,6
		Mecanitzat	1 Un.	125	125
EP-008	Subjecció entre el braç de palanca i l'eix d'inclinació	Acer carboni F-1140	115,2 kg	0,75	86,4
		Mecanitzat	2 Un.	110	220
Muntatge de l'estructura (2 peons)			8 hores	2x12	192
Muntatge de l'estructura (1 Oficial)			8 hores	23,02	184,16
Subtotal estructura de la paràbola				**3.308,22 €**	

P.6 - Components elèctrics

Peça	Descripció	Material/Concepte	Un./kg/ hores	Preu unitari (€/un)	Total (€)
----------	Sistema Primari	Inversor CC/CA	1 Un.	1125,3	1125,3
		Inversor CA/CC	1 Un.	1022,5	1022,5
		Altres components	Varis	300,4	300,4
----------	Sistema secundari	Placa impresa i components necessaris	1 Un.	250	250
Muntatge de la part elèctrica (1 electricista)			4 hores	23,78	95,12
Subtotal components elèctrics				**2.793,32 €**	

P.7 - Cost total de l'instal·lació

Subconjunts	Total
Motor Stirling	24.095,54 €
Sistema Giratori	1.608,95 €
Sistema d'inclinació	1.914,69 €
Estructura del disc	15.269,69 €
Estructura del captador	3.308,22 €
Components elèctrics	2.793,32 €
Captador solar Stirling	**48.990,41 €**

S'ha de tenir en compte que aquest és el cost de crear el primer prototip, tal i com hem comentat anteriorment, per arribar a un sistema viable econòmicament, s'han de fer diversos canvis al prototip original, modificar alguns materials, solucionar problemes tècnics, optimitzar el motor, un estudi peça a peça per reduir costos de producció, creació de matrius, etc. Possiblement estaríem parlant de multiplicar aquest cost per quatre, sense incloure-hi les matrius que tenen un cost molt elevat.